

- 4 -

"Perspectives pour le contrôle de la circulation aérienne dans les phases avancées d'automatisation : la "Méthode des Filtres ""

(Revue "Navigation" 1968)

PERSPECTIVES POUR LE CONTROLE DE LA CIRCULATION AÉRIENNE DANS LES PHASES AVANCÉES D'AUTOMATISATION « LA MÉTHODE DES FILTRES »

par J. VILLIERS

INGÉNIEUR EN CHEF DE LA NAVIGATION AÉRIENNE

LE CONTROLE DE LA CIRCULATION AÉRIENNE EN ÉVOLUTION

Les conséquences des « encombrements du ciel » font déjà peser leur poids sur l'économie du transport aérien (attentes au départ, attribution de niveaux, de vitesses ou de profils de vol non optimaux, attentes à l'arrivée). L'accélération du taux de croissance de cette industrie et l'exploitation prochainement prévue d'une nouvelle génération de matériel volant (avions supersoniques) entraîneraient une situation rapidement inacceptable si des mesures n'étaient pas prises pour adapter les méthodes et les moyens du contrôle de la circulation aérienne à la demande et aux exigences du trafic. Fort heureusement, ceux qui se consacrent aux choses de l'air sont habitués à vivre dans un monde en évolution permanente, marquée parfois de certains paliers, mais ne laissant jamais de répit durable.

Le contrôle de la circulation aérienne ne disposait tout d'abord que des plans de vol déposés par les pilotes et remis à jour par des reports de positions et de niveau au passage sur des points radiobalisés; un tel contrôle, dit « contrôle aux procédures », impose, en raison de l'imprécision de l'information sur lequel il est basé, de maintenir des séparations importantes entre les avions (par exemple, 10 mn de vol). Dans l'exercice d'un tel contrôle, le vol de chaque avion dans chaque secteur traversé est présenté au contrôleur sous forme d'une bande de papier (strip) sur laquelle les heures et niveaux figurent de manière à faciliter les comparaisons des vols entre eux.

L'utilisation du radar permet de préciser la position actuelle des avions, donc de réduire les séparations, mais au prix d'une tâche pesante et délicate car rien ne distingue, *a priori*, l'écho d'un avion de ceux de tous les autres; et l'écran radar est muet sur le niveau et sur la position future des avions.

Le radar secondaire (SSR), d'introduction récente, pallie partiellement cette limitation du radar, grâce au fait que les réponses des avions ne sont

plus passives, mais portent, d'une part, un code défini par le contrôleur et affiché par le pilote (mode A) et, d'autre part, un code automatiquement élaboré par les capsules anéroïdes de bord et spécifique du niveau actuel de vol (mode C). Le nombre de codes disponible en mode A n'est cependant pas suffisant pour l'attribution permanente d'une identité à chaque avion en service; l'utilisation de l'information brute du SSR ne permet pas directement la présentation sur l'écran du radar de l'identité des avions (mode A et corrélation aux plans de vol), de leur niveau actuel (mode C) ni de leurs positions et niveaux futurs.

Il apparaît donc que la quantité et la qualité des informations disponibles s'accroissent progressivement; cependant, la mise à profit effective et complète de ces informations soulève, à chaque stade d'évolution du système, des problèmes nouveaux concernant à la fois la doctrine et la pratique de mise en œuvre.

En particulier, le partage optimal des tâches entre les contrôleurs au sein de chaque secteur de contrôle et la coordination des équipes de contrôle entre elles pose d'ores et déjà des problèmes complexes et délicats; paradoxalement, ces problèmes deviennent de plus en plus critiques en raison de la quantité croissante d'informations à acquérir, intégrer, présenter, acheminer et traiter dans un temps alloué qui décroît lorsque la vitesse des avions augmente et que le trafic devient plus dense.

Le recours à l'assistance du traitement automatique de l'information offre une solution potentielle à la dégradation progressive de la situation.

La répartition des tâches entre les contrôleurs n'en gardera pas moins son importance fondamentale et son acuité; le nouveau degré de liberté qui sera offert ne pourra, cependant, être mis pleinement à profit que si l'ensemble du dispositif est repensé en fonction de ses dimensions nouvelles.

La doctrine présentera donc une importance renouvelée, et de son orientation dépendra l'architecture du système futur: organisation du contrôle, répartition des tâches entre les contrôleurs et les calculateurs, structure, choix et utilisation des calculateurs et de leurs moyens périphériques.

La doctrine en la matière est cependant austère par nature et l'auteur sollicite de son lecteur le bénéfice des circonstances atténuantes si toutefois sa curiosité l'incitait à persévérer, malgré cet avertissement, dans son désir de prendre connaissance de la théorie qui va suivre.

LA PHASE II D'AUTOMATISATION, ÉTAPE DANS UNE ÉVOLUTION

L'introduction progressive de l'automatisation, dans les processus de contrôle régional s'effectue, en France, selon un plan comprenant plusieurs étapes définies de telle manière que chaque phase :

- augmente l'efficacité du système;
- conditionne le calculateur pour la phase suivante.

Stratégie de la mise en œuvre de l'automatisation en France

TABIEAU I

FONCTIONS AUTOMATISÉES		CONDITIONNEMENT DU CALCULATEUR QUI EN RÉSULTE	
Phase I	Stripes calculés et réglés automatiquement dans tous les Centres de Contrôle Régional (Paris, Atr, Bordeaux).	→	Tous les plans de vol en mémoire dans le calculateur.
Phase II _p (plans de vol)	— Coordination aux procédures <i>Miles-Stripes</i> esynchrones et semi-automatique.	→	Tous les plans de vol sont systématiquement « écrits » et mis à jour dans le calculateur.
	— Planification du débit du trafic et de l'emploi de l'espace.	→	
Phase II _r (radar)	— Coordination civile/militaire.	→	Tous les plans de vol d'avions équipés de SSR sont systématiquement à jour dans le calculateur (« heure radar », niveau mode C).
	— Allocation automatique des codes SSR. Identification et poursuite automatique SSR.	→	
	— Affichages alphanumériques sur scope radar (identité, niveau).	→	
Phase III	— Assistance à la coordination (heure SSR et niveau mode C) sur les messages de coordination et sur les « stripes ».	→	
	— Déport digital des informations des radars éloignés.	→	

Où en sera-t-on en fin de phase II ?

La phase I est en service depuis 1963. Les phases II_P et II_R sont entrées en service expérimental au cours de l'année 1967 par paliers successifs au Centre de Contrôle Régional Nord.

La phase II apportera la solution du problème de la coordination *intersecteurs* sous toutes ses formes :

- entre contrôleurs aux procédures,
- entre contrôleurs radar,

et mettra un terme au foisonnement de certaines des tâches qui résultent de la division de l'espace en un nombre croissant de secteurs.

Par ailleurs, la phase II fait franchir une première étape dans la résolution du problème de la coordination des tâches à l'intérieur même de chaque secteur (coordination *intra-secteur*), en effet :

— l'identité en clair de l'avion sur les écrans radar permettra à *tout instant*, sans recherche, ni perte de temps à chacun des deux contrôleurs radar et procédure de rassembler l'ensemble des informations concernant un vol (position radar, niveau mode C, positions futures);

— l'introduction de « l'heure radar » sur les messages de proposition de transfert élaborés par le calculateur au profit du secteur donnant et sur le strip du secteur suivant au moment de la coordination constitue une première étape dans l'intégration de ces deux sources d'information distinctes;

— la suppression des reports de position systématiques rendue ainsi possible, participera largement à la réduction de la tâche de l'équipe de contrôle du secteur qui pourra consacrer une plus grande partie de son temps à coordonner son propre travail.

