

**Simulation arithmétique
et optimisation de la structure des zones de qualification**

Benoît Rulleau¹

Free Flight Program, Metrics team
Federal Aviation Administration
Washington

Laboratoire d'Optimisation Globale
Centre d'Études de la Navigation Aérienne
Toulouse

18 septembre 2003

¹École Nationale de l'Aviation Civile, France. email : benoit.rulleau@polytechnique.org

Résumé

J'ai effectué mon stage au sein du Laboratoire d'Optimisation Globale (LOG) à l'ENAC. Le but de mon stage était dans un premier temps d'adapter un simulateur arithmétique de trafic aérien, nommé CATS (Complete Air Traffic Simulator), aux données de trafic américain, puis d'utiliser cet outil pour optimiser l'organisation des zones de qualification dans les espaces français, européen et américain.

Jean-Marc Alliot est à l'origine de ce projet. Depuis longtemps il souhaitait étendre le champs de travail de CATS aux ciels européens et américains, afin de pouvoir les comparer avec des données de base similaires. L'adaptation nécessaire pour les données européennes a été faite au LOG à l'automne 2002. Ce travail était assez simple car les données européennes sont directement disponibles via Eurocontrol et ne diffèrent pas fondamentalement des données françaises. En revanche, obtenir les données américaines nécessitait de définir un projet commun avec la FAA et de se rendre sur place.

Avant de m'envoler pour Washington, j'ai eu quelques mois pour découvrir CATS, ainsi que le langage dans lequel il est écrit, Objective Caml, un produit de l'INRIA.

Plutôt que d'utiliser les données brutes de la FAA, beaucoup trop complètes et donc surchargées d'informations superflues, j'ai emprunté à la NASA des fichiers qu'ils ont compilés pour leur propre simulateur de trafic nommé FACET. Ces fichiers comportent des données d'espace aérien (secteurs, centres), des fichiers d'infrastructure (aéroports, balises, routes aériennes), et des listes de plans de vol.

L'adaptation de CATS est le sujet du chapitre 2. Tout d'abord il m'a fallu adapter les modèles de performance avion en écrivant un fichier de synonymes comme décrit dans la section 2.2. Puis je suis passé à la lecture des plans vols et des infrastructures. La lecture des fichiers proprement dite n'est pas bien difficile, mais les données comportent des erreurs qu'il faut corriger, et surtout il a fallu beaucoup travailler sur le filtrage des routes suivies par les avions (section 2.3). J'ai ensuite effectué la lecture des données d'espace (section 2.4), qui montre, comme pour l'Europe d'ailleurs, de sérieuses faiblesses au niveau de la description. Enfin j'ai donné des capacités aux aéroports au sein du simulateur, en terme de nombre de décollages et d'atterrissage autorisés par heure, afin d'égréner les départs qui sinon seraient agglutinés par paquets toutes les 15 minutes, ce qui nuierait à la justesse des simulations (section 2.5). Finalement, la comparaison des résultats de simulation sur les trafic européen et américain (section 2.6) a permis de valider le travail d'adaptation effectué.

Parallèlement à toutes ces tâches qui ressemblaient plus à du support qu'à de la recherche, j'ai travaillé sur la partie véritablement créative de mon stage, l'optimisation des zones de qualification. Je me suis d'abord intéressé aux algorithmes d'optimisation stochastique (chapitre 3), afin de maîtriser les outils nécessaires à la réalisation de mon travail. J'ai ensuite optimisé les zones de qualification (chapitre 4) en commençant par modéliser le problème (section 4.2), avant de me lancer dans l'application pratique (sections suivantes).

Acknowledgements

I would like to thank Dave Knorr for his always good mood and the perfect management of our working relationship, and all the metrics team, especially Joe Post, James Bonn, Ed Freeman, Mike Bennett, and Dan Murphy who were all very friendly and supportive.

Remerciements

Merci beaucoup à Jean-Marc Alliot pour m'avoir proposé ce stage qui m'allait à merveille et son aide tout au long de celui-ci, à Jean-Marc Pomeret sans qui de visa il n'y aurait point eu et pour sa visite à Washington, et à Frédéric Médioni pour l'attention portée à mon travail. Un énorme merci à Géraud Granger et Pascal Brisset pour leur aide de tous les instants. Merci aussi à Nicolas Archambault pour son accueil et son support dans le rush final. Et merci enfin à mon épouse, Etsuko, pour ses sourires et ses petits plats.

Table des matières

1	Initiation au contrôle aérien	7
1.1	Introduction	7
1.2	Généralités	7
1.2.1	Navigation	7
1.2.2	Plans de vol	8
1.2.3	Normes de séparation et conflits	8
1.2.4	Secteurs et niveaux de vol	9
1.3	Le contrôle du trafic aérien	10
1.4	La gestion des flux	10
2	Adaptation du simulateur CATS	13
2.1	Présentation du simulateur	13
2.2	BADA et synonymes	14
2.2.1	Problématique	14
2.2.2	Une tâche laborieuse	14
2.2.3	Résultat	14
2.3	Lecture des plans de vol américains	15
2.3.1	Environnement de l'étude	15
2.3.2	Les données	15
2.3.3	Le traitement des routes	16
2.3.4	Lecture sur deux journées GMT	19
2.4	Lecture de la sectorisation américaine	19
2.4.1	Lecture des secteurs	19
2.4.2	Visualisation des secteurs lus	19
2.5	Créneaux de décollage et pré-régulation	21
2.6	Comparaisons entre Europe et États-Unis	22
2.6.1	Les hypothèses de simulation	22
2.6.2	Analyse des résultats	23
2.7	Conclusion	24
3	Algorithmes d'optimisation stochastique	27
3.1	Algorithmes génétiques	27
3.1.1	principes généraux	27
3.1.2	Utilisation d'un codage et d'opérateurs spécialisés	28
3.2	le recuit simulé	29

4	Optimisation du découpage de l'espace aérien	31
4.1	Principes généraux	31
4.1.1	Le découpage de l'espace en secteurs	31
4.1.2	La notion de zones de qualification	32
4.1.3	Les centres de contrôle	32
4.2	Modélisation	33
4.2.1	Introduction	33
4.2.2	Types d'avions	33
4.2.3	calcul des flux	33
4.2.4	Critère à optimiser	35
4.3	Résultats sur la France	35
4.3.1	Introduction	35
4.3.2	Algorithmes	36
4.3.3	Les résultats	36
4.4	Résultats pour l'Europe	44
4.4.1	Introduction	44
4.4.2	Algorithmes	44
4.4.3	Résultats	44
4.5	La tentative pour les États-Unis	45
4.6	Conclusion	45

Chapitre 1

Initiation au contrôle aérien

1.1 Introduction

Au cours des dernières années, le nombre de vols contrôlés n'a cessé de croître dans des proportions très importantes. Même si les crises traversées récemment ont entraîné un ralentissement de cette évolution, ce ralentissement n'est que provisoire, comme le montre l'étude [Mar02].

Dans ce contexte la gestion du trafic aérien s'est lentement organisée, pour se diviser aujourd'hui en trois grands modules : la gestion des espaces, la gestion des flux et le contrôle du trafic.

1.2 Généralités

1.2.1 Navigation

Pour aller d'un aéroport à un autre, un aéronef volant dans un espace contrôlé doit suivre une *route aérienne*. Il s'agit de segments de droites reliant des points de report (waypoints). La figure 1.1 montre deux exemples de route. Le premier (Victor Airway Route) correspond à l'ancien modèle de route : les points de report (petits cercles) sont des balises de radio-navigation qui existent physiquement au sol et sur lesquels les avions se repèrent grâce à leurs moyens de radio-navigation (VOR, TACAN, etc). Les chiffres indiqués dans les encadrés (109.2 par exemple) correspondent aux fréquences d'émission de ces balises. Pour des raisons d'ordre topographiques, militaires, ou simplement électromagnétiques, il est impossible de positionner ces balises n'importe où. De plus les routes elles-mêmes ne peuvent passer partout (respect en particulier des zones militaires), d'où leur aspect parfois tourmenté.

Le second exemple montre un exemple de route rendu possible par l'évolution des moyens de radio-navigation embarqués. Les points de report (Waypoint1, etc) indiqués par des petits losanges sont purement fictifs, mais les systèmes de gestion de vol (Flight Management System, ou FMS¹) des nouveaux avions sont aujourd'hui parfaitement capables de les suivre. Ils utilisent pour cela les relèvements de plusieurs balises de

¹Le Flight Management System est le calculateur principal des avions modernes. Il centralise l'ensemble des informations sur l'avion et assure la navigation des appareils en fonction des moyens de repérage disponibles, permet d'optimiser les vitesses et niveaux de croisière en fonction de paramètres météorologiques et économiques, et peut envoyer aux pilotes automatiques et aux régulations moteur toutes les informations nécessaires à l'exécution du plan de vol.

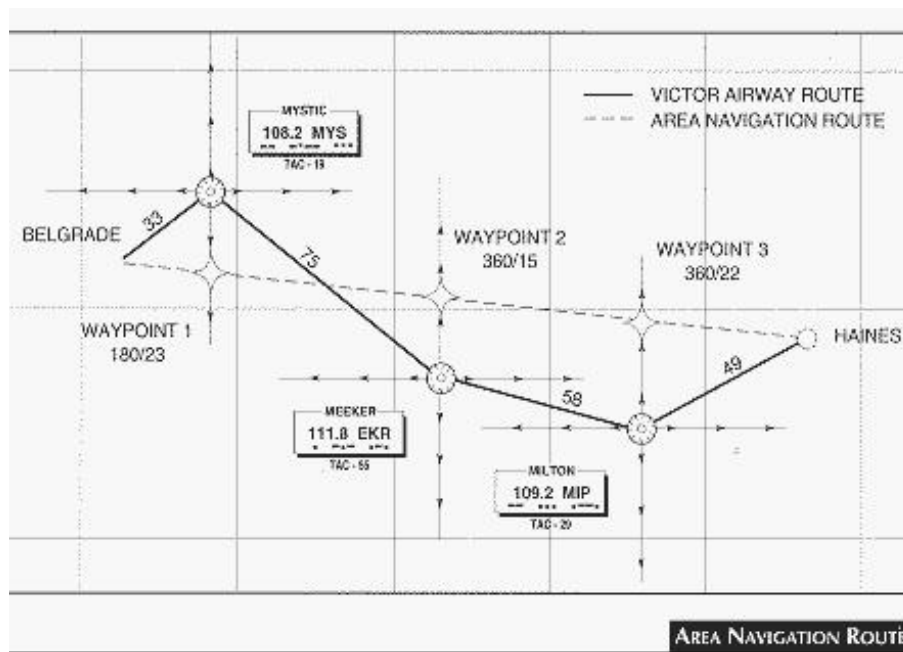


FIG. 1.1 – Routes et waypoints

radio-navigation, et peuvent également les combiner avec d'autres moyens de navigation comme les plates-formes inertielle ou la navigation par satellite (GPS). On appelle ce mode de navigation Area Navigation Route, ou RNAV. Il permet de dessiner le réseau de routes sans la contrainte des positions des réelles des balises, et ouvre des perspectives très importantes pour la redéfinition de l'espace aérien.

1.2.2 Plans de vol

Avant un vol IFR (vol aux instruments) le pilote doit impérativement déposer un plan de vol. Ceci est facultatif pour la plupart des vols VFR (vol à vue). Il s'agit d'un document remis aux autorités chargées de la gestion de l'espace. Il contient les informations fondamentales relatives au vol comme l'heure de départ, le niveau de vol demandé pour la croisière ou la route prévue. Ces informations sont utilisées pour assurer le contrôle aérien, informer les pilotes en vol, et donner l'alerte lorsqu'un avion n'arrive pas au terme de son plan de vol.

1.2.3 Normes de séparation et conflits

Afin d'éviter les abordages, les avions doivent toujours garder entre eux une certaine distance de sécurité. Cette distance est de 5 à 7 miles nautiques dans le plan horizontal et de 1000 ou 2000 pieds verticalement, selon les espaces traversés. Deux avions respectent la norme de séparation tant que la distance les séparant est supérieure à la distance minimale de séparation horizontalement *ou* verticalement. Il y a perte de séparation quand au contraire deux avions sont à une distance l'un de l'autre à la fois en-dessous des normes horizontale et verticale.

La principale mission des contrôleurs consiste à faire respecter cette séparation. Pour un contrôleur aérien, deux avions sont en *conflit* quand ils *risquent* de perdre leur

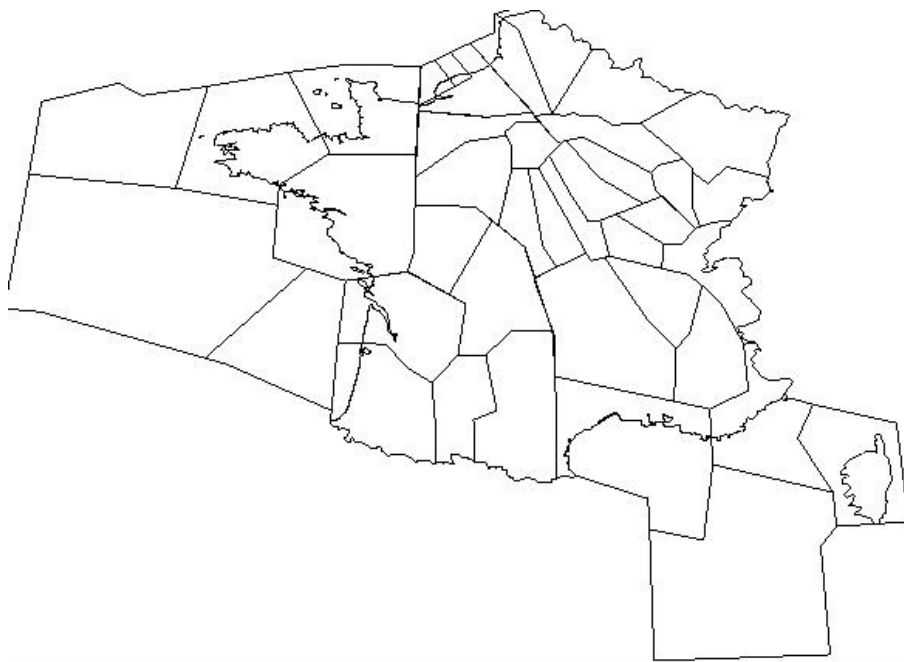


FIG. 1.2 – Secteurs de l'espace supérieur français

séparation, car il doit alors prendre des mesures afin de se prémunir d'une perte réelle de séparation. Nous utilisons avec notre simulateur de trafic d'autres définitions. Nous parlons de *conflit réel* lorsque deux avions sont effectivement passés en-dessous des minima de séparation. Nous sommes aussi amenés à compter les *conflits potentiels*, calculés par des projections des trajectoires sur 8 ou 12 minutes avec des incertitudes sur les performances et les comportements des avions. Nos conflits potentiels se rapprochent de la définition de conflit donnée par les contrôleurs.