L'ampleur du bénéfice de l'application de la phase II_P sera cependant fonction du degré d'automatisation des centres adjacents, tandis que la phase II_R portera des fruits d'autant plus précieux que la couverture radar disponible sera plus complète et continue. Les déports des informations radar seront effectués sur ligne téléphonique après transformation des signaux du radar et du radar secondaire en une succession de messages sous forme digitale.

NÉCESSITÉ DE DÉFINIR LA PHASE III SANS TARDER

Les mesures à prendre pour le déport des informations radar ont déjà été définitivement arrêtées et les premières tranches de matériel commandées.

La conception de l'ensemble de calcul central vers lequel seront acheminées toutes les informations dépend, dans une large mesure, de l'usage qui en sera fait, en particulier sous l'angle du volume de traitement

d'information et de la sécurité requise pour chaque fonction. Une analyse *extrêmement fine* doit donc être entreprise pour éviter l'écueil qui consisterait à prévoir trop grand (ou trop petit) ou mal adapté au problème, avec une sécurité surabondante pour certaines fonctions, insuffisante pour d'autres. Il est évident que la précaution consistant à prévoir très surabondant et *infiniment sûr* risque de faire concevoir un *monstre* plus ou moins improgrammable dans des délais raisonnables et dont la sécurité de fonctionnement imaginée peut se révéler *illusoire* (ne serait-ce qu'en raison de la complexité des programmes et de l'impossibilité de les tester totalement dans toutes les conditions).

Alors même que la phase II ne fait que démarrer, il convient donc, *dès maintenant*, de définir avec soin ce que sera la *phase III* destinée à être utilisée dans les années 1970-1975, afin d'adapter le calculateur à ses futures fonctions.

La phase III, pourquoi ?

La phase II permettra à la fois une diminution des tâches des contrôleurs et un accroissement de l'efficacité du contrôle (en qualité et en quantité).

On peut donc s'attendre à une nette amélioration de la situation, mais, en aucune manière, on ne peut considérer que la phase II constituera une révolution suffisante pour permettre d'attendre avec sérénité le trafic des années à venir.

Le bénéfice le plus profond, bien que provisoirement peu spectaculaire, de la phase II réside dans le fait que le calculateur disposera dans ses mémoires des informations de plan de vol et de radar (dont le mode C) corrélées entre elles.

La mise en œuvre de la phase II a été rendue très difficile et très longue en raison de la complexité des matériels nouveaux à définir, à faire construire et à mettre au point à cette fin.

La phase III se caractérisera essentiellement par le choix qui sera fait de la méthode optimale de traitement des informations qui ont pu être stockées en calculateur grâce à l'exercice de la phase II.

Il convient de noter que la phase II définie en France présente un caractère original très marqué par rapport à des phases similaires de développement prévues dans d'autres pays. Par ailleurs, la phase II en France constituera la première réalisation aussi avancée, et sera pénalisée, en conséquence, par son isolement.

Quant à la phase III, phase ultime prévisible de l'utilisation des calculateurs dans « l'environnement » actuel, peu de choses ont été publiées à son sujet.

On dit souvent qu'elle se caractérisera par la « recherche des conflits », suivie éventuellement de la « résolution des conflits » par le calculateur. En fait, la réalité est beaucoup plus complexe.

Prenons, par exemple, la « recherche des conflits » ; on peut se poser les questions suivantes :

- de quels conflits s'agit-il (aux procédures, au radar), selon quelles normes d'espacement et à quelle échéance ?
 - quand et pourquoi cette recherche doit-elle être effectuée ?
 - comment partager la tâche entre un calculateur et un contrôleur, tous deux chargés de la « recherche des conflits » ?
 - quel bénéfice le contrôleur en retirera-t-il ?
 - dans quelle mesure la capacité de l'espace et la capacité du Centre en seront-elles affectées ?
- etc.

Il est pratiquement impossible de répondre *a priori* à ces questions, ce qui prouve que le problème doit être posé d'une autre manière.

Il convient, en effet, avant de proposer une solution, de rechercher si les problèmes qui ne sont pas résolus par la phase II, ne peuvent pas être résolus par un traitement plus approfondi en calculateur de l'information disponible. Or, on a vu ci-dessus que les problèmes résiduels se situent au niveau du travail *au sein du secteur*.

En effet, si la capacité d'un secteur peut être augmentée en accroissant le nombre de ses servants (contrôleurs aux procédures, contrôleurs radar, coordonnateur, assistants), le bénéfice de l'addition d'un membre à l'équipe est inversement proportionnel à son effectif préalable; de plus, à partir d'un certain moment, l'équipe devient si importante et prend tant de place que le principe considéré en France comme fondamental de la cohésion interne du secteur ne peut plus être préservé : le problème majeur concerne donc la coordination au sein du secteur en vue de la répartition optimale et en temps réel des tâches entre les participants.

La recherche du progrès au-delà de la phase II devra donc être précédée d'une *analyse fine des problèmes soulevés par la répartition et la coordination des tâches au sein du secteur*.

Dans la recherche des solutions basées sur l'emploi intensif du calculateur on ne s'imposera pas de copier servilement l'exploitation manuelle de phase II ; au contraire, on s'autorisera à repenser, aussi fondamentalement qu'il apparaîtra nécessaire, les procédures et méthodes actuelles qui ont été établies essentiellement pour une exploitation manuelle.

C'est dans ces conditions que l'on procédera ci-dessous à une analyse de la situation résultant de l'exploitation en phase II.

Le goulot d'étranglement du système.

Dès qu'il constate un conflit potentiel, le contrôleur aux procédures a le choix entre plusieurs tactiques :

- résoudre le conflit par les règles et moyens du contrôle aux

— surseoir à la résolution du conflit si son échéance est suffisamment lointaine (mais il s'impose corrélativement de procéder systématiquement à partir de ce moment à la surveillance de l'évolution de la situation) ⁽¹⁾;

— se décharger du problème sur le contrôleur radar qui assurera, le moment venu et si nécessaire, l'échelonnement des avions correspondants selon des normes de séparation radar.

Cependant, si le contrôleur aux procédures est maître du choix de sa tactique en chaque circonstance, il ne peut procéder que d'une manière empirique, car il n'est pas en mesure d'évaluer *objectivement* les conséquences de ses décisions sur sa propre charge de travail ultérieure et sur celle du contrôleur radar.

En particulier, la décision de confier le problème au contrôleur radar doit être prise à un moment tel que :

— le contrôleur radar soit averti suffisamment tôt pour pouvoir prendre ses dispositions en conséquence;

— le contrôleur radar ne soit pas averti trop tôt pour ne pas se faire imposer un temps de surveillance trop long de la paire d'avions concernés (avec la seule analyse de son écran radar, le contrôleur n'est pas en mesure d'évaluer longtemps à l'avance si deux avions seront ou ne seront pas ultérieurement en conflit radar).

Par ailleurs, si un nombre insuffisant de problèmes est soumis au contrôleur radar, on n'utilise pas pleinement les possibilités offertes par l'information disponible. Inversement, si une charge trop importante est confiée à un moment donné au contrôleur radar, on prend un risque inacceptable de saturation de ces postes de travail; en particulier, si, comme il est parfois suggéré, le parti était pris d'ignorer tout contrôle aux procédures au profit d'un contrôle radar exclusif.

Si un deuxième poste de radariste est créé, on augmente les problèmes de coordination interne du secteur et on diminue sa cohésion physique en accroissant la dimension de l'ensemble des consoles affectées au secteur (en particulier, il arrive un moment où on ne peut plus ménager à chaque participation l'accès visuel aux strips actifs).

Enfin, on notera que le fait pour un contrôleur aux procédures de « sous-traiter » un conflit potentiel au contrôleur radar impose à ces deux agents une coordination active et permanente, aux lourdes conséquences.

L'ensemble de ces servitudes va constituer le *goulot d'étranglement* du système, si aucune mesure n'est prise en conséquence.

RETOUR SUR LA NATURE ACTUELLE DU CONTRÔLE AUX PROCÉDURES

Afin de chercher des solutions pour sortir de l'impasse prévisible, il est apparu nécessaire de repenser la nature du contrôle aux procédures afin de pouvoir mieux analyser ses relations actuelles avec le contrôle

radar et, si possible, de définir des concepts nouveaux susceptibles de permettre la résolution automatique par le calculateur de la coordination interne au sein d'un secteur.

A titre d'illustration, on se placera d'abord dans le cas de deux trajectoires sécantes en un point I. Pour la clarté et la simplicité de tout l'exposé qui va suivre, on supposera les avions au même niveau; les autres configurations seront étudiées ultérieurement.

De même, les estimations numériques ne constituent que des approximations donnant des ordres de grandeur raisonnables, suffisants pour les besoins de la démonstration.

Le concept classique de contrôle aux procédures.

Soient deux avions A et B posant un problème mutuel.

Lorsqu'on effectue un contrôle aux procédures classique on utilise une séparation S_p établie de telle manière que, compte tenu des erreurs, la probabilité de rencontre de deux avions soit nulle.

On prendra pour S_p la valeur réglementaire de 10 mn de vol bien qu'en fait, notamment pour les avions rapides, cette valeur semble exagérée, et on négligera tout d'abord l'effet des dispersions latérale et verticale qui tend à réduire la probabilité de collision en cas de perte de séparation longitudinale.

Supposons donc deux avions tels qu'à leur entrée dans un secteur de contrôle, leurs heures prévues de survol du point I de croisement de leurs trajectoires diffèrent précisément de $S_p = 10$ minutes.

La différence effective des temps d'arrivée des avions A et B au point I est répartie selon une courbe en cloche centrée sur l'abscisse 10 minutes et s'étendant entre les abscisses 0 et 20 minutes (fig. 1).

L'analyse de cette courbe montre que l'importance des séparations appliquées au contrôle aux procédures provient du fait qu'on s'impose une probabilité nulle d'accident et que des marges considérables doivent être prises en conséquence, marges qui peuvent conduire, dans certains cas, à une séparation effective égale à deux fois la séparation standard. Il s'ensuit que la capacité de l'espace est très faible dans le cas du contrôle aux procédures pures, et que, corrélativement, la charge de travail de contrôle croît rapidement avec le trafic.

La pénalisation fondamentale de ce type de contrôle provient donc du fait que les décisions prises le sont par « tout ou rien », tout conflit potentiel étant a priori supposé être un accident, ce qui impose donc des mesures conservatoires très pénalisantes. Lorsque ce contrôle est pondéré par une assistance radar, il est encore procédé à des décisions par tout ou rien, tout conflit potentiel étant, soit considéré comme un accident, soit confié au contrôleur radar pour solution appropriée, soit « mis de côté » pour une résolution ultérieure.

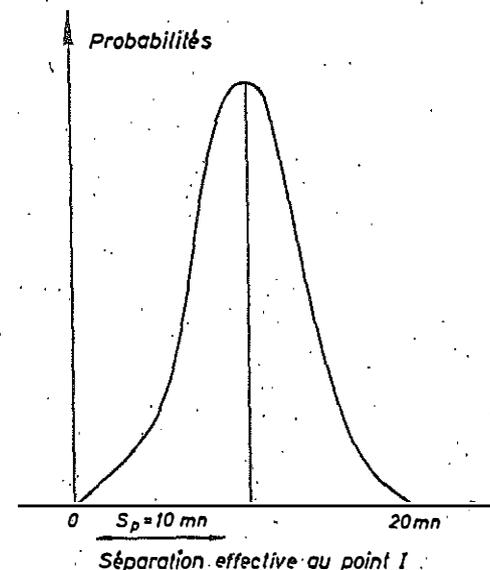


Fig. 1. — Répartition des heures effectives d'arrivée en I de deux avions séparés nominalement de 10 mn en I

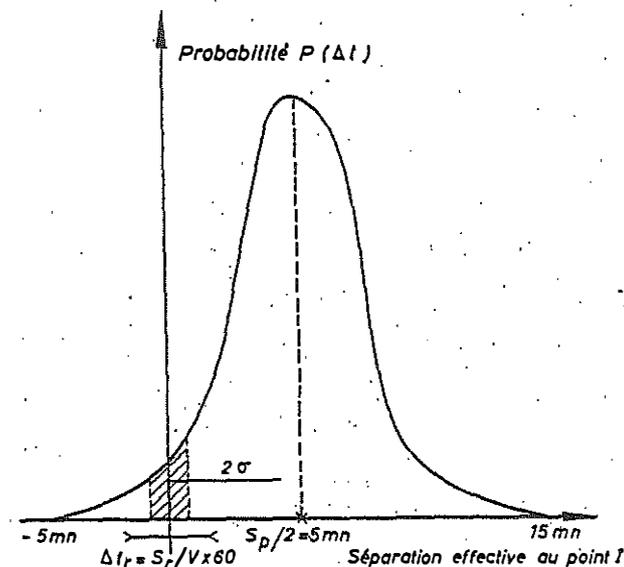


Fig. 2. — Répartition des heures effectives d'arrivée en I de deux avions séparés nominalement de 5 mn en I

Analyse préalable à la proposition d'un nouveau concept de contrôle aux procédures.

Supposons, à titre d'exemple, que les consignes données au contrôleur aux procédures soient, non plus de n'accepter les avions que s'ils sont 2 à 2 séparés par la norme habituelle, mais de ne les refuser que s'ils ne sont pas séparés, par exemple, de la moitié de cette norme standard.

Dans le cas choisi, les différences d'heure des arrivées effectives des deux avions A et B au point I se répartiront selon la courbe de la figure 1 décalée de 5 minutes vers la gauche sur l'axe des temps (fig. 2).

Cette nouvelle courbe peut donner lieu à d'intéressants commentaires:

A. — La probabilité d'accident qui en résulte est extrêmement faible; elle correspond à la probabilité comprise dans un mince rectangle vertical centré sur l'axe des y , s'appuyant sur la courbe et sur l'axe des x et de largeur égale au double temps de vol d'un avion pour parcourir une distance égale à sa longueur (de l'ordre de 1/3 de seconde pour un gros réacteur).

La probabilité de rencontre effective est encore réduite, même pour deux avions au même niveau nominal, par la dispersion des niveaux vrais autour de leur valeur nominale, ainsi que par la dispersion latérale naturelle des avions autour de leur trajectoire nominale.