1.2.4 Secteurs et niveaux de vol

Pour faciliter le travail des contrôleurs, les avions se fixent, lorsqu'ils sont stables, sur des *niveaux de vol* : un avion volera par exemple à 31000 pieds (niveau de vol FL310) mais pas à 31700 pieds. Les niveaux de vol standards sont séparés de 1000 pieds dans toute l'Europe depuis le passage à la RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum), et de 1000 ou 2000 pieds aux États-Unis (2000 pieds à partir du niveau 290).

L'espace aérien contrôlé est découpé en volumes, appelés *secteurs de contrôle*. Pour donner un ordre de grandeur, un secteur a une taille d'environ 150 km dans ses dimensions horizontales et contient une dizaine de niveaux de vol (une droite verticale partant du sol traverse de deux à quatre secteurs). La figure 1.2 montre la projection 2D du découpage de l'espace supérieur aérien français. Chacun de ces secteurs est laissé à la charge d'une équipe de contrôleurs (deux en général) qui sont chargés d'assurer la sécurité du trafic dans l'espace qui leur est confié.

1.3 Le contrôle du trafic aérien

La définition du contrôle du trafic aérien en France est la suivante :

Le but premier du contrôle est d'assurer la sécurité du trafic, puis d'optimiser les flux de trafic.

La mission première reste donc la sécurité, la notion de capacité n'intervenant qu'ensuite.

Le contrôle aérien peut être divisé en trois catégories :

Le contrôle au sol : il s'agit du contrôle des aéronefs sur les plates-formes aéroportuaires (roulage, etc). Nous n'en parlerons pas ici.

Le contrôle d'approche : il s'agit du contrôle autour des plates-formes aéroportuaires. Le contrôle d'approche fait appel à des techniques spécifiques, essentiellement orientées vers le séquençement des avions. En raison de la vitesse plus réduite des avions, les contrôleurs d'approche peuvent employer des techniques de contrôle plus souples. Nous ne nous sommes pas intéressés spécifiquement au contrôle d'approche lors de notre travail.

Le contrôle en route : il s'agit du contrôle hors zone d'approche. C'est celui qui nous intéresse directement.

Les contrôleurs en route sont regroupés dans des centres de contrôle (5 centres pour la France, 22 aux États-Unis). Chacun de ces centres contrôle plusieurs secteurs. En Europe, deux contrôleurs sont en charge du trafic dans un secteur.

Le travail des contrôleurs est différencié. Le *contrôleur organique* s'occupe principalement de la gestion du trafic à moyen terme. Pour ce faire, il dispose de petites bandes de papier (appelées «strips»), une par avion appelé à traverser son secteur, qui contiennent les informations nécessaires sur l'avion. Les strips sont données au contrôleur une dizaine de minutes avant l'arrivée de l'avion dans son secteur. Le contrôleur organique gère également l'interface avec le contrôleur du secteur précédent et celui du secteur suivant, pour assurer une bonne transmission des avions. Le contrôleur tactique doit quant à lui assurer la gestion à court terme du trafic, et en particulier la séparation des aéronefs. C'est lui qui parle sur la fréquence radio attribuée au secteur.

En Europe les deux contrôleurs partagent la responsabilité du contrôle. Aux États-Unis, le contrôleur tactique, appelé *A-man* est responsable de la position de contrôle, et il n'est pas rare de le voir épaulé par un second contrôleur tactique, portant ainsi à 3 le nombre de contrôleurs par position.

1.4 La gestion des flux

Les aéronefs peuvent assez librement déposer leurs plans de vol et choisir leurs itinéraires. Que se passe-t-il si tous les avions veulent passer au même endroit au même moment ? En effet, la capacité de contrôle est limitée : à travers un même secteur on ne peut faire passer qu'un certain nombre d'avions par heure. Si plus d'avions veulent passer, et que rien n'est fait, alors le risque de collision augmente fortement. Le contrôleur n'est plus à même de gérer tous les avions et de garantir qu'il n'y aura pas d'accident. Il faut trouver des méthodes qui vont nous assurer que jamais une telle situation ne se produira. On appelle cela la gestion des flux (Air Traffic Flow Management ou ATFM).

A cause de la vitesse des avions et de la complexité du trafic, la gestion des arrivées sur une grande plate-forme comme Paris-CDG nécessite maintenant des mesures qui s'appliquent dès la Belgique. On ne peut plus concevoir de gérer les flux d'avions à l'échelle de pays de la taille des états européens, et de ce côté de l'Atlantique la

gestion du trafic aérien prend une dimension communautaire. L'agence Eurocontrol a pour but de servir le développement du trafic aérien en Europe, d'assurer sa sécurité, sa fluidité et de développer des solutions aux problèmes communs. La CFMU (Central Flow Management Unit) est l'organe d'Eurocontrol en charge de l'ATFM.

Aujourd'hui, nous avons en Europe deux systèmes opérationnels indépendants de gestion des flux.

- Sur les principaux aéroports, l'autorité aéroportuaire limite le nombre de décollage programmés par heure, pour garder ce nombre en-dessous de la capacité de piste. Cette restriction s'impose dès le dépôt de leurs programmes par les compagnies aériennes, 6 mois à l'avance. On parle de *créneaux de décollage*. Des commissions réunissant l'autorité aéroportuaire et les compagnies aériennes décident de la répartition des créneaux entre les compagnies qui en font la demande.
- 48 heures avant les vols, la CFMU essaye de prévoir le nombre d'avions qui seront dans chacun des secteurs européens tout au long de la journée. Lorsque ce nombre dépasse des quotas fixés (une quinzaine d'avions par secteur), la CFMU retarde une partie des avions concernés. Pour cela elle attribue elle aussi des créneaux de décollage, appelés *créneaux CFMU*.

Nous ne décrivons pas plus en détail ici ces deux mécanismes très complexes. Le lecteur pourra se référer à l'article [BB00].

Chapitre 2

Adaptation du simulateur CATS

2.1 Présentation du simulateur

CATS est un moteur de simulateur de trafic, qui permet de faire des mesures liées à la complexité du trafic, et de tester de nouveaux concepts de contrôle et de régulation. Parti d'un petit noyau écrit par Jean-Marc Alliot il y a dix ans, il est maintenant le produit de plusieurs générations de chercheurs et de doctorants. Il fait l'objet de nombreux articles ([DAN96], [ABDM97], [DAM00], [Cha01], [AGP02]), ainsi que de thèses et de DEA ([Dur96], [Méd98], [Rog00]).

CATS est un programme d'une dizaine de milliers de lignes de code qui travaille sur un domaine très complexe. C'est un simulateur assez complet et surtout très juste. Il fonctionne en temps discrétisé, et évalue à chaque pas de temps la position et la vitesse de chaque avion. Deux processus appelés *P1* et *P2* font voler les avions :

- *P1* fait voler les avions et les déplace sur la durée totale de la simulation.
- *P2* effectue des prévisions de trajectoires sur des portions de la simulation. Ces prévisions de trajectoires sont ensuite utilisées pour résoudre les conflits potentiels.

Notons que, contrairement à nombre de simulateurs effectuant de la résolution, *P1* et *P2* n'utilisent pas les mêmes modèles de vol, afin de garantir une certaine adéquation avec la réalité (il est très facile de résoudre un conflit quand la prévision de trajectoire cadre exactement avec la trajectoire qui sera effectivement suivie...).

Comparé à FACET, le produit de la NASA similaire au nôtre écrit par une cinquantaine d'ingénieurs depuis 3 ans, CATS se montre plus réaliste, pour les raisons données au paragraphe précédent. Il représente plus fidèlement les problèmes auxquels font face les contrôleurs.

CATS devenant de plus en plus gros, il a petit à petit été scindé en plusieurs bibliothèques (géographie, plans de vol, etc). Ces bibliothèques ne sont pas toujours bien articulées entre elles, leurs interfaces étant définies a posteriori d'après ce qui existait avant scission, et non pas selon un cahier des charges défini à l'avance.

La bibliothèque géographique ayant été écrite pour la France, beaucoup de calculs fait en coordonnées locales (stéréographiques) devenaient faux aux États-Unis. De plus l'utilisation de longitudes supérieures d'un ordre de grandeur à celles trouvées en France entraînait un dépassement de *max_int* dans les calculs. J'ai corrigé ces deux bugs, mais pour bien faire cette bibliothèque mériterait d'être entièrement repensée. Les autres adaptations "de fond" que j'ai effectuée sont décrites dans les sections 2.2 et 2.5.

En ce qui concerne la lecture des données proprement dite, j'ai ajouté un nouveau module (pour les données américaines) aux deux modules déjà existants (données

françaises et européennes). Ce travail est expliqué dans les parties 2.3 et 2.4.

2.2 BADA et synonymes

2.2.1 Problématique

CATS utilise les tableaux de performance avion distribués par Eurocontrol et nommés BADA (Base of Aircraft DATA) pour faire voler les avions selon des caractéristiques de vitesse, de taux de montée ou de descente, de consommation en carburant, etc. conformes à la réalité. 71 avions sont modélisés directement par BADA. BADA donne aussi une liste de 116 avions qui peuvent être approchés par un des 71 modèles, c'est ce qu'on appelle la liste des synonymes officiels. Par exemple BADA adresse la famille des Boeing 737 par 3 modèles, un pour le B737-200, un pour le B737-300 et un pour le B737-800. BADA donne pour les 5 autres membres de cette famille des synonymes, par exemple le B737-100 est assimilé au B737-200 et le B737-400 est assimilé au B737-300.

Mais hélas la liste des synonymes officiels est de très loin insuffisante, et ce pour trois raisons. Premièrement il y a beaucoup plus de types d'avions que les 71+116 couverts par BADA. Deuxièmement la nomenclature des types avions éditée par l'OACI évolue régulièrement et il faut toujours un certain temps pour que tous les acteurs du système adoptent la dernière version, il est donc indispensable de savoir identifier les avions selon les normes présentes et passées. Et troisièmement les types avions donnés dans les plans de vol ne respectent pas toujours la norme officielle OACI, ni la nouvelle ni l'ancienne. Ce troisième point est vrai surtout pour les petits avions, pour lesquels les plans de vol sont remplis à la main par des pilotes amateurs, mais parfois aussi pour les plans de vol des avions de ligne, qui utilisent des types avions légèrement modifiés qu'un contrôleur saura reconnaître mais qui sera inconnu dans le fichier des synonymes.

Lorsque CATS ne reconnaît pas un type avion, il attribue automatiquement le type avion par défaut, l'A320. L'ancienne version de notre liste de synonymes laissait environ 5% de types inconnus parmi les plans de vols français, ce qui est acceptable, d'autant plus qu'en France nous avons peu de "petits" avions volant sous plan de vol, donc l'A320 n'est jamais une très mauvaise approximation. Avec la lecture des plans de vols européens, le taux d'avions non reconnus est passé à un tiers environ. Et pour les plans de vols américains, il est monté à la moitié. Cela n'était pas acceptable.

2.2.2 Une tâche laborieuse

Ma première tâche à Washington fut donc de mettre à jour la liste des synonymes afin de reconnaître les types avions donnés dans les plans de vol américains. J'en ai profité pour faire évoluer CATS de BADA 3.1 à BADA 3.3. Cette transition était nécessaire car la dernière version de BADA apporte 2 modèles de plus que la précédente et modifie quelque peu la liste des synonymes officiels, mais surtout utilise les types avion de la dernière norme OACI. Créer la nouvelle liste de synonymes a été un travail de fourmi. Cette tâche était indispensable, ne pouvait pas être automatisée, et s'est révélée extrêmement longue à réaliser.

2.2.3 Résultat

Il est impossible d'évaluer la qualité de la liste de synonymes créée. Le seul indicateur que l'on ait est le taux d'avions non reconnus.

La liste finale de synonymes comporte plus de 1100 entrées. Avec elle seulement une centaine des 40000 vols d'une journée de trafic ne sont pas reconnus.

2.3 Lecture des plans de vol américains

2.3.1 Environnement de l'étude

Lire des plans de vol consiste à donner à CATS une liste d'avions avec route, heure de départ, aéroports de départ et d'arrivée, type avion, et quelques autres caractéristiques. Cette liste doit bien évidemment être la plus "propre" possible. Il faut aussi donner à CATS les positions des aéroports et des balises utilisées pour décrire ces plans de vol.

2.3.2 Les données

Les plans de vols

Les fichiers de plans de vol consistent en des listes, par journée GMT, de tous les plans de vol déposés auprès de la FAA par les compagnies aériennes (Carrier et Fret), l'US Air Force (Military), des institutions comme la météo par exemple (Other), et les pilotes privés (General, air Taxi). Il y a environ 74000 plans de vol par journée. Inévitablement, vu la diversité d'origine des plans de vol, ces listes sont bourrées d'erreurs et d'inhomogénéités.

Les compagnies aériennes fournissent les plans de vols les plus propres, car pour elles ce processus est automatisé. Par souci d'exactitude, elles vont parfois corriger des plans de vols déjà déposés, s'ils comportent des erreurs ou en cas de modification de dernière minute due aux conditions météorologiques ou à un changement de programmation par exemple. Mais dans le système informatique qui gère les plans de vols, les corrections ne sont pas possibles. Ainsi, en cas de modification, les compagnies émettent un second plan de vol qui annule et remplace le premier. Cette révision, émise manuellement, n'est en général pas aussi respectueuse des normes que l'original. De plus la première version reste dans la base de données. Notre algorithme de lecture doit donc détecter si des lignes ont le même numéro de plan de vol, et dans ce cas choisir le second à condition que celui-ci soit suffisamment propre. Dans le cas contraire, on gardera l'original.

Les militaires émettent des plans de vol selon deux formats : le format civil pour les vols de transport par exemple, et un format propre (dans lequel le codage de la route est différent) pour les vols des avions d'armes. Les plans au format civil ne posent pas de problème particulier. Par contre le format militaire n'est pas compréhensible avec les informations dont je disposais, et de toute façon ces vols ont lieu dans des espaces militaires réservés et n'intéressent donc pas notre étude. Ces plans de vol sont rejetés de manière naturelle à cause des erreurs produites (aéroports inconnus, field10 pair, ou moins de 70% de balises connues).

Les plans de vols de la catégorie O (Other) sont très rares, et souvent surprenants. Parfois ils affichent des vols de plus de 24 heures, d'autres volent bien au-delà de la tropopause. Ces vols sont souvent circulaires (i.e. les aéroports de départ et d'arrivée sont les mêmes) et nous posent donc des problèmes en route directe. Par souci de simplicité, et pour ne pas faire voler de ballon-sonde selon les performances d'un A320, nous éliminons tous ces vols dans notre étude.

Enfin, les vols privés sont les plus variés. Cette catégorie englobe beaucoup de familles de pilotes et beaucoup de types d'avions. Leurs plans de vols sont truffés

de coquilles, allant de l'erreur de saisie dans le nom d'une balise au type avion hors normes. Mais aux États-Unis les vols privés représentent une grande proportion des vols journaliers, en partie parce qu'il y a plus de vols privés qu'en Europe, mais aussi parce que les américains déposent un plan de vol dans des situations où un européen se serait abstenu (vols courts, bas, en VFR...)

Les autres données

La lecture des aéroports, des balises et des airways se fait en même temps que celle des plans de vols. Car, même si ce sont des données géographiques et se rapprochent par ce fait plus de la sectorisation, ces points de repères ne sont utiles qu'aux plans de vol. La lecture proprement dite de ces données ne présente pas d'intérêt, puisqu'il s'agit simplement de parsing, et nous ne rentrerons donc pas dans le détail.

2.3.3 Le traitement des routes

Pourquoi faut-il travailler les routes ?

Après la lecture des plans de vols bruts et le traitement des erreurs primaires décrites ci-dessus, le plus dur reste à faire : il faut traiter la route pour en faire une liste de balises. La route dans les plans de vols américains est donnée sous le format :

départ.airway.balise.airway.balise..balise..arrivée, appelé 'field10', où :

- Le nombre de points (":") doit impérativement être pair !
- *départ* et *arrivée* doivent correspondre aux aéroports indiqués dans des champs prévus à cet effet, avec toutefois une subtilité : aussi bien dans le fichier "Airports" que dans les plans de vols, les aéroports sont désignés parfois par leur code OACI, parfois par leur code américain, selon le gré des utilisateurs. Par exemple KJFK et JFK sont les codes OACI et américain pour le même aéroport New-Yorkais.
- Les airways peuvent être des routes de croisière ou bien des SID et des STAR (départ et approche des aéroports). Si *field10=balise1.airway.balise2*, normalement *balise1* et *balise2* doivent figurer dans la description de l'airway et on suivra cette airway entre ces deux balises.

Le traitement de la route consiste à :

- remplacer les codes aéroports farfelus par ceux de la norme OACI,
- remplacer les airways par la liste ad hoc de balises,
- et surtout couper la route pour les vols en provenance ou à destination de l'extérieur de l'espace modélisé, et le cas échéant estimer l'heure d'arrivée dans notre espace.

La deuxième étape, la lecture des airways, fut un exercice très intéressant. Lorsqu'on lit une airway à la recherche des deux balises encadrantes pour le vol en question, on n'est sûr ni de la présence des balises dans la liste (car il y a des erreurs), ni du bon sens de parcours de la liste (car les airways sont presque toutes à double sens de circulation). Un algorithme d'une dizaine de lignes résout ce problème de manière très satisfaisante. La troisième étape fait l'objet de la suite de ce paragraphe.

L'espace américain

Le traitement des vols en provenance ou à destination de l'extérieur de l'espace modélisé est très complexe, à tel point que tout le monde, aussi bien au LOG que dans mon bureau à Washington, me conseillait de négliger ces vols.

Tout d'abord il faut commencer par définir quel est l'espace modélisé. Cet espace doit de préférence être convexe pour qu'un vol ayant son départ et son arrivée dans l'espace ne quitte pas l'espace (on admet que les vols sont approximativement rectilignes). Or l'espace effectivement contrôlé par les États-Unis n'est pas convexe, il n'est pas même connexe. L'Alaska est coupé du reste des États-Unis par le Canada, et Hawaii par la mer. La partie principale du pays n'est elle-même pas convexe, l'Ontario venant par exemple s'interposer sur un vol Boston-Seattle.

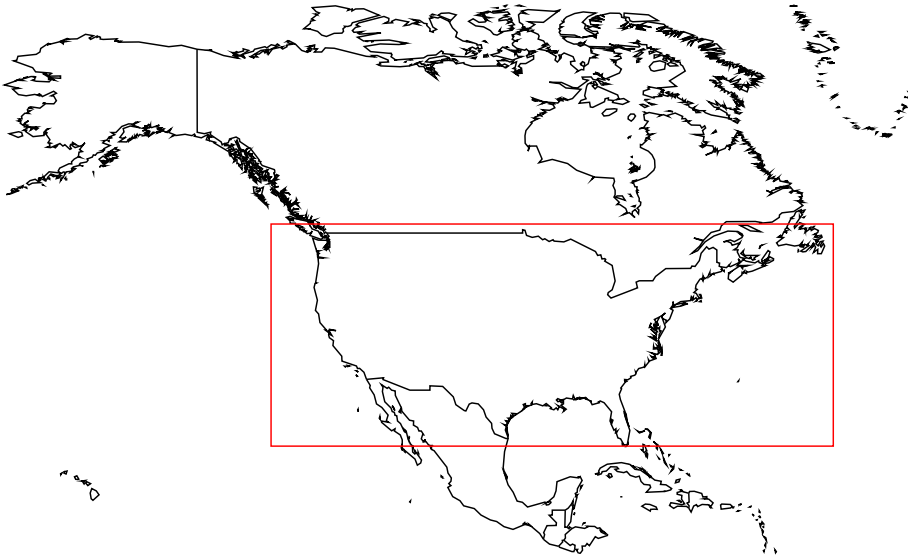


FIG. 2.1 – “L'espace américain”

Pour faire simple, j'ai donc défini “l'espace américain” (figure 2.1) par un rectangle latitude-longitude, incluant le Texas donc une partie nord-ouest du Mexique, ainsi qu'une large bande canadienne afin de ne pas avoir d'aéroport majeur près de la frontière, mais excluant les états d'Alaska et d'Hawaii. Le seul problème de cette définition est le non-respect de la convexité, puisque qu'un rectangle latitude-longitude n'est pas convexe le long de son bord nord dans l'hémisphère nord. Mais cet effet est négligeable. L'origine [resp. la destination] “extérieure” est définie par la présence ou non de l'aéroport de départ [resp. d'arrivée] dans cet espace.

Les vols extérieurs

Par la suite nous parlerons sauf mention contraire des vols sortant de l'espace américain. Un vol entrant devient un vol sortant si l'on retourne sa route pour le temps des calculs. Les vols traversant, comme le Paris-Mexico, seront traités différemment.

Pour un vol extérieur, nous gardons toutes les balises de la route à l'intérieur de l'espace américain, plus la première balise hors de l'espace, ceci afin d'avoir une route correcte à l'intérieur de l'espace tout en limitant les distances inutiles à l'extérieur de celui-ci.

Nous sommes face au problème suivant. Les aéroports de départ et d'arrivée sont connus et certifiés corrects. Les balises latitude-longitude sont correctes. Les autres balises peuvent être soit correctes, soit inconnues, soit des faux amis. Il faut éliminer les balises inconnues ou incorrectes, et garder seulement le segment de route dans notre

espace.

Pour résoudre ce problème j'ai utilisé l'alignement des balises et les distances entre balises. Partant d'une base espérée correcte, que sont l'aéroport de départ et la première balise, l'algorithme vérifie de proche en proche le bon alignement (écart angulaire inférieur à 60°) de la nouvelle balise avec les deux précédentes. L'écart angulaire est calculé à la louche, dans un plan latitude-longitude, sans souci de sphéricité de la Terre, mais se méfie tout de même du Pacifique et de ses discontinuités longitudinales. L'algorithme saute les balises inconnues, écarte les faux amis et se réfugie sur les balises latitude-longitude. Ensuite il ne garde que la première balise hors de l'espace américain.

Une autre difficulté est d'estimer l'heure de passage à la première balise pour les vols entrant. Un vol décollant de l'espace américain est créé sur son aéroport de départ à son heure de décollage. Un vol entrant est créé sur sa première balise, qui est sa dernière avant d'entrer dans l'espace américain. Mais à quelle heure ? Connaissant l'heure de décollage, une estimée de l'heure d'atterrissage, et la vitesse demandée par l'avion, il y a une multitude de façons pour estimer l'heure de passage à la première balise. Aucune n'est aussi précise que de faire voler l'avion seul par le simulateur de son aéroport de départ jusqu'à cette balise, mais cela est impossible par le simple fait que des fonctions du noyau ne peuvent être appelées dans les librairies de données, qui sont en amont. J'ai retenu une formule simple :

$$t_{\text{bal}} = t_{\text{dec}} + \frac{6}{5} \frac{d}{v}, \quad (2.1)$$

où d est la distance entre l'aéroport de départ et la balise d'entrée et v la vitesse de croisière donnée par le plan de vol. Le rapport $\frac{6}{5}$ sert à compenser le temps de montée initiale et le cas échéant les détours éventuels d'une route non directe. J'ai procédé à quelques vérifications sur des vols de différentes durées pour valider cette formule.

Les vols traversant

Les vols traversant (i.e. ayant leur aéroports de départ et d'arrivée hors de l'espace américain) sont plus difficiles à traiter car on ne peut pas partir d'une base connue quand on traite leur route. On n'est même pas sûr qu'ils passent effectivement au-dessus de notre espace, non seulement parce que certains sont des vols vers l'Alaska ou Hawaï, mais aussi parce que nos listes de plans de vols comportent tous les vols survolant les territoires américain et britannique. Ainsi on y trouve des Londres-Manchester, Londres-Paris ou Londres-Johannesburg.

Pour traiter les vols traversant, nous commençons avant tout par éliminer les vols dont les aéroports de départ et d'arrivée sont à l'est de $51^\circ W$. On se débarrasse ainsi des vols britanniques ne concernant pas notre espace. Pour les autres vols, on élimine les balises inconnues, puis on essaye de détecter les faux amis en regardant les alignements et en utilisant les balises latitude-longitude comme base saine. La difficulté par rapport au paragraphe précédent est justement l'absence d'une base saine à partir de laquelle on peut épurer notre route. En fin de traitement nous vérifions que le résultat est cohérent d'un point de vue distance, en vérifiant l'inégalité :

$$d(d, b1) + d(b1, b2) + d(b2, a) < \frac{3}{2}d(d, a), \quad (2.2)$$

où d et a sont les aéroports de départ et d'arrivée, et $b1$ et $b2$ sont les premières et dernières balises retenues.

La fonction distance utilisée dans cette formule et dans la précédente devant être correcte (i) loin de Paris ou de n'importe quel autre point de projection locale, (ii)

pour des distances longues ou courtes et (iii) sans souci de discontinuité de longitude, j'ai implémenté dans la bibliothèque géographique une fonction distance exacte, vraie entre tous points du globe. Cette fonction est beaucoup plus lourde en calculs que celle qui existait précédemment (et qui travaille en coordonnées locales autour d'un point fixé à la compilation), mais comme elle n'est appelée qu'à la lecture des plans de vols ce n'est pas gênant pour la rapidité globale du programme.

2.3.4 Lecture sur deux journées GMT

Les fichiers plans de vol contiennent tous les plans déposés *par journée GMT*. Faire une simulation sur une journée GMT n'est pas convenable pour les États-Unis car on coupe alors la journée réelle en deux, en plein milieu de l'activité diurne.

Afin de résoudre ce problème, nous faisons lire deux journées GMT consécutives au programme et ne gardons que les vols de la journée américaine à cheval entre les deux. Cette solution a l'avantage de permettre d'étudier les pointes de trafic du vendredi et du dimanche, contrairement à une solution où on lirait les vols sur une seule journée et couperait les vols du matin pour les coller en fin de journée. L'heure de début de la "journée américaine" est 08 heures GMT par défaut (valeur paramétrable). En été cela correspond à 4 heures du matin à New-York et 1 heure du matin à Los Angeles.

2.4 Lecture de la sectorisation américaine

2.4.1 Lecture des secteurs

La lecture des secteurs est beaucoup moins intéressante que la lecture des plans de vols. Contrairement à cette dernière, la lecture des secteurs ne demande pas de créativité, mais un respect du canevas imposé par l'interface du simulateur.

Les secteurs sont la somme de prismes droits à base polygonale, qu'on appelle *subsector* (sous-secteur). Dans le cas des États-Unis, il y a trois fichiers secteur, car ils regroupent leurs secteurs en trois catégories : *Low*, *High* et *SuperHigh*. Il n'y a pas de limite de niveau précise entre ces secteurs, mais en gros les premiers vont du sol au niveau 150 ou 240, les seconds suivent jusqu'au niveau 350, et les derniers occupent l'espace au dessus du FL350.

2.4.2 Visualisation des secteurs lus

Afin de vérifier que les secteurs tels qu'ils sont mémorisés par CATS correspondent bien à la réalité, nous avons programmé un outil de visualisation des secteurs.

Ce petit programme nous a permis de vérifier la bonne lecture des secteurs américains. Il y a des imperfections dans les secteurs (trous dans l'espace contrôlé, chevauchements entre secteurs) mais ces imperfections sont dues aux fichiers de données, non pas à leur lecture. Nous n'avons pas de données concernant les zones militaires, et il faut certainement voir là l'explication justifiant une bonne partie des trous observés.

Nous représentons figures 2.2 et 2.3 les secteurs pris aux niveaux de vol 135 et 345 respectivement. Sur ces figures les différentes couleurs correspondent à différents centre, et les contours sont les contours des secteurs. Au niveau 135 on remarque des petits trous ronds : ce sont les *tracon*, des zones d'approche terminales dédiées aux aéroports majeurs. Les zones vides dans l'ouest, au-dessus du Nevada et vers Seattle, sont des zones militaires importantes.