Il est évident cependant que, bien que très faible, ce risque ne peut pas être accepté en raison du nombre extrêmement grand de cas où cette éventualité se produirait chaque année pour l'ensemble des avions, si une telle norme réduite était brutalement et exclusivement appliquée.

B. — La partie de la courbe située à gauche de l'axe vertical correspond aux cas où l'avion, supposé devoir arriver le premier en I arrive en fait le second; dans le cas choisi, et en supposant la répartition gaussienne, une telle situation se produit dans 2,5 % des cas.

En fait, cette situation doit se produire encore un peu plus souvent si l'on suppose, comme cela est probable, que la répartition n'est gaussienne qu'en son centre, mais présente au-delà d'une certaine valeur des queues de distributions plus importantes que selon la loi normale.

C. — On peut calculer la probabilité P_R pour qu'au point de croisement les deux avions ne soient pas séparés d'une distance égale à la séparation radar S_R ($S_R = \pm 5$ nautiques). Cette probabilité est celle qui correspond au rectangle figuré avec des hachures sur la figure 2 et dont la demi-base est égale à :

$$\Delta t_R = \frac{S_R}{V} \times 60;$$

Δt_R , en minutes; S_R , en nautiques; V , en nœuds.

$$P_R = \int_{-\Delta t_R}^{+\Delta t_R} P(\Delta t) d(\Delta t).$$

D. — En fait, la probabilité P_R correspond au cas où la séparation nominale appliquée entre les deux avions est juste égale à $\frac{S_p}{2}$. En réalité, si on ne refoule que les avions qui ne présentent pas une telle séparation minimale, la répartition des différences d'heures estimées sur le point I obéira, en raison de l'arrivée semi-aléatoire du trafic, à une loi P_f dont l'allure est représentée sur la figure 3.

E. — Dans un secteur donné qui a, par exemple, accepté N avions en vol simultanés, il existe, au maximum, $N_p = \frac{N(N-1)}{2} \neq \frac{N^2}{2}$ problèmes d'avions 2 à 2. Compte tenu de la dispersion des avions à l'entrée du secteur et du temps moyen de vol dans le secteur, seule une fraction K de ces problèmes impose qu'une décision soit prise par le contrôleur aux procédures.

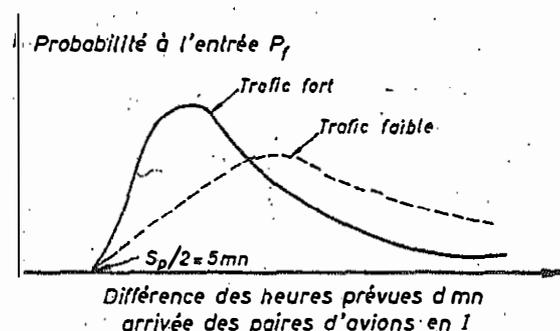


Fig. 3. — Probabilité des heures d'arrivée en I pour un trafic filtré par un contrôle aux procédures appliquant la norme de séparation $\frac{S_p}{2}$.

Ce nombre K , inférieur à 1, dépend de nombreux paramètres parmi lesquels nous citerons :

- l'intensité du trafic entrant;
- le degré d'organisation du trafic provenant du secteur précédent;
- la norme de séparation appliquée dans le secteur précédent;
- la norme de séparation appliquée à l'entrée dans le secteur considéré;
- la structure des voies au sein du secteur.

Une simulation permettra de donner des valeurs moyennes à ce coefficient dans chaque cas particulier.

Pour les besoins de l'exposé de la méthode proposée nous nous contenterons de savoir que K est inférieur à 1 et nous le prendrons, par exemple, égal à 1/10 (une paire d'avions sur dix pose un problème mutuel à l'entrée). Il est bien évident que si le secteur précédent applique des normes de séparations S_D et que le secteur considéré applique $\frac{S_p}{2}$ la valeur

Si $N = 30$:

$$N_p = \frac{30^2}{2} = 450$$

et $K = 1/10$, on a :

$$KN_p = 45.$$

Si le temps de vol moyen dans un secteur est de 20 mn, on peut estimer qu'il se présente $45 \times 3 = 135$ vrais problèmes par heure aux contrôleurs aux procédures; ce cas correspond à un trafic très dense et application d'une norme de séparation de $\frac{S_p}{2}$ à l'entrée du secteur.

F. — Il résulte de E et de C que le nombre de cas où, en appliquant en trafic dense ($N = 30$ par secteur) une norme de séparation $\frac{S_p}{2}$ à l'entrée, une perte de séparation radar effective se produira uniquement dans $135 \times P_{\bar{R}}$ cas.

L'examen de la figure montre que la valeur de $P_{\bar{R}}$ est très faible et donc que l'acceptation à l'entrée du secteur d'avions séparés de $\frac{S_p}{2}$ ne donnera naissance qu'à un très petit nombre de conflits radar réels par heure de trafic (par exemple, de l'ordre de 5 par heure si $P_{\bar{R}} = 4\%$). La mise en œuvre de la phase II permettra d'acquiescer et de dépouiller automatiquement les données pour l'établissement des courbes de dispersion nécessaires au calcul précis de $P_{\bar{R}}$.

UN NOUVEAU CONCEPT DE CONTRÔLE AUX PROCÉDURES

L'analyse effectuée au paragraphe précédent conduit naturellement à la proposition d'un nouveau concept de contrôle aux procédures.

PREMIER PRINCIPE.

Il est fait application à l'entrée de chaque secteur d'une norme de séparation $\frac{S_p}{2}$ par le contrôleur aux procédures.

La capacité nominale de l'espace du secteur est doublée par rapport à la situation actuelle.

Dans le cas de l'espace supérieur, la meilleure précision des prévisions permettant sans doute, toutes choses égales par ailleurs, d'appliquer une norme $\frac{S_p}{4}$ (2,5 mn) à l'entrée de chaque secteur et de quadrupler en conséquence la capacité nominale de l'espace.

Il en résulte qu'un certain nombre $KN_p P_{\bar{R}}$ de conflits radar apparaîtra ultérieurement en conséquence de ce resserrement des contraintes à l'entrée du secteur.

Cependant, le contrôleur radar ne sera en mesure de résoudre effectivement les conflits qui lui sont confiés que s'il est averti pour chacun d'eux avec un préavis T_R suffisant [mais, cependant, pas trop important pour ne pas accaparer son attention pendant une période inutilement longue (1)]. Il paraît raisonnable de fixer par exemple $T_R = 5$ mn. On déduit de cette condition, un deuxième principe de base du nouveau concept.

DEUXIÈME PRINCIPE.

Les conflits radar, s'il en apparaît en application du premier principe, seront détectés à l'avance et notifiés au contrôleur radar avec un préavis T_R ($T_R = 5$ mn).

On appellera situation de « préavis radar » en plan, une situation dans laquelle les plots radar de deux avions extrapolés selon les éléments du plan de vol pendant un temps T_R (5 mn) ont une probabilité non nulle de ne pas être séparés de la séparation radar (5 nautiques) dans les 5 mn à venir.

Mode opératoire.