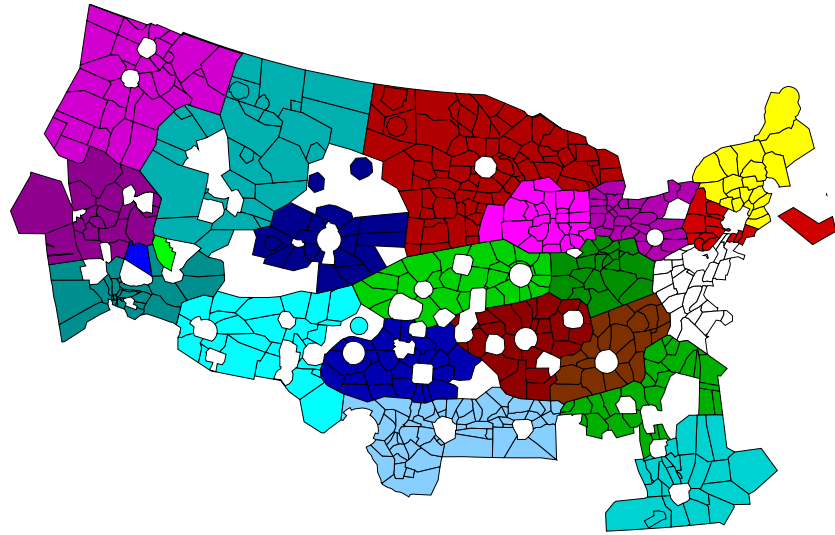


FIG. 2.2 – “Les secteurs au niveau de vol 135”

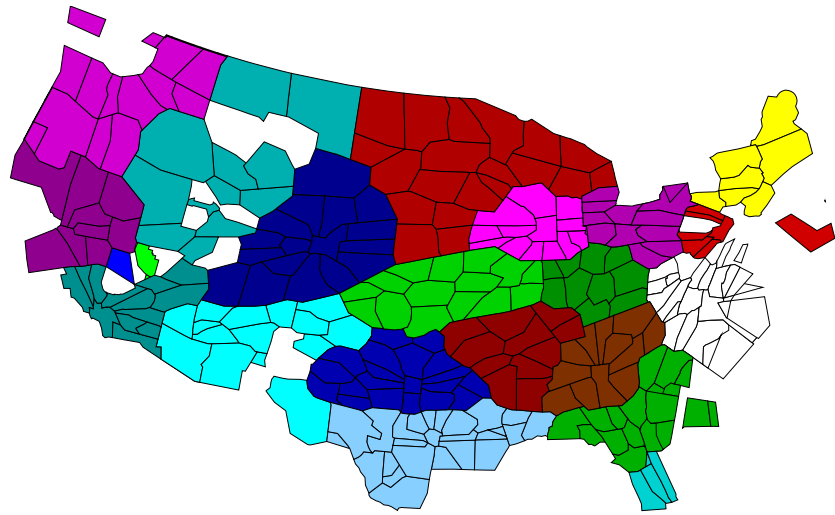


FIG. 2.3 – “Les secteurs au niveau de vol 345”

aéroport	code	mvt/1/4heure					
		trafic mvt/jour	capacité mvt/heure	délai minutes	max	moyen	capa
Atlanta	KATL	2480	200	4965	72	62	50
Boston	KBOS	1030	120	677	26	25	30
Denver	KDEN	1367	210	923	55	34	52
Dallas	KDFW	2072	265	1774	91	51	66
Detroit	KDTW	1296	145	4213	60	32	36
Houston	KIAH	1185	120	6440	51	29	30
NY Kennedy	KJFK	730	95	480	23	18	23
Las Vegas	KLAS	1102	85	1764	28	27	21
Los Angeles	KLAX	1488	150	1041	38	37	37
NY LaGuardia	KLGA	1050	80	2937	27	26	20
Miami	KMIA	878	130	547	33	21	32
Chicago	KORD	2485	200	7045	69	62	50
Phoenix	KPHX	1419	105	6371	47	35	26
St. Louis	KSTL	1182	110	3090	44	29	27
Toronto	CYYZ	934	95	1211	33	23	23

FIG. 2.4 – Caractéristiques des principaux aéroports américains

2.5 Créneaux de décollage et pré-régulation

En Europe, comme expliqué dans le premier chapitre, les plus gros aéroports appliquent des créneaux de décollage afin de s'assurer dès la programmation des vols (six mois à l'avance) que la demande ne risque pas de dépasser les capacités de piste. Aux États-Unis un tel système n'existe pas, et les compagnies peuvent librement poser leur plans de vols, au risque de surcharger les aéroports à certaines heures. Outre-Atlantique, il n'est pas rare de voir les avions attendre jusqu'à une heure avant de pouvoir décoller. Evidemment la priorité est donnée aux avions à l'atterrissage, mais même eux sont parfois obligés de faire la queue.

Les plans de vols dont nous disposons reflètent ces différents systèmes. Les plans de vols européens sont régulés, c'est à dire que les capacités horaires des aéroports y sont respectées, et les heures de départs indiquées sont comparables aux heures de départ réelles. En revanche dans les plans de vols américains les heures de décollage apparaissent discrétisées par tranches de 15 minutes, et dépassent parfois les capacités de piste sur plusieurs tranches d'affilées. Or faire décoller les avions par paquet toutes les 15 minutes n'est ni conforme à la réalité, ni satisfaisant pour les simulations, car dans ce cas tous les avions d'un même paquet apparaîtraient exactement au même point au même moment dans le simulateur et cela engendrerait des détections de conflit superflues, et des résolutions de conflit bien difficiles.

Afin d'étaler les départs, j'ai repris un module de CATS nommé *Casalike*. C'est un filtre appliqué aux plans de vols avant le début de la simulation. Il sépare les avions aux points d'entrée et de sortie de l'espace étudié, que ce soit des points au sol (aéroports) ou des points en vol (balises). Pour chaque point frontière, on liste tous les avions passant ce point, en mélangeant les entrées et les sorties, et on régule ces avions en autorisant un passage toutes les 30 secondes par exemple. On peut donner des capacités et visualiser les délais infligés point par point.

Le tableau 2.4 donne un récapitulatif des caractéristiques des plus gros aéroports américains. Alors qu'en France seuls Orly et Roissy dépassent les 60 mouvements par heure, aux États-Unis une trentaine d'aéroports dépassent les 80 mouvements par

heure, trois d'entre eux en font 200 par heure, et Dallas-Fort Worth International atteint 270 mouvements par heure en pointe (un atterrissage ou un décollage toutes les 13 secondes !). Dallas et Atlanta frôlent les 2500 mouvements par jour...

2.6 Comparaisons entre Europe et États-Unis

Cette partie contient des résultats de simulations réalisées avec CATS et ses deux nouvelles bibliothèques de lecture de données dédiées aux espaces européen et américain. Ces simulations avaient pour objectif plus de tester le programme que d'effectuer une véritable étude digne d'Eurocontrol.

2.6.1 Les hypothèses de simulation

Avec CATS nous pouvons choisir de faire des simulations avec ou sans résolution de conflits. Sans résolution, les avions suivent leur route sans interagir entre eux. Ce mode de vol permet de compter les conflits réels. Dans une simulation avec résolution, le programme utilise des algorithmes génétiques pour résoudre les conflits, avec des méthodes copiant assez fidèlement ce que font les contrôleurs.

Les simulations avec résolution de conflits sont extrêmement coûteuses en calculs. Bien qu'elles fassent appel à la bibliothèque PVM pour répartir ces calculs entre différentes machines, il faut 48 heures de calcul pour écouler les 10 premières heures de la journée pour l'espace européen et ses 21000 vols. On peut donc estimer à 12 jours le temps nécessaire à une simulation sur l'espace américain et ses 40000 vols, avec la puissance de calcul actuellement disponible au LOG. Dans le cadre de notre travail il n'était donc pas imaginable de faire des simulations avec résolution de conflits.

Nous avons réalisé 8 simulations, pour lesquelles nous avons choisi les caractéristiques communes suivantes :

- pas de résolution de conflit,
- les vols circulaires sont supprimés (vols partant et arrivant au même aéroport) car gênants pour les routes directes,
- régulation aux aéroports pour les plans de vol américains afin d'égréner les départs, mais pas pour les plans de vols européens qui étaient déjà régulés par le jeu des créneaux de décollage appliqués en Europe,
- les avions demandant un niveau de vol inférieur ou égal à 120 sont supprimés, ainsi que les vols de la classe *Other* en Amérique, par contre les vols militaires sont inclus,
- nous détectons les conflits à partir du niveau 200 (limite de l'espace supérieur),
- nous avons pris pour norme de séparation 6 nautiques dans le plan horizontal et 1000 pieds sur l'axe vertical,
- enfin pour la détection de conflits potentiels, nous utilisons une incertitude de 5% sur les vitesses horizontales et 20% sur les vitesses verticales. L'horizon temporel est de 8 minutes pour ces mêmes conflits.

Le choix de la norme de séparation fut délicat. Dans le plan horizontal, 6 nautiques est une bonne moyenne des normes appliquées dans la réalité, variant de 5 à 7 nautiques selon les pays et les classes d'espace. Le choix de 1000 pieds en vertical est plus discutable, car si telle est la norme partout en Europe, en revanche les États-Unis ne sont pas encore passés au RVSM et leurs niveaux de vol sont encore séparés de 2000 pieds à partir du niveau 290. Pour des avions en vol stable (fixes sur un niveau de vol) cela ne change rien. Par contre pour les avions en évolution (en montée ou en descente) nous allons compter dans nos simulations moins de conflits qu'il y en a dans la réalité.

	US	UD	ES	ED
Distance moyenne (Nm)	574	532	620	570
Durée moyenne (mn)	91	83	95	87
Consommation moyenne (t)	3.858	3.673	5.946	5.672

FIG. 2.5 – Résultats généraux

Nos 8 simulations se différencient entre elles par trois critères :

L'espace : l'Europe ou les États-Unis,

Les routes suivies : routes standards (selon la route donnée dans le plan de vol) ou routes directes (en suivant le grand cercle terrestre entre le point d'entrée et le point de sortie de l'espace, typiquement d'aéroport à aéroport),

Le type de détection : détection de conflits réels ou détection de conflits potentiels.

Par la suite nous référencerons les simulations par un code en 3 lettres. La première lettre sera U pour les USA et E pour l'Europe. La deuxième lettre sera S pour les routes standards et D pour les routes directes. Enfin la troisième lettre sera R pour une détection de conflits réels et P pour les conflits potentiels.

2.6.2 Analyse des résultats

Résultats généraux

Les simulations ont engagé 39944 avions aux États-Unis et 21094 en Europe.

Le tableau 2.5 donne distances parcourues, durées de vol et consommation en carburant pour les quatre trafics simulés (Europe et US, route directes et routes standard). Les durées et distances de vol 10% plus longues en Europe trouvent leur origine à la fois dans les caractéristiques intrinsèques des deux espaces modélisés (l'espace européen modélisé s'étend jusqu'en Turquie et en Lituanie), et dans la façon de traiter les vols extérieurs, qui ne sont pas coupés hors de l'Europe mais gardés en intégralité.

Nous constatons que la consommation moyenne des avions est plus de 50% plus élevée en Europe. Cette nette différence s'explique par la composition des flottes. En Europe nous faisons voler principalement des avions de ligne, alors qu'aux États-Unis le trafic engendré par les appareils emportant moins de 20 passagers, comme des jets privés, est relativement plus important. Ces appareils, plus petits, consomment moins.

Conformément à ce que l'on pouvait supposer, les routes directes engendrent des trajets plus courts, plus rapide et moins coûteux en carburant. Il convient toutefois de se méfier des proportions de ces économies, car les routes directes telles qu'elles sont opérées par le simulateur sont impossibles dans la réalité en raison des procédures d'approche et de décollage dont on ne peut pas se passer. Un travail plus approfondi sur le sujet pourrait considérer des routes standards jusqu'à un certain niveau de vol, puis directes au-dessus de ce niveau, mais ce n'est pas ici l'objet de notre étude.

Nombre de conflits

Le tableau 2.6 contient le nombre de conflits détectés par simulation. Un conflit est classé "en évolution" si au moins un des deux avions est en évolution.

Regardons la première ligne du tableau. Le nombre de conflits réels est environ 4 fois plus important aux États-Unis qu'en Europe, ce qui est tout à fait normal vu que (i) le trafic est deux fois plus important aux États-Unis sur une superficie comparable

	USR	UDR	ESR	EDR	USP	UDP	ESP	EDP
Nombre de conflits	23400	18597	6647	4581	96336	52768	182532	159614
... en évolution	7484	5075	3488	1907	50929	33391	48638	19633
... au-dessus du FL300	15520	11258	2603	1539	52994	22252	121848	118441

FIG. 2.6 – Nombre de conflits

USR		UDR		ESR		EDR	
NIL	1886	NIL	2028	NIL	194	NIL	132
ZID8801	255	ZTL5001	325	EBMAWSL	121	LIRRUNR	84
ZME2601	245	ZAU8201	318	OIIXCTA	101	LFFAR	62
ZOA3301	219	ZOA1301	213	EG28DTN	89	LECMCJN	59
ZME2501	206	ZID8701	181	EGDTS	80	EGTT17G	58
ZJX3400	197	ZOA3401	170	EBMALNL	65	LFEUE	52
ZTL5001	100	ZID8801	109	LIRRUNR	32	EBMAWSL	50

FIG. 2.7 – Conflits par secteurs

(le nombre de conflits suit approximativement le carré de la densité de trafic), et que (ii) les avions s’y concentrent sur moins de niveaux de vol. En revanche les différences sur le nombre de conflits potentiels sont étonnantes. L’Europe compte deux fois plus de conflits potentiels en routes standards que les États-Unis, et trois fois plus en routes directes. Nous pouvons émettre l’hypothèse que la structure du trafic, qui est plutôt orienté est-ouest en Amérique alors qu’il est organisé en étoile autour de quelques grosses plate-formes eu Europe, est à l’origine de cette différence.

Conflits par secteurs

Dans le tableau 2.7, on indique les 5 secteurs contenant le plus de conflits réels dans la journée. Tout d’abord les conflits intervenant hors de tout secteur sont extrêmement nombreux aux États-Unis. Cela est dû à la définition de l’espace américain qui est beaucoup plus important que la zone couverte par les secteurs. Les conflits ayant lieu au sud du Canada ou au nord du Mexique sont comptabilisés mais sont forcément hors des secteurs de contrôle américains.

Ensuite, il saute aux yeux que les secteurs les plus chargés le sont beaucoup plus aux États-Unis qu’en Europe, mais il semble difficile d’interpréter ce fait. On remarque aussi que les routes directes créent une poignée de secteurs extrêmement chargés aux États-Unis. Cela est dû à la configuration géographique de l’espace, les deux secteurs en question se trouvant juste à l’intersection des routes directes entre plusieurs aéroports majeurs.

Enfin, la dernière ligne du tableau donne le nombre de conflits pour le secteur qui était en haut de la colonne voisine. En Europe comme outre-Atlantique, on constate que le changement de mode de navigation bouleverse radicalement la répartition des conflits entre les secteurs.

2.7 Conclusion

L’adaptation de CATS aux données américaines a été faite avec précision et dans le détail. Ce travail a révélé des lacunes d’homogénéité du programme CATS, mais a aussi ouvert des portes pour son amélioration. Il serait souhaitable pour la performance

du programme et la justesse des simulations, de revoir la bibliothèque géographique afin d'y implanter une représentation unique de l'espace, valable à l'échelle planétaire. On devrait aussi revoir les bibliothèques de lecture de données, afin d'apporter plus de cohérence entre la façon dont les différentes données sont traitées, et peut-être tenter de simplifier l'interface entre ces bibliothèques et CATS même si cela n'aurait d'intérêt que pour le fonctionnement interne du programme.

Il est dommage de ne pas avoir eu plus de temps à consacrer à l'utilisation de l'outil créé, car le potentiel de recherche qu'il ouvre est intéressant et assez inexploré (c'est la première fois que l'on peut comparer les espaces américains et européens avec un même simulateur de trafic). Les résultats que j'ai pu obtenir ne sont que préliminaires et seront certainement approfondis ultérieurement au LOG ou dans d'autres laboratoires de la DGAC. Toutefois ils suffisent à valider l'adaptation effectuée.

Chapitre 3

Algorithmes d'optimisation stochastique

Le laboratoire d'optimisation globale s'est spécialisé dans les différentes méthodes d'optimisation globale, à la fois déterministes (contraintes, branch and bound et programmation par intervalles...) et stochastiques (recuit simulé, algorithmes génétiques...). Pour résoudre le problème sus-cité, après discussion avec Pascal Brisset et mon directeur de stage, je me suis orienté vers des méthodes stochastiques. En effet, les méthodes par contrainte avaient fort peu de chance de s'appliquer sur ce problème qui est plus un problème d'optimisation qu'un problème de satisfaction, et les méthodes de type branch and bound et programmation par intervalles ne s'appliquent pas à un problème dont les variables sont essentiellement discrètes. Je me suis donc successivement intéressé aux algorithmes génétiques et au recuit simulé.

Je me suis initialement plus intéressé aux algorithmes génétiques, ce qui explique la disproportion de la présentation des deux algorithmes dans ce chapitre. Pourtant, la mise en pratique m'a montré par la suite que le recuit simulé peut, sur certains problèmes, allier simplicité et efficacité.

3.1 Algorithmes génétiques

3.1.1 principes généraux

Les algorithmes génétiques font partie des algorithmes évolutionnaires, algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle. Les algorithmes évolutionnaires s'appuient sur l'hypothèse darwinienne de la sélection naturelle. Ce sont des méthodes d'optimisation stochastique qui ne requièrent *a priori* pas de régularité sur les fonctions optimisées : les applications possibles sont très diverses. Ils ont la propriété de pouvoir localiser plusieurs optima mais présentent deux inconvénients majeurs. D'une part, ce sont des méthodes chères en calculs qui ne garantissent pas l'optimalité du résultat et l'on conseille généralement d'appliquer ce type de méthodes lorsque *rien d'autre ne marche*. D'autre part, la mise en œuvre de ces méthodes demande une grande expérience et les résultats théoriques sont généralement peu utiles en pratique. Les algorithmes génétiques sont apparus aux États-Unis dans les années 60 : les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962 [Hol62].

Un algorithme génétique réalise une optimisation dans un espace de données. Pour

pouvoir utiliser les techniques génétiques il faut disposer de deux opérations :

1. une fonction de codage de la ou des données en entrée : originellement les données étaient codées sous forme d'une séquence de bits, d'autres forme de codages sont utilisées en pratique (voir paragraphe 3.1.2);
2. fournir une fonction d'utilité, d'adaptation ou *fitness* $U(x)$, permettant de calculer l'adaptation d'une séquence de bits x . Idéalement, cette fonction vaudra 1 si la séquence de bits est parfaitement adaptée et 0 si la séquence est inadaptée. Cette fonction d'utilité correspond au critère à maximiser sur l'espace de données.

Ces deux éléments sont les seuls éléments spécifiques au problème à résoudre.

L'algorithme s'exécutera en plusieurs étapes :

1. génération aléatoire d'un certain nombre de séquences de bits pour composer la population initiale ;
2. mesure de l'adaptation de chacune des séquences présentes ;
3. reproduction de chaque séquence en fonction de son adaptation. Les séquences les mieux adaptées se reproduisent mieux que les séquences inadaptées. La nouvelle population est composée des séquences après reproduction ;
4. on remplace un certain nombre de paires de séquences tirées aléatoirement par le croisement de ces paires (le lieu de croisement dans la séquence de bits est également choisi de façon aléatoire.). Chaque nouvelle paire est constituée de la façon suivante :
 - une séquence est composée de la première partie de la première séquence et de la seconde partie de la seconde séquence ;
 - l'autre séquence est composée de la première partie de la seconde séquence et de la seconde partie de la première séquence.
5. mutation d'un bit choisi aléatoirement dans une ou plusieurs séquences tirées au sort ;
6. Retour à l'étape 2.

Comme souvent pour ce type de mécanisme qui pourrait apparaître comme un peu magique, les difficultés sont invisibles, mais bien réelles. La première d'entre elles consiste à bien choisir les divers paramètres : pourcentage de croisement, pourcentage de mutation, taille de la population. . .

Mais le problème le plus important est le codage des données. Comme le dit Goldberg lui-même, le codage des données est un art, et de cet art dépend le succès ou l'échec de la tentative.

Si l'on veut par exemple coder un réel compris entre 0 et 1 par une chaîne de 8 bits, on peut par exemple multiplier ce nombre par 2^8 et exprimer sa partie entière en base 2. On remarque alors que 0.5 a pour codage 10000000 et 0.496 a pour codage 01111111. Si l'optimum est dans le voisinage de 0.5, les séquences 10000000 et 01111111 sont très bien adaptées l'une et l'autre, bien que leur codage soit fondamentalement différent, ce qui n'est pas une bonne propriété.

3.1.2 Utilisation d'un codage et d'opérateurs spécialisés

Les techniques de codage sous forme de chaînes de bits et de croisement standard présentent un certain nombre d'inconvénients :

- il n'est pas facile de choisir un bon codage adapté à la structure du problème ;
- l'application de la fonction de décodage lors de l'évaluation de la fitness est très coûteuse en temps de calcul ;

- les opérateurs de croisement/mutation sont aveugles, et ne tiennent aucun compte de la structure du problème.

Il est alors naturel de tenter de définir des codages et des opérateurs spécialisés, qui s’appliqueront efficacement sur le problème considéré.

Dans le cas des variables réelles, on emploie de façon classique le *croisement bary-centrique*. Pour générer deux enfants, on commence par tirer aléatoirement un nombre α dans l’intervalle $[-0.5, 1.5]$ et par appliquer les formules suivantes :

$$\begin{aligned} p'_1 &= \alpha p_1 + (1 - \alpha)p_2 \\ p'_2 &= \alpha p_2 + (1 - \alpha)p_1 \end{aligned}$$

En ce qui concerne la mutation, on génère l’élément muté en appliquant la formule :

$$p'_1 = p_1 + B(0, \sigma)$$

où $B(0, \sigma)$ est un bruit gaussien centré en 0 et d’écart type σ . Le choix de σ dépend, bien entendu, du problème considéré.

Il est extrêmement important de prendre conscience que le codage et les opérateurs choisis conditionnent fortement la qualité de la solution obtenue. Les algorithmes génétiques ne sont pas des boîtes noires miraculeuses dans lesquelles il suffirait d’introduire une fonction pour en retirer l’optimum. Sans une réflexion appropriée sur le codage et les opérateurs, les résultats seront au mieux médiocres.

3.2 le recuit simulé

Le recuit simulé est une variante d’une famille d’algorithmes très ancienne, dont un des algorithmes fondateurs est celui de Metropolis [Met53]. Le principe général est simple : on choisit une solution initiale de façon aléatoire, on la perturbe, puis on applique un critère d’acceptation sur l’élément perturbé. Les termes “recuit simulé” viennent de la thermodynamique. Il s’agit d’une méthode employée par exemple pour la réalisation d’aciers très résistants. Elle consiste à laisser refroidir le métal, puis à le réchauffer à nouveau, par paliers successifs de température. Les refroidissements et réchauffements successifs permettent de réorienter les atomes de façon régulière et améliorent les propriétés mécaniques.

Comme les algorithmes génétiques, il s’agit d’un processus qualifié d’évolutionniste (“evolutionary process” suivant [Kir83], autre article de référence). De la même façon, ces algorithmes sont souvent classés dans la catégorie “Intelligence Artificielle” (*it provides an intriguing instance of artificial intelligence in which the computer has arrived almost uninstructed at a solution that might have been thought to require the intervention of human intelligence* [Kir83]).

Nous allons maintenant détailler le fonctionnement d’un algorithme de recuit pour un problème de minimisation.

On considère la fonction $f(x)$ à optimiser. x peut être un vecteur, la fonction étant à valeurs réelles. On choisit une “température” T_0 initiale ainsi qu’un point initial x_0 . L’algorithme est alors itératif. A l’étape i , à la température T_i , pour le point x_i , on génère un nouveau point $s(x_i)$ par perturbation de x_i . Puis on calcule $\Delta = f(s(x_i)) - f(x_i)$. Deux cas se présentent alors :

$\Delta < 0$: alors $x_{i+1} = s(x_i)$.

$\Delta > 0$: on calcule alors un facteur d’acceptation $a = e^{-\Delta/T_i}$ et on tire un nombre aléatoire r entre 0 et 1. Si $r < a$ alors $x_{i+1} = s(x_i)$, sinon $x_{i+1} = x_i$.

Le bon fonctionnement d'un algorithme de recuit dépend essentiellement des deux facteurs non-décrits ci-dessus : la fonction de perturbation $s(x)$ et la fonction de décroissance de la température T_i . La fonction s doit être choisie de façon "intelligente", comme les fonctions de croisement et de mutation des algorithmes génétiques ; elle doit exploiter la structure de l'espace de recherche de façon à la fois à l'explorer de façon satisfaisante sans toutefois être une fonction strictement aléatoire.

La fonction de décroissance de la température est encore plus délicate à définir. Il existe de nombreux schémas de décroissance, ainsi que des études plus complexes sur la notion de "very fast simulated re-annealing" (VFSA) ou d'"adaptive simulated annealing" (ASA) essentiellement développé par Ingber [Ing89]. Un des avantages d'ASA est que le code est disponible en ligne et qu'il s'agit d'un des meilleurs algorithmes de recuit.

Nous avons exploré l'ensemble de ces voies lors de notre étude.

Chapitre 4

Optimisation du découpage de l'espace aérien

Comme nous l'avons dit dans notre introduction, l'espace aérien doit être découpé en secteurs élémentaires afin qu'il puisse être contrôlable. Ces secteurs sont eux-mêmes regroupés à l'intérieur de zones de qualification, qui sont elles-mêmes regroupées à l'intérieur de centres de contrôle. Nous allons maintenant détailler ce mécanisme, et voir comment on peut l'optimiser.

4.1 Principes généraux

4.1.1 Le découpage de l'espace en secteurs

Chaque secteur de contrôle est pris en charge par un binôme de contrôleurs. Les règles qui président au découpage de l'espace en secteurs élémentaires sont complexes. Il faut tenir compte de la structure des routes aériennes, des flux d'avions qui vont traverser les secteurs, mais aussi des risques de conflits si plusieurs flux importants se croisent, etc.

On considère généralement que la charge de travail d'un contrôleur sur un secteur est la somme de trois termes :

La surveillance : il s'agit de surveiller l'ensemble des avions pour vérifier que tout se passe de façon nominale ;

la détection/résolution : il faut détecter les conflits potentiels entre avions, préparer les manoeuvres à leur donner pour qu'ils s'évitent, leur communiquer les ordres en temps voulu, puis les ramener sur leur trajectoire nominale ;

la coordination : lorsqu'un avion passe d'un secteur au secteur voisin, le contrôleur doit se coordonner avec le contrôleur du centre voisin avant de lui "livrer" l'avion ;

Si les deux premiers paramètres sont bien proportionnels à la taille du secteur, le dernier est lui inversement proportionnel à cette taille : plus les secteurs sont petits, et plus la charge de coordination augmente. On voit donc bien qu'il existe une taille "optimale" pour un secteur, qui ne doit être ni trop grand (trop de surveillance/détection/résolution), ni trop petit (trop de coordination). L'évolution de la sectorisation de l'espace est une opération très difficile. En effet, les contrôleurs sont formés et entraînés sur une certaine structure de leur espace (en terme de routes aériennes et de forme des secteurs), et un changement de cette structure entraîne une déqualification, qui peut réduire fortement l'efficacité du contrôleur pendant la période de requalification, période qui peut

s'avérer longue (par exemple, le transfert d'un contrôleur vers un nouveau ensemble de secteurs peut prendre de 6 à 18 mois). Cette réduction d'efficacité n'est que rarement acceptable, car elle induit une perte de capacité, ce qui explique que le réseau de routes aériennes et la sectorisation n'évoluent aujourd'hui qu'à doses homéopathiques. Il existe certes des études sur la possible optimisation globale au niveau européen du réseau de routes et de la sectorisation, mais dans la structure actuelle du système de contrôle elles n'auront très probablement pas d'applications pratiques.

4.1.2 La notion de zones de qualification

Les secteurs sont regroupés en ensembles que l'on appelle *zones de qualification*. C'est sur ce sujet que j'ai effectué la partie recherche de mon stage, et je vais donc le détailler plus précisément.