L'application des deux premiers principes conduit donc à traiter de manières différentes les trois catégories de cas qui peuvent se présenter à l'entrée d'un avion dans un secteur, en ce qui concerne chacune des ($N - 1$) relations de cet avion avec chacun des ($N - 1$) autres avions en compte :

- a) la séparation par extrapolation du plan de vol est supérieure à S_p et les avions ne sont pas séparés en niveau; l'avion est accepté et il n'est plus nécessaire de le surveiller dans le secteur en ce qui concerne ses relations avec les $N - 1$ autres avions;
- b) la séparation par extrapolation du plan de vol est inférieure à $\frac{S_p}{2}$ et les avions ne sont pas séparés en niveau; le contrôleur aux procédures modifie en conséquence l'autorisation de vol;
- c) la séparation par extrapolation du plan de vol est comprise entre S_p et $\frac{S_p}{2}$ et les avions ne sont pas séparés en niveau; il est procédé à une « surveillance de l'évolution » de la situation.

Cette première phase sera dénommée « filtrage aux procédures »; il met en évidence des « paires d'avions-problèmes ». Il sera suivi d'une deuxième phase dite « de surveillance et de préavis radar » (que l'on dénommera « filtrage radar »).

(1) Dans le cas où le point I est à 10 mn de vol du point d'entrée dans le secteur, le conflit radar éventuel peut ne se manifester que 20 mn après l'entrée de l'avion dans le secteur.

Le « filtrage radar » appliqué à chacune des « paires d'avions-problèmes » issues du « filtrage aux procédures » consiste à :

— à l'heure H_0 , où un avion est accepté dans le secteur, calculer à partir de la position radar extrapolée par les éléments du plan de vol, le délai le plus rapproché dans lequel une perte éventuelle de séparation radar peut avoir lieu en prenant dans les plans de vol des avions concernés, les valeurs extrêmes des erreurs, de façon à obtenir une estimation sûrement par défaut du temps T_1 . Noter l'heure H_1 correspondante;

— à H_1 — 5 mn, recommencer le calcul; toutefois, pendant le temps T_1 , les deux avions ont évolué selon une trajectoire linéaire; en comparant les positions radar de chaque avion aux moments H_0 et H_1 on peut en déduire la vitesse radar vraie de chaque avion avec une précision ΔV_R bien meilleure que celle qui découle du plan de vol (1). C'est donc avec une vitesse V_R (affectée d'erreurs ΔV_R), et à partir de la position radar actuelle que l'on évaluera la nouvelle heure la plus proche H_2 à laquelle aura éventuellement lieu une perte de séparation radar (2) (heure de « préavis radar »), à moins qu'il soit dès à présent certain qu'une telle éventualité ne se produira pas (ce dernier cas est le plus probable);

— à H_2 — 5 mn, recommencer le processus de calcul précédent avec une nouvelle vitesse radar raffinée par rapport à la précédente, éliminer les paires d'avions-problèmes qui ont disparu, recalculer une nouvelle heure H_3 qui sera, selon toute vraisemblance, « l'heure de préavis radar » si la « situation de préavis radar » n'a pas été éliminée précédemment dans le processus d'itération.

La « sortie » de ce filtrage en cascade « aux procédures », puis « radar », fera apparaître les quelques rares « conflits radar » dont le nombre peut être estimé *a priori*. Ces conflits seront présentés en temps utile au contrôleur radar pour qu'il en assure la « solution radar ».

CONSÉQUENCES DES DEUX PRINCIPES

1. — La première phase (« filtrage aux procédures ») peut être manuelle, mais se trouve très améliorée si les extrapolations des plots radar par les plans de vol sont effectuées par un ordinateur (phase II). Par contre, la deuxième phase de surveillance et préavis radar (« filtrage radar ») ne peut pas être exécutée manuellement d'une manière optimale, car :

— elle exige une attention soutenue et échelonnée sur une longue durée pour chaque paire d'avions-problèmes (donc une grande charge de travail);

(1) Pour un échantillonnage sur un tronçon de 10 minutes de vol, en UIR par exemple et pour des avions situés à une distance raisonnable du radar ΔV_R est de l'ordre de quelques % de V_R , mais dépend de la position de la trajectoire par rapport au radar.

(2) Le calculateur analysera à la fois la séparation longitudinale et la séparation latérale au voisinage de I.

— elle exige que la vitesse radar soit calculée entre les heures H_1 , H_2 , ..., ce qui ne peut être effectué au seul examen de l'évolution du trafic sur un écran de radar (l'information correspondante reste d'ailleurs inutilisée dans le système actuel).

Par contre, un ordinateur assurant la poursuite des échos radar est particulièrement bien adapté pour effectuer ces fonctions qui n'exigent de sa part qu'un traitement complémentaire relativement minime (en temps réel) de l'information dont il dispose.

2. — Le nombre de préavis de perte de séparation radar sera un peu plus élevé que le nombre de perte effective de séparation radar en raison des erreurs d'extrapolation pendant la durée du préavis. On notera cependant que ces erreurs d'extrapolation sont faibles puisqu'elles résultent de l'utilisation du vecteur vitesse dérivé du radar sur une période d'échantillonnage longue et qu'elles portent sur une durée faible.

3. — On a vu qu'il est possible de calculer *statistiquement* le nombre N_R de problèmes qui sera soumis au contrôleur radar par heure. Pour une utilisation opérationnelle effective, on ne peut cependant pas se contenter d'une statistique globale, même si cette dernière portait sur un ensemble de simulations. En effet, la charge instantanée du contrôleur radar ne doit, en aucun cas, dépasser une valeur n_R en raison de l'incidence sur la sécurité et inversement, il serait dommage de « filtrer à l'entrée » le trafic d'une manière plus sévère que ne l'impose la situation réelle dans un secteur donné à un moment donné. C'est pourquoi on modifiera le premier principe de base de la manière suivante :

PREMIER PRINCIPE MODIFIÉ.

Pour chaque nouvel avion entrant dans un secteur le « filtrage d'entrée » dans le secteur sera effectué avec une norme de séparation égale à $\frac{S_p}{p}$. Le facteur p sera calculé, dans chaque cas, compte tenu de la situation dans le secteur, de manière que la probabilité pour que la charge instantanée future du contrôleur radar dépasse le seuil n_R soit nulle, tout en maintenant une charge moyenne n_R donnée.

Conséquences.

1) Il est bien évident que les calculs nécessaires à l'application du premier principe modifié ne peuvent pas être effectués par un contrôleur. Par contre, un ordinateur assurant la poursuite des plots radar est capable de mettre en œuvre ce nouveau principe puis le second principe.

L'application de ces deux principes constitue la base de la méthode présentée : méthode des filtres.

2) La phase de « surveillance de la situation » qui résulte de l'application du deuxième principe se contente théoriquement d'une première itération à l'heure H_1 — 5 mn. En fait, il convient d'effectuer cette opération...

avion plus précise que celle qui résulte du seul plan de vol. Ce léger surcroît de calcul permettra d'éliminer aussitôt que possible une partie des avions-problèmes qui ne présenteront pas de perte de séparation radar. Cette anticipation permet de raffiner la prévision de charge du contrôleur radar nécessaire à l'application du premier principe modifié.

3) Au moment de chaque itération il est possible, si la présomption de future perte de séparation radar subsiste, de calculer la vitesse que devrait prendre un ou les deux avions en cause pour diminuer ou éliminer les chances futures d'une telle éventualité.