Qu'est ce qu'une zone de qualification ? Pour des raisons élémentaires de gestion des personnels, un contrôleur aérien doit être susceptible de contrôler plusieurs secteurs différents. Un autre facteur important est la capacité à *regrouper* plusieurs secteurs sous la responsabilité d'un même contrôleur. Pour bien comprendre ce mécanisme de regroupement, il faut d'abord bien se rendre compte que les flux de trafic dans une journée sont évolutifs. Aux heures de pointe, tous les secteurs peuvent être "armés" simultanément (c'est à dire qu'il y a effectivement un binôme de contrôleur par secteur élémentaire). En revanche, lorsque le flux est faible, on s'autorise à regrouper plusieurs secteurs sur une même position de contrôle. Un binôme de contrôleur peut alors gérer simultanément 5, 6 voire la totalité des secteurs appartenant à la même zone de qualification. Cette situation est relativement fréquente la nuit, où il est absolument inutile de mobiliser une armée de contrôleurs pour traiter des flux d'une dizaine d'avions/heure.

Une zone de qualification est donc un ensemble de secteurs sur lesquels un (groupe de) contrôleur(s) est qualifié, c'est à dire sur lesquels il est susceptible de travailler. Ces secteurs peuvent également être regroupés en un ou plusieurs sous-ensembles, qu'un contrôleur qualifié est susceptible de prendre en charge, si le trafic le permet.

Les critères qui président à l'assemblage des secteurs en zones de qualification peuvent être complexes, mais il est tout de même possible de les résumer de façon abrupte de la façon suivante :

1. une zone de qualification ne doit pas être "trop grande", car il est impossible de qualifier un contrôleur sur un ensemble trop important de secteurs ;
2. une zone de qualification ne doit pas être trop petite, pour éviter une flexibilité trop faible en terme de gestion des personnels et de regroupements des secteurs ;
3. on essaie en général de regrouper dans une même zone des secteurs reliés entre eux par des flux importants ;
4. on essaie généralement de limiter le flux global d'avions traversant une zone ;

Ces deux derniers critères ressortent de diverses discussions que nous avons pu avoir avec des opérationnels, l'un d'entre eux ayant d'ailleurs participé il y a quelques années à la création des deux zones de qualification du centre de contrôle d'Athis-Mons.

4.1.3 Les centres de contrôle

L'unité physique de regroupement des secteurs est le centre de contrôle (CRNA, ou Centre Régional de la Navigation Aérienne). Il existe actuellement cinq CRNA en France : Aix en provence, Paris (Athis-Mons en fait), Bordeaux, Brest et Reims. Actuellement, il y a coïncidence partielle entre centres de contrôle et zones de qualification. Les centres de Bordeaux, Reims et Brest ne contiennent qu'une seule zone

de qualification. Les centres de Paris et Aix sont découpés chacun en deux zones de qualification (respectivement Paris-Est et Paris-Ouest, et Aix-Est et Aix-Ouest).

4.2 Modélisation

4.2.1 Introduction

L'espace aérien est donc découpé en secteurs élémentaires de contrôle. Ces secteurs sont regroupés en zones de qualification, qui sont les entités logiques sur lesquelles sont qualifiés (autorisés à travailler) les contrôleurs. Ces entités logiques sont elles-mêmes regroupées au sein d'unités physiques, les centres de contrôle.

Actuellement il y a en France environ 120 secteurs de contrôle, 7 zones de qualification et 5 centres de contrôle.

Mon sujet de recherche était de réfléchir à la mise au point d'un algorithme d'optimisation globale permettant de définir des zones de qualification "optimales". L'input de l'algorithme est le nombre de zones de qualification, l'output est la répartition des secteurs à l'intérieur des zones. Le critère à optimiser est la minimisation des flux entre zones.

4.2.2 Types d'avions

Nous allons tout d'abord présenter le problème de segmentation sous la forme d'un cas "jouet" pour bien comprendre comment le système se comporte. Nous allons supposer que l'espace aérien ne comprend que 3 secteurs A , B et C . Les avions qui vont traverser ces trois secteurs se partagent en 15 catégories différentes : aa (avions qui rentrent par A et ressortent de A sans traverser aucun autre secteur. Ces avions peuvent être le résultat d'une route aérienne qui traverse simplement le secteur, ou plus simplement d'avions qui arrivent dans A et se pose dans un aéroport situé dans A), ab (avions qui rentrent par A et sortent de B), ac , ba , bb , bc , ca , cb , cc , abc (avions qui rentrent dans A , passent dans B et sortent en C^1), acb , bac , bca , cab et cba . En revanche, on suppose qu'il n'existe pas de vols circulaires, c'est à dire de cheminement ABA (avions entrant par exemple en A , allant dans B puis ressortant par A), ou faisant un cheminement $ABCA$.

4.2.3 calcul des flux

Il est alors simple de calculer le flux qui vient de l'extérieur et qui rentre par A : $f_{ea} = aa + ab + ac + abc + acb$. On peut de même calculer aisément f_{ae} (flux qui va de A vers l'extérieur), f_{be} , f_{eb} , f_{ec} , f_{ce} mais aussi $f_{ab} = ab + abc + cab$ (flux entre A et B), f_{ba} , f_{ac} , f_{ca} , f_{bc} , f_{cb} .

Le flux global entre A et l'extérieur sera noté f_{AE} et vaudra $f_{AE} = f_{ae} + f_{ea}$, f_{BE} et f_{CE} représenteront les mêmes quantités relativement à B et C . f_{AB} (resp f_{AC} et f_{BC}) sera le flux global entre A et B (resp entre A et C , et entre B et C) avec $f_{AC} = f_{ac} + f_{ca}$, etc.

Enfin, le flux total traversant A est $f_A = f_{AE} + f_{AB} + f_{AC}$. Il en va de même pour $f_B = f_{BE} + f_{AB} + f_{BC}$ et $f_C = f_{CE} + f_{AC} + f_{BC}$. On peut voir sur la figure 4.1 un exemple avec les valeurs numériques suivantes : $aa = 2$, $ab = 10$,

¹Signalons également que pour plus de trois secteurs, le cas d'avions qui ont les mêmes points d'entrée et de sortie mais des cheminements différents peut se rencontrer lors de reroutage pour des raisons de congestion de secteurs par exemple.

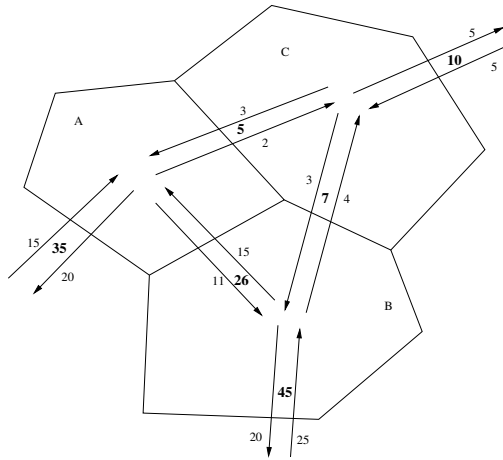


FIG. 4.1 – Exemple de flux

$ac = 2, ba = 15, bb = 7, bc = 2, ca = 2, cb = 3, cc = 0, abc = 1, acb = 0, bac = 0, bca = 1, cab = 0, cba = 0$.

Voici quelques uns des résultats que nous obtenons suivant la méthode décrite ci-dessus : $f_{ea} = aa + ab + ac + abc + acb = 2 + 10 + 2 + 1 + 0 = 15$ et $f_{ae} = 20$ donc $f_{AE} = 35$. De la même façon on trouve $f_{BE} = 45, f_{CE} = 10, f_{AB} = 26, f_{AC} = 5$ et $f_{BC} = 7$. On en déduit alors $f_A = 35 + 26 + 5 = 66, f_B = 78$ et $f_C = 22$.

Les quantités qui vont nous intéresser par la suite vont être *les flux traversant les regroupements de secteurs*. Si par exemple on suppose que l'on regroupe les secteurs A et B, le flux traversant AB est noté $r_{AB} = f_{AE} + f_{BE} + f_{AC} + f_{BC}$. On peut calculer également les flux traversant les regroupements AC et BC. Dans notre exemple, nous avons $r_{AB} = 92, r_{AC} = 78$ et $r_{BC} = 86$. Enfin, si l'on regroupe les 3 secteurs on a $r_{ABC} = f_{AE} + f_{BE} + f_{CE}$. Dans notre exemple, $r_{ABC} = 90$.

Nous remarquons tout de suite que le problème est relativement complexe et pas nécessairement intuitif. Ainsi, si nous disposons de trois zones, nous pouvons mettre un secteur par zone, avec des flux respectivement de 66, 78 et 22. Mais si nous ne disposons plus que de deux zones, nous devons regrouper deux secteurs dans une zone. Or, le regroupement AB comprend un flux de 92 avions, qui est, de façon assez contre-intuitive, supérieur au flux que l'on obtiendrait en regroupant les trois secteurs (90 avions).

Il faut cependant se garder de considérer ce critère comme trop simpliste. En effet, on pourrait penser dans un premier temps qu'il n'optimise pas la taille des zones, parce que si on s'imagine des flux en 2D, alors mettre tous les secteurs dans une seule zone et laisser les autres zones vides paraît être la meilleure solution. Mais ce n'est pas le cas. Les aéroports (qui sont des points source ou puits pour nos flux) jouent de façon considérable, car tous les secteurs, même ceux placés au milieu des autres, peuvent avoir des échanges avec l'extérieur (les flux sur une carte 2D ne sont donc pas conservatifs).

Par exemple, si l'on supposait que tout le trafic situé sur les flux USA-Europe se posait en France, le fait d'inclure ou pas ce trafic dans la zone de Brest ne modifierait pas les valeurs des flux. Mais, d'une part le trafic trans-océanique contient nécessairement des flux en traversée qui modifient les valeurs considérées, et d'autre part le rajout des zones océaniques ne modifient effectivement pas de façon très significative la com-

plexité du contrôle. On peut penser qu'il s'agit d'une simple chance, mais il est aussi possible que ce soit un effet plus profond, et que le critère considéré soit finalement assez représentatif.

4.2.4 Critère à optimiser

Restons toujours dans le cas où nous n'avons que deux zones pour nos trois secteurs. Il nous faut maintenant définir le critère que nous voulons minimiser.

Nous avons successivement examiné plusieurs possibilités : la moyenne, la moyenne quadratique ou le maximum. Sur l'exemple considéré, nous avons trois possibilités de regroupement :

$AB + C$: on regroupe A et B dans la première zone et on laisse C seul dans la seconde zone ; nous avons alors $r_{AB} = 92$ et $f_C = 22$, pour une moyenne de $m = (92 + 22)/2 = 62$, une moyenne quadratique $q = \sqrt{(92^2 + 22^2)}/2 = 67$, et un maximum $M = 92$

$BC + A$: $r_{BC} = 86$, $f_A = 66$ donc $m = 76$, $q = 76$ et un max $M = 86$.

$AC+B$: $r_{AC} = 78$, $f_B = 78$ donc $m = 78$, $q = 78$ et $M = 78$

On voit tout de suite qu'il n'est pas équivalent de minimiser une moyenne, une moyenne quadratique ou le maximum. Dans la mesure où nous cherchons avant tout à équilibrer les charges, nous avons choisi de minimiser le maximum. Sous cette hypothèse, c'est le regroupement AC qui sera choisi ici. On se retrouve alors avec 2 zones, chacune ayant un flux de 78 avions. Dans des cas plus complexes, on peut trouver plusieurs solutions différentes qui aboutissent à la même valeur de la fonction objectif. Le critère que nous avons finalement cherché à minimiser est le suivant : nous prenons le maximum des zones, auquel nous ajoutons la somme quadratique sur l'ensemble des zones divisé par un coefficient bien choisi qui assure que cette somme reste inférieure à l'unité. Ainsi, sur l'exemple que nous avons pris, la valeur du critère aurait été : $78 + (78^2 + 78^2)/100000 = 78.012168$

4.3 Résultats sur la France

4.3.1 Introduction

Nous disposons pour l'espace français de statistiques relativement précises sur les flux entre secteurs ainsi qu'une bonne description de l'espace.

Nous avons effectué l'optimisation sur une journée de trafic. Cela est critiquable pour plusieurs raisons :

- on aurait pu utiliser plusieurs jours afin de gommer les particularités de la journée choisie ;
- on aurait pu s'intéresser seulement à certaines périodes (critiques) de la journée, qui sont celles pour lesquelles l'optimisation est la plus importante. En effet, un flux journalier a relativement peu de signification, alors qu'un flux proche des pics de capacité maximale sur une période horaire ou demi-horaire peut être plus intéressant.

Le temps nous a cependant manqué pour réaliser ces études. Les résultats que nous présentons ici sont donc plutôt un exemple de ce que peut réaliser notre algorithme et l'on ne saurait en tirer d'enseignements définitifs vis à vis des problèmes opérationnels. Enfin, rappelons que nous avons pour la France environ 8000 vols par jour pour environ 110 secteurs.

4.3.2 Algorithmes

Nous avons tout d'abord tenté d'utiliser un algorithme génétique pour traiter ce problème. Nous fixons le nombre n de zones de qualification ; un élément de population est alors une partition en n sous-ensemble de l'ensemble des secteurs français.

Une mutation consiste à prendre un élément de population à choisir deux nombres i et j différents compris entre 1 et n , puis à choisir aléatoirement un secteur s du sous-ensemble i pour le transférer au sous-ensemble j . On peut dans un premier temps se contenter de cet opérateur simpliste. Dans le cas de la France, nous avons obtenu des résultats relativement corrects. Cependant, une amélioration simple a été rapidement amenée : au lieu de transférer le secteur s à un sous-ensemble choisi aléatoirement, on accepte uniquement le transfert vers un sous-ensemble connexe du secteur s . Il faut que nous expliquions ici ce que nous appelons "secteur connexe". Nous avons choisi d'utiliser une notion de connexité liée aux flux (deux secteurs sont connexes s'il existe un flux entre eux) et non pas une notion de connexité géométrique. Deux raisons à cela : d'une part, cette notion de connexité à un "sens" opérationnel. D'autre part, les descriptions de l'espace que nous utilisons (et qui sont les descriptions venant des systèmes opérationnels) ne sont pas toujours propres. En particulier, la division de l'espace français présente un certain nombre de trous qui mettent sérieusement à mal la connexité géométrique.

Malgré tous nos efforts, nous n'avons pas été en mesure de construire un opérateur de croisement ayant un sens par rapport au problème considéré. Comme nous pouvions donc nous y attendre dans ce cadre, le recuit simulé s'est montré nettement plus rapide que l'algorithme génétique. Pour un nombre de zones de qualification de 5, l'algorithme génétique ne trouve la solution qu'au bout de 10000 générations et plusieurs dizaines de minutes de calculs, alors que le recuit obtient un résultat en quelques minutes.