Supposons, à titre d'exemple, que le test d'itération ait lieu alors que les avions sont à 50 nautiques du point I, en UIR, par exemple. Ces 50 nautiques représentent environ 7 mn de vol, c'est-à-dire que chacun des deux avions peut encore perdre (ou gagner) 1 nautique longitudinalement pour une diminution (ou une augmentation) de vitesse de 8,5 nœuds.

Cette possibilité offerte par la méthode constitue une manière rationnelle et efficace d'utiliser le « contrôle de vitesse ».

MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE DES FILTRES

A. — Avions munis de SSR ou « poursuivis » automatiquement.

a) A l'entrée dans le secteur, le strip est calculé et imprimé avec des heures sur les balises dérivées de la position réelle SSR au moment du transfert et extrapolées avec les éléments du plan de vol.

b) Le calculateur compare l'avion proposé avec l'ensemble des autres avions du secteur, en application du « premier principe modifié » et propose au contrôleur aux procédures :

— soit d'accepter l'avion (oui);

— soit d'accepter l'avion qui pose cependant des problèmes à résoudre éventuellement et ultérieurement au radar (oui mais);

— soit de refuser l'avion et de proposer une autre autorisation, qui peut être d'ailleurs élaborée par le calculateur (non, ou non mais).

La tâche du contrôleur aux procédures est alors terminée en ce qui concerne les $(N - 1)$ relations de l'avion entrant avec l'ensemble des $(N - 1)$ avions en compte dans le secteur au moment d'entrée du nouvel avion.

c) Au cas où l'application par le calculateur du « deuxième principe » ferait apparaître ultérieurement un conflit radar pour l'avion considéré, ce conflit est notifié pour résolution au contrôleur radar avec un préavis de 5 mn (les deux avions-problèmes peuvent être, par exemple, reliés sur l'écran radar par une ligne pointillée ou être affichés avec un marqueur spécial commun).

B. — Avions entrant non munis de SSR et non « poursuivis ».

PREMIÈRE POSSIBILITÉ.

a1) Le strip est calculé et imprimé avec les heures estimées par le pilote et extrapolées par le calculateur.

b1) Même procédure qu'en a) ci-dessus avec application de normes d'espacement plus importantes dans l'application du « premier principe modifié », normes qui tiennent cependant compte, pour l'examen de chaque paire d'avions, de l'équipement ou du non-équipement de chacun d'eux en SSR, la réponse du type 2 (oui mais) n'étant jamais effectuée.

DEUXIÈME POSSIBILITÉ.

a2) Le calculateur demande au contrôleur du précédent secteur de pointer l'écho radar primaire de l'avion sortant; le strip peut alors être calculé comme dans le cas a) où l'avion est muni de SSR.

b2) Même procédure qu'en b), mais dans le cas d'une proposition du type 2 (oui mais) celle-ci est accompagnée d'une réponse « non mais » et le contrôleur a le choix entre :

— changer l'autorisation de l'avion (utilisation du « non mais »);

— d'accepter l'avion.

c2) Dans le cas où le contrôleur a accepté l'avion dans la phase b2) ci-dessus, le calculateur calcule l'heure H_1 — 5 mn la plus proche à laquelle peut intervenir un « préavis de perte de séparation radar ». A cette heure, le calculateur présentera au contrôleur radar la situation; ce dernier aura le choix entre :

— accepter l'avion pour résoudre le conflit éventuel; dans ce cas, il désigne la position actuelle de l'avion, permettant ainsi au calculateur de procéder au premier stade d'itération (et dans la majorité des cas de déterminer qu'il n'y a pas de problème ultérieur), puis *idem* ultérieurement au stade suivant qui se déroulera selon la même procédure;

— refuser de traiter l'avion (il ne le voit pas, ou ne peut pas l'identifier). Dans ce cas, le conflit est renvoyé pour solution au contrôleur aux procédures.

PROPRIÉTÉS DE LA MÉTHODE

La capacité potentielle de l'espace est considérablement augmentée par rapport à celle qui résulte de l'exercice du contrôle aux procédures, sans toutefois imposer les contraintes, la charge et les limitations d'un contrôle purement radar.

Les pénalisations apportées aux avions sont minimales, par rapport à ce qu'elles sont actuellement.

La tâche des contrôleurs est réduite dans des proportions considérables. La capacité du secteur est donc augmentée.

Le partage des tâches entre le contrôleur aux procédures, le contrôleur radar, d'une part, et entre les contrôleurs et le calculateur, d'autre part, est optimisé.

Les coordinations manuelles internes au secteur sont éliminées.

Les actions sont initiées par le calculateur de sorte que le dialogue des contrôleurs vers le calculateur est réduit au minimum (quasiment éliminé à l'exception d'accusé-réception ou de notification de choix simples).

La position de contrôle conçue pour la phase II reste inchangée.

Le contrôleur reste à chaque instant maître de ses décisions et de l'exercice réel du contrôle.

EXTENSION DE LA MÉTHODE

Pour les besoins de l'exposition de la méthode proposée, nous avons considéré, à titre d'exemple, les problèmes mettant en cause deux avions au même niveau dont les trajectoires se coupent en un point I. La méthode reste, bien entendu, de portée beaucoup plus générale et peut être étendue à tous les cas :

— trajectoires sécantes et avions en évolution verticale;

— trajectoires colinéaires de même sens :

— avions en palier;

— avions en évolution;

— trajectoires colinéaires de sens inverse et avions en évolution (le cas des avions en palier est résolu d'office par la règle de séparation semi-circulaire).

A. — Trajectoires sécantes, avions en évolution.

Les deux avions sont justiciables de l'application complète de la méthode proposée en ce qui concerne leur séparation en plan. Le calculateur devra toutefois utiliser la vitesse horizontale des avions en évolution (avec les incertitudes qui s'y attachent normalement) pour ses calculs et non pas la vitesse horizontale des avions en palier. Pour un avion susceptible d'atteindre son niveau de croisière avant le point I de croisement, une incertitude supplémentaire doit être introduite dans le calcul d'extrapolation, en raison de la marge qui existe sur l'estimation du point où l'avion atteindra son niveau de croisière.

On remarquera que le calculateur dispose ainsi de tous les éléments au moment de l'entrée d'un vol dans un secteur pour l'application complète de la méthode (il connaît au moment de la coordination à la fois le niveau

La méthode en plan est déjà décrite.

La méthode en niveau peut être calquée exactement sur la dernière avec applications des mêmes principes étendus au plan vertical, les taux de montée jouant le rôle joué en plan par les vitesses horizontales.

Deux cas sont cependant à considérer :

a) les avions sont munis du SSR mode C; ce dernier joue alors le rôle exactement identique dans le plan vertical à celui du radar dans le plan horizontal; en particulier, on peut appliquer automatiquement les deux principes en calculant les positions extrapolées en niveau et concourir ainsi à éliminer la plupart des « préavis de perte de séparation radar », la probabilité devenant extrêmement faible pour que la prévision à 5 mn d'échéance fasse apparaître que les avions pourraient arriver en I non séparés à la fois en plan et en niveau. Par ailleurs, les informations dérivées du mode C permettent de déterminer le moment où l'avion cesse d'être en évolution verticale, donc de raffiner la prévision horizontale;

b) un avion n'est pas muni du mode C, on applique la même méthode; au moment d'une des itérations (deuxième principe) ou de l'émission d'un préavis radar le calculateur *suggère au contrôleur de demander en phonie à l'avion son niveau actuel*; ce dernier est entré dans le calculateur par le contrôleur. Dans le cas d'une itération il en est tenu compte pour l'itération éventuelle suivante, dans le cas d'un préavis radar ce dernier est maintenu ou effacé.

B. — Cas des avions colinéaires, de même sens, au même niveau.

Ce cas est voisin de celui des trajectoires sécantes, mais légèrement différent.

Soit deux avions entrant dans un secteur sur une même trajectoire, soit v_1 et v_2 leurs vitesses, δv_1 et δv_2 les erreurs maximales d'estimation de ces vitesses et soit Δt_e la séparation des avions à la balise d'entrée A du secteur (avion d'indice 1 supposé le premier entrant) (*fig. 4*).

L'hypothèse la plus défavorable est celle où l'erreur affectant la vitesse du premier avion est négative et celle du deuxième positive.

Le premier point de rattrapage possible que nous appellerons I_{\min} correspond à cette hypothèse.

Au moment où l'avion 2 passe en A, l'avion 1 est en A_1 tel que :

$$AA_1 = (v_1 - \delta v_1) \Delta t_e \neq v_1 \Delta t_e.$$

La vitesse relative des deux avions (vitesse de rapprochement) est .

On appellera $v_2 - v_1 = \Delta v_n$ différence de vitesses nominales et on supposera :

$$\delta v_1 = \delta v_2 = \delta v, \quad \delta v_1 + \delta v_2 = 1,4 \delta v,$$

d'où vitesse de rattrapage

$$\Delta v_{max} = \Delta v_n + 1,4 \delta v$$

Cette quantité peut être positive ou négative. Dans le deuxième cas, il n'y a pas de problème de contrôle.

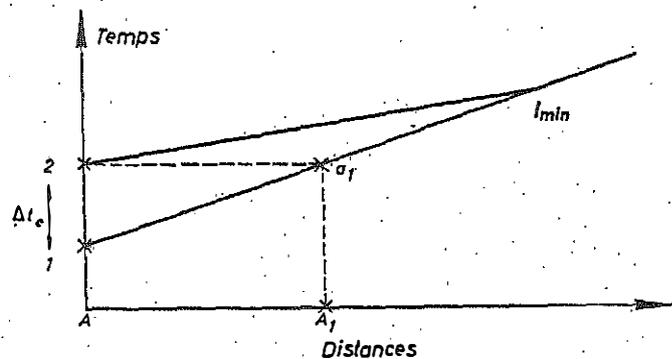


Fig. 4

Toujours dans les conditions extrêmes les plus défavorables on peut chercher dans combien de temps après le passage de l'avion 2 en A, les deux avions ne seront séparés que de 5 nautiques; soit t_a ce délai ($t_{a, \text{min}}$).

$$t_a = \frac{v_1 \Delta t_e - 5 \text{ nautiques}}{\Delta v_n + 1,4 \delta v} \quad \begin{array}{l} \text{vitesses en nautiques/mn,} \\ \text{temps en minutes.} \end{array}$$

Supposons qu'on veuille laisser au contrôleur radar un préavis de 5 mn pour agir, on déclenchera la préalarme au temps $t_{p.a.}$ après le passage de l'avion 2 en A.

$$t_{p.a.} = \frac{v_1 \Delta t_e - 5}{\Delta v_n + 1,4 \delta v} - 5$$

Les vitesses exprimées en nautiques/minute et $t_{p.a.}$ et t_e en minutes.

NOTE 1. — Dans les estimations de vitesses relatives, le vent n'intervient pas puisque, par hypothèse, les avions sont de même sens et de même niveau.

NOTE 2. — Dans ces calculs nous avons supposé que les heures de passage des avions 1 et 2 en A étaient des heures prélevées sur le SSR et imprimées sur le strip délivré au contrôleur.

Exemples.

a) Deux avions de même type (ou équivalent) en UIR et stabilisés en niveau.

Supposons que les avions soient séparés de 5 mn à l'entrée ($\Delta t_e = 5 \text{ mn}$).

Les vitesses sont supposées connues à $\pm 5 \%$ près max, soit :

$$\delta v = 22,5 \text{ nœuds} = 0,37 \text{ nautiques/mn,}$$

$$\Delta v_n = 0, \quad v_1 = 7,5 \text{ nautiques/mn,}$$

$$t_{p.a.} = 60 \text{ mn;}$$

pour $\delta v = 10 \%$ on trouverait de même :

$$t_{p.a.} = 21 \text{ mn.}$$

b) Cas DC.3 :

$$v_1 = 2,5 \text{ nautiques/mn,}$$

$$\delta v = 5 \text{ nœuds,}$$

$1,4 \delta v = 7 \text{ nœuds} = 0,1 \text{ nautique/mn, } \Delta t_e = 2,5 \text{ mn à l'entrée,}$

$$t_{p.a.} = \frac{6 - 5}{0,1} - 5 = 5 \text{ mn;}$$

pour 5 mn à l'entrée :

$$t_{p.a.} = 70 \text{ mn.}$$

Dans le cas où les vitesses nominales des deux avions ne sont pas égales, les mêmes types de calculs peuvent être effectués et conduisent à des conséquences comparables.

En fait, les choses sont encore plus favorables car, au bout de $\frac{t_{p.a.}}{2}$, par exemple, on peut pointer la position des avions, mesurer leurs vitesses sur le tronçon et en déduire un nouveau $t_{p.a.}$.

On remarquera que la méthode applicable est exactement la même que celle définie pour les trajectoires sécantes; à partir du moment où le point l_{min} a été calculé; ce point sera calculé à chacune des itérations (deuxième principe).

Un calcul approché montre qu'en acceptant les avions séparés à l'entrée de 2,5 mn et pour $\Delta \delta v = 10 \% V$ on a, *a priori*, moins de 2,5 chances sur 100 pour que l'avion derrière, supposé avoir la même vitesse nominale que l'avion devant, rattrape ce dernier avant 30 mn. Le nombre de pré-alarmer radar peut de même être calculé, il est très faible.

On s'explique ainsi que la surveillance radar par un opérateur d'un flot collinéaire d'avions impose une tâche importante. En effet, le préconflit (5 mn avant que les avions se rapprochent à moins de 5 nautiques) peut se manifester entre 8 mn après l'entrée des avions dans le secteur et ... *jamais* (pour 2,5 mn à l'entrée et $\pm 10 \%$ max sur les vitesses), c'est-à-dire que le contrôleur ne peut pas quitter chaque paire d'avions des yeux pendant toute la traversée du secteur : ce qui implique une charge trop lourde. Par ailleurs, le contrôleur est inapte à recalculer ses vols au vu de l'information radar ni en distance, ni en vitesse (il est bien évident que les reports de position entachés d'erreur de l'ordre de 1,5 mn n'apportent aucune contribution positive en la matière).

C. — Cas des avions collinéaires, de même sens, en évolution.

Ce cas dérive du cas précédent de la même manière que le cas des avions à trajectoire sécante et des avions en évolution dérive du même cas pour des avions stabilisés.

D. — Cas des avions collinéaires, de sens contraire, en évolution.

Ce cas présente une singularité par rapport aux autres cas d'avions en évolution par le fait :

— que les vitesses de rapprochement sont égales à la somme des vitesses et non pas à une des vitesses ou la différence des vitesses;

— le nombre d'avions-problèmes est beaucoup plus considérable, toutes choses égales par ailleurs ($K = 1$ pour tous les avions de sens inverse sur la même route).