Nous avons adapté le principe du recuit à notre problème, et programmé notre propre algorithme. Les différentes expériences que nous avons pu mener ont en effet montré qu'une bonne connaissance du problème permettait de rendre l'algorithme beaucoup plus efficace qu'un algorithme générique de type ASA ou VFSSR.

Le schéma de recuit est donc le suivant : si l'on parvient à améliorer la fonction objectif, la température est multipliée par 0.9999. Elle reste inchangée sinon. Si l'on ne parvient pas à améliorer le meilleur élément pendant 500000 générations, on exécute un "reannealing", en faisant croître à nouveau la température. Nous ne sommes pas parvenus à ces réglages simplement, mais par tâtonnements successifs pendant lesquels nous avons testé plusieurs paramètres et plusieurs schémas.

4.3.3 Les résultats

Nous avons utilisé l'algorithme pour trois types de configurations : 3 zones, 5 zones et 7 zones. Il faut savoir que l'algorithme ne conservait pas systématiquement la connexité d'un sous-ensemble (le fait d'enlever un secteur pouvait couper une zone en deux morceaux). Pourtant, l'algorithme trouve systématiquement des solutions connexes au bout d'un petit nombre de générations, et ce dans toutes les configurations. Nous ne représentons ici les secteurs qu'à deux niveaux de vol pour chacun des exemples traités, un pour le supérieur (au dessus du 360) et un pour l'inférieur (niveau 90). Il faut cependant noter que les résultats sur l'inférieur sont moins fiables, pour tout un ensemble de raisons "opérationnelles" dont, en particulier, le problème de la description de l'espace inférieur et son recouplement avec les FIS (nous expliquons ce problème plus en détail dans le chapitre suivant). Nous avons choisi 3, 5 et 7 comme nombre de zones pour

les raisons suivantes : 3 était le nombre de centres de contrôle en France au début des années 70, 5 est le nombre de centres de contrôles après l'apparition des CRNA de Brest et de Reims, et 7 est le nombre de zones de qualification aujourd'hui.

Notons enfin la valeur de la fonction après optimisation. Elle est de 3151.218140 pour 7 zones, 4119.204000 pour 5 zones et 5900.176860 pour trois zones. L'affectation des secteurs par zones, et le coût associé, est la suivante.

Pour 3 zones :

(CEN0,5900) : A1 A2 B1 B2 BS CO D1 D2 E1 E2 F1 F2 F3 G1 G2 H1 K1 K2 LE
LO LS M1 M2 M3 ML MN MO N1 NL S SL ST T1 TA TG TU UP UT W1 W2
X1 Y1 Y2 Z1

(CEN1,5888) : AO AR DS E SE SU TB TE TL TM TN TS UE UF UH UJ UN UR
UY XE XH XN XR

(CEN2,5898) : AS AU BN C1 C2 C3 D3 GS GU H2 ID IN JS JU L1 L2 LN LU N2
NS NU OS OU P1 P2 QS QU R1 R2 T2 T3 TH TP TW UK UX UZ V1 V2 X2
X3 XS XU Z2 ZS ZU

Pour 5 zones :

(CEN0,4023) : A1 B1 CO D1 E1 F1 G1 K1 LE LO LS M1 ML MN MO S ST TU UP
UT W1 Y1

(CEN1,4095) : A2 AU B2 C2 C3 D3 E2 F2 F3 G2 GU H2 JU K2 L2 M2 M3 N2 NU
OU P2 QU R2 T2 T3 V2 W2 X2 X3 XU Y2 Z2 ZU

(CEN2,4090) : AO AR DS E SE SU TS UE UF UH UJ XE XH

(CEN3,4073) : AS BN BS C1 GS H1 ID IN JS L1 LU N1 NL NS OS P1 QS R1 SL
T1 TA TG TH TW UK UX UZ V1 X1 XS Z1 ZS

(CEN4,4119) : D2 LN TB TE TL TM TN TP UN UR UY XN XR

Pour 7 zones :

(CEN0,3130) : AU C2 C3 D1 GU H2 JU L2 N2 NU OU P2 QU R2 T2 T3 V2 X2 X3
XU Z2 ZU

(CEN1,3007) : AO AR D3 DS G1 G2 SU TS TU UJ UP UT

(CEN2,3151) : A1 A2 B1 B2 CO E1 E2 F1 F2 F3 K1 K2 M1 M2 M3 ML MN MO
ST W1 W2 Y1 Y2

(CEN3,3148) : E LE SE UE UF UH XE XH

(CEN4,3138) : BN BS C1 D2 H1 L1 LO LS N1 NL P1 R1 S SL T1 TA TG V1 X1 Z1

(CEN5,3122) : TB TE TL TM TN UN UR UY XN XR

(CEN6,3118) : AS GS ID IN JS LN LU NS OS QS TH TP TW UK UX UZ XS ZS

L'élément le plus remarquable est que l'algorithme, lorsqu'il dispose de plus de 3 zones, commence à diviser l'espace en utilisant la vraiment la troisième dimension. Ainsi, avec 3 zones, on voit que la division est essentiellement géographique (figures 4.2 et 4.3), alors qu'avec 5 zones on voit apparaître un grand centre (CEN0) qui contrôle une grande partie de l'espace supérieur sans toucher à l'espace inférieur, les autres centres gardant un pied dans l'inférieur et un dans le supérieur. Il faut noter que la division existante aujourd'hui est purement géographique (en 2D). Cela peut avoir plusieurs explications : des raisons techniques (nos critères d'optimisation ne sont pas ceux du monde opérationnel), ou des raisons historiques (le découpage actuel est l'héritier du passé).