C'est pourquoi il y a le plus grand intérêt à aménager l'infrastructure de telle manière que des sens uniques soient ménagés autant que possible sur les grands axes de trafic.

Dans le cas contraire, la méthode proposée reste applicable sous réserve qu'elle soit traitée à la fois en plan et en niveau. La fréquence des échantillonnages en plan et des demandes aux contrôleurs d'acquiescer par phonie le niveau actuel de l'avion sera ajustée aux circonstances par le calculateur (1).

(1) Le nombre de préavis de conflit radar dépend de l'intensité des trafics, mais doit cependant être relativement faible en raison de la faible probabilité pour chaque paire d'avions-

Dans le cas du mode C, le problème trouve évidemment une solution aisée, les extrapolations de chaque itération se faisant à la fois en plan et en niveau.

STABILITÉ DE LA SITUATION

Sous réserve que l'action d'évitement radar effectuée par le contrôleur radar ne perturbe pas significativement la situation (ce point sera étudié ultérieurement), cette dernière, supposée stable à l'entrée de chaque avion, reste stable par la suite.

Il convient, cependant, de prendre en considération les conséquences des cas où l'avion entrant ne peut pas être pris en compte tel qu'il est proposé par le secteur précédent. Deux cas peuvent se produire :

a) une autorisation provisoire (limitée en niveau) est donnée à l'avion; dans ce cas, le calculateur recherchera ultérieurement en permanence le moment où l'autorisation définitive pourra être accordée à l'avion et la proposera à ce moment au contrôleur;

b) il est nécessaire d'agir sur l'autorisation d'un autre avion déjà en compte dans le secteur recevant. Dans ce cas, le calculateur devra traiter cet autre avion et sa nouvelle autorisation comme il traite un avion entrant avant de proposer ou d'accepter une décision.

La situation reste donc stable.

On notera de plus que, dans la mesure où la saturation de l'espace n'est pas considérable, il est vraisemblablement possible de ne traiter les problèmes qu'en plan (sauf, bien entendu, le cas des avions collinéaires de sens inverse en évolution) de sorte que les modifications de l'autorisation en cours de vol agiront très peu sur la stabilité des dispositions déjà prises (notamment sur la probabilité de charge du contrôleur radar); autrement dit, on pourra envisager l'application du premier principe modifié indépendamment du niveau et ne faire intervenir ce dernier qu'à chaque itération de la mise en œuvre du deuxième principe; en procédant ainsi on est certain, au moment de l'entrée de chaque avion dans un secteur, de surévaluer le nombre n_R de conflits radar susceptibles de se produire ultérieurement.

SÉCURITÉ

Le problème de la sécurité en cas de panne de calculateur sera traité avec précision ultérieurement. On procédera cependant, ci-dessous, à une évaluation sommaire :

Il existe deux conséquences des pannes :

a) elles imposent de revenir à des méthodes de contrôle classique pendant la durée de la panne. Cette conséquence n'est pas très grave.

d'une durée excédant quelques minutes; pendant ce temps on prendra des mesures conservatoires;

b) elles ne permettent pas de terminer les « actions engagées » (en particulier, les surveillances radar découlant de la méthode préconisée lorsque la séparation appliquée à l'entrée d'un secteur a été inférieure à la séparation standard aux procédures). Dans ce cas, si l'on suppose que les contrôleurs laissent ces « actions engagées » se dérouler sans intervenir pendant la durée de la traversée de leur secteur par les avions concernés, la probabilité d'accident réel peut être calculée. En effet, la probabilité de perte de séparation radar a été réglée à l'entrée des avions dans le secteur à un seuil très faible. La probabilité de collision effective des avions qui risque de résulter ultérieurement d'une perte de séparation radar non résolue est extrêmement faible.

Soit, en effet :

- N le nombre d'avions en compte au moment de la panne;
- $NP_{\bar{r}}$ le nombre d'actions engagées;
- $NP_{c.r.}$ le nombre d'actions engagées qui exigeraient une action d'évitement du contrôleur radar;
- N_f le nombre de pannes du « filtre radar » par an (T_s la durée de la panne);
- P_n la probabilité pour que deux avions au même niveau nominal et non séparés par ailleurs entrent en collision malgré la dispersion verticale;
- $P_{lat.}$ *idem* pour la probabilité pour deux avions sur la même route nominale et non séparés par ailleurs (dispersion latérale);
- $P_{long.}$ la probabilité pour qu'une paire d'avions-problèmes (sortant du « filtre radar ») perdent effectivement toute séparation longitudinale si aucune intervention radar n'est effectuée.

Un calcul sommaire basé sur une estimation approchée des valeurs des probabilités ci-dessus montre que pour chaque panne intempestive de la fonction surveillance radar automatique (filtre radar), l'ordre de grandeur de la probabilité d'accident semble être faible, même si aucune action d'évitement n'est entreprise par les contrôleurs radar après le début de la panne; cette probabilité totale P_T peut être calculée avec précision.

On peut déduire le nombre N_f de pannes intempestives du calculateur admissible par an. Le produit $N_f \cdot P_T$ doit, en effet, être tel que la contribution du centre de contrôle considéré à l'insécurité des vols qu'il contrôle pendant cette même période d'un an soit négligeable devant les autres sources d'insécurité des vols. C'est ainsi que pour un Centre contrôlant, par exemple, 500 000 mouvements par an, on pourrait sur ces bases accepter une probabilité de 1 chance sur 400 de collisions par an, soit :

$$NP_{c.r.} \times N_f \times P_n \times P_{lat.} \times P_{long.} = \frac{1}{400}$$

Le problème des pannes, en cas d'automatisation, peut donc se traiter « objectivement » et les contraintes draconiennes couramment spécifiées en la matière semblent avoir été fixées *a priori*.

Il résulte aussi de ces considérations que la structure du système d'automatisation (comprenant le ou les calculateurs et les matériels périphériques) doit être soigneusement étudiée en relation avec les objectifs de sécurité de chaque fonction.

RÉSUMÉ

La méthode proposée a été dénommée « Méthode des Filtres » car elle se caractérise par un filtrage successif du trafic dans :

— un premier filtre, non décrit ci-dessus, agissant d'une manière purement qualitative pour prévoir la surcharge future éventuelle du Centre ou de chaque secteur afin de pouvoir agir en conséquence et en temps utile (régulation du débit et utilisation optimale de l'effectif);

— un « filtre aux procédures », dont les caractéristiques sont adaptées en temps réel pour « alimenter » d'une manière optimale le contrôleur radar;

— un « filtre radar », destiné à extraire en temps réel, de la sortie du filtre précédent, les paires d'avions justiciables d'un « évitement radar »;

— un « filtre accident », dont la « sortie » doit être maintenue à un niveau extrêmement faible, fixé à l'avance, par l'ensemble des dispositions prises (agencement des matériels et procédures). L'action des trois filtres précédents agissant ensuite automatiquement à cet effet.

L'étude ci-dessus fait bien apparaître ce que l'on sentait intuitivement, à savoir que particulièrement en UMR l'espace est plus saturé par les conséquences de la méthode de contrôle manuelle que par la présence des avions qui le sillonnent !

Des études et expérimentations en cours permettront de fixer d'une manière plus précise les valeurs à donner aux paramètres, les procédures de détail sur le plan opérationnel et la structure et la programmation du système correspondant.