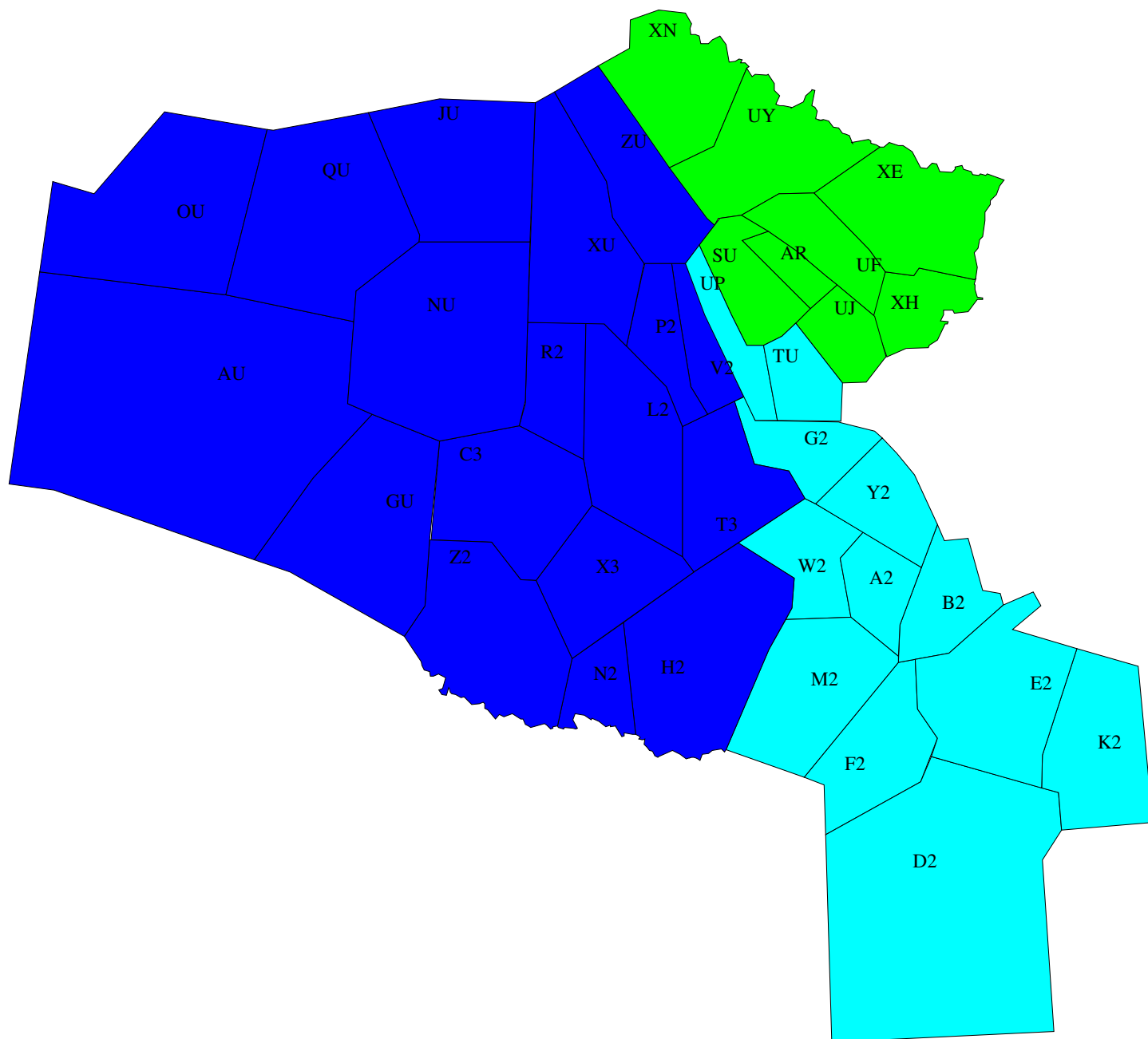


FIG. 4.2 – France : espace supérieur avec 3 zones

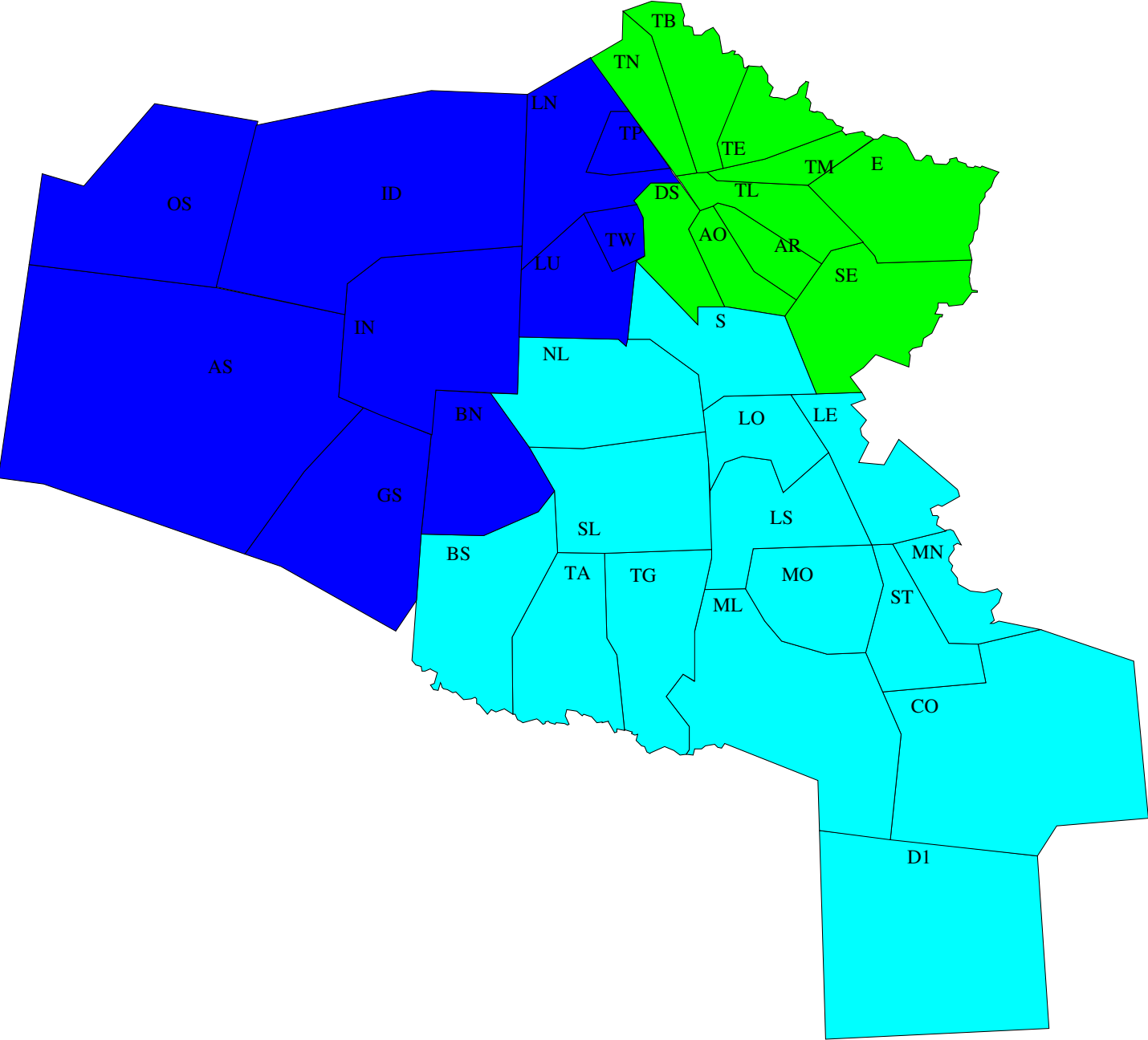


FIG. 4.3 – France : espace inférieur avec 3 zones

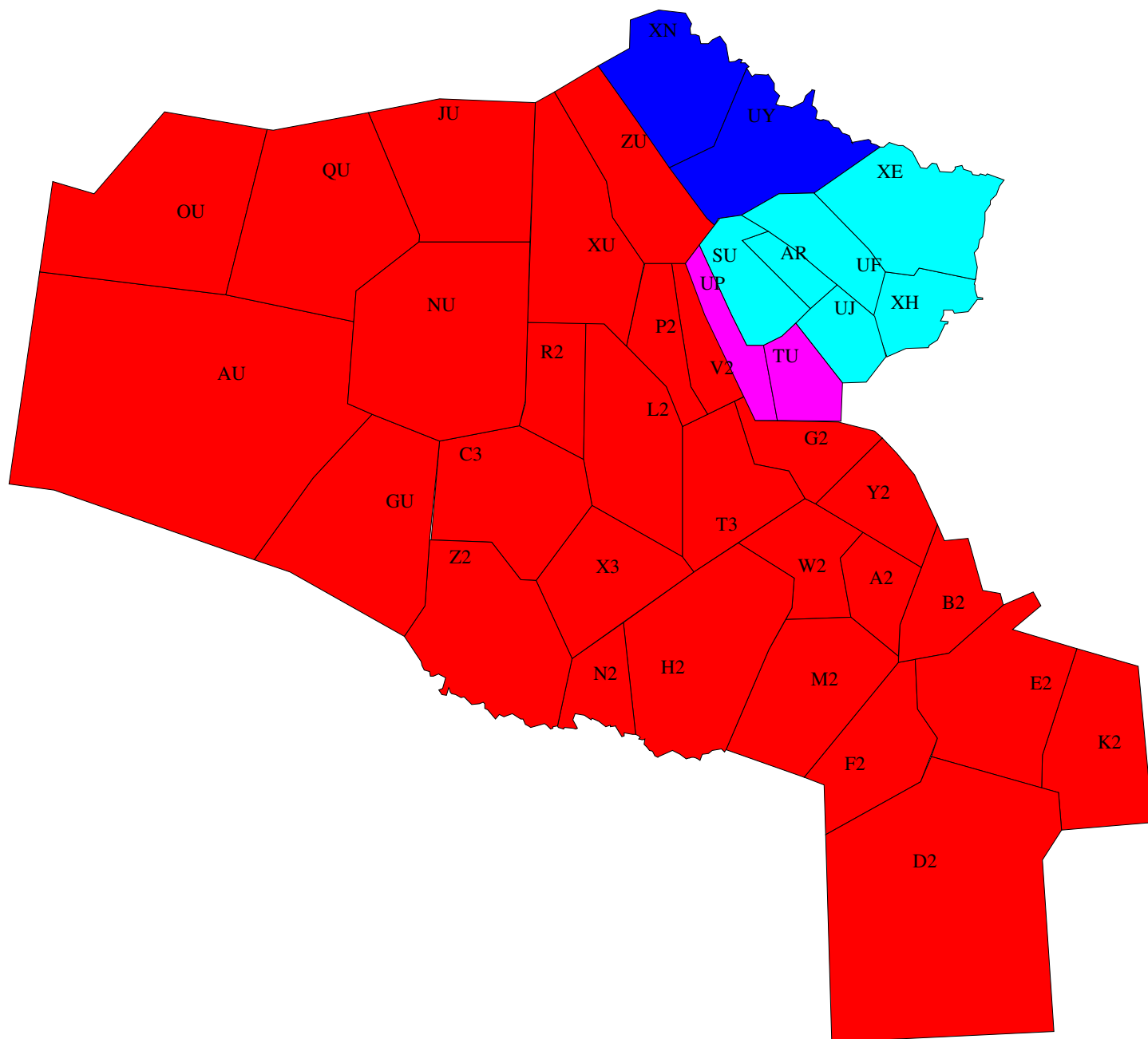


FIG. 4.4 – France : espace supérieur avec 5 zones

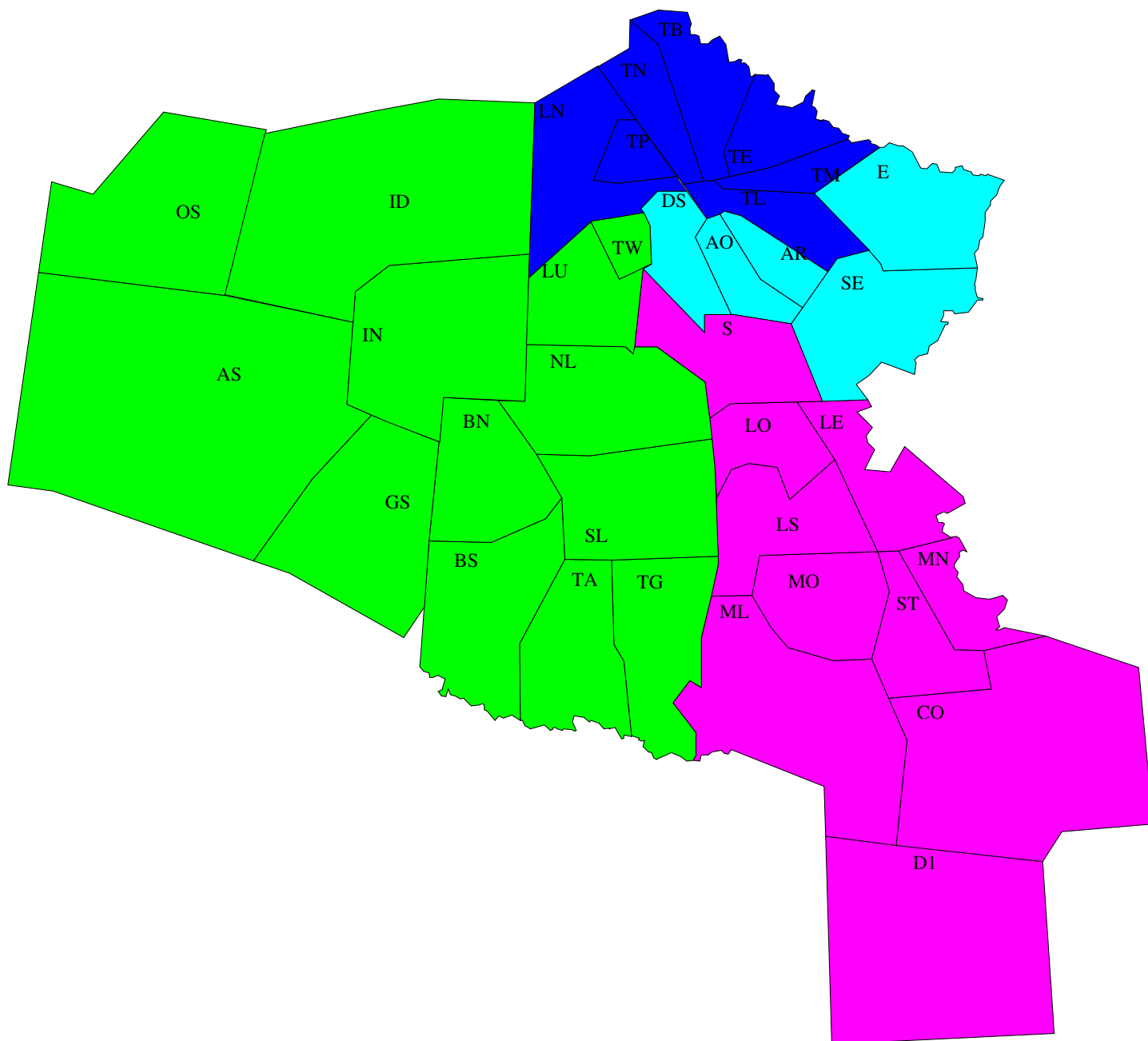


FIG. 4.5 – France : espace inférieur avec 5 zones

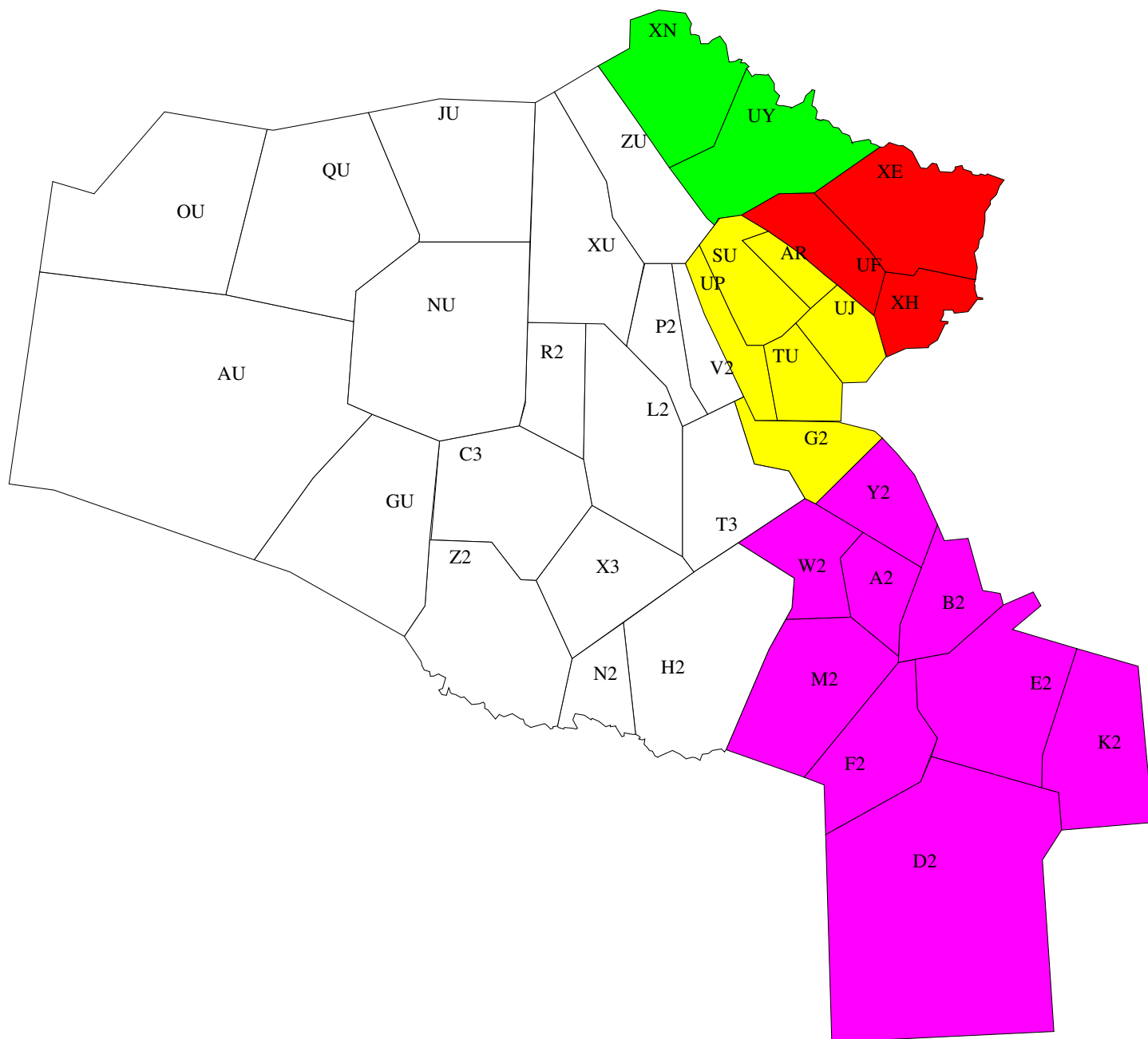


FIG. 4.6 – France : espace supérieur avec 7 zones

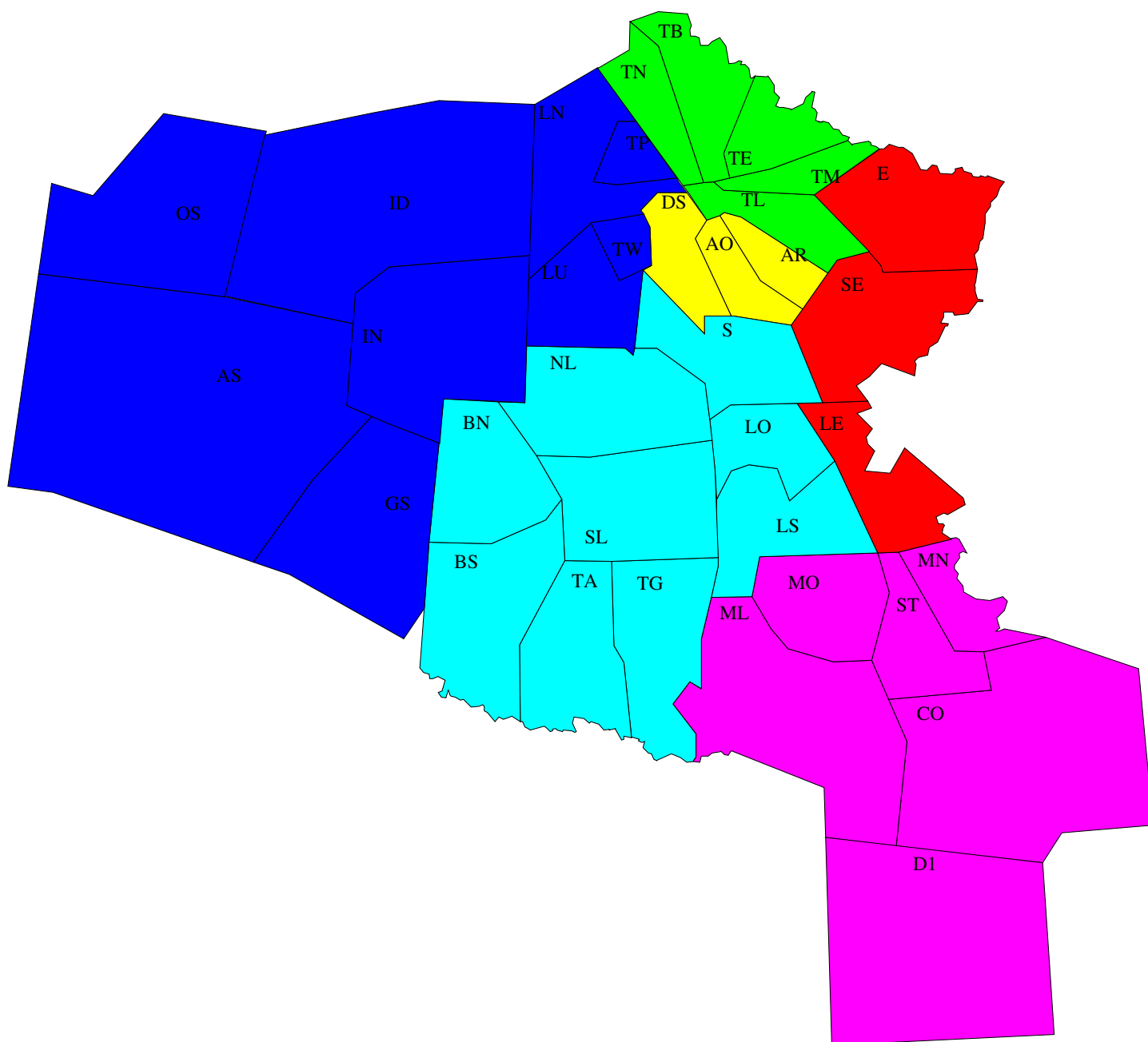


FIG. 4.7 – France : espace inférieur avec 7 zones

4.4 Résultats pour l'Europe

4.4.1 Introduction

Le travail sur l'Europe est beaucoup plus complexe. Le trafic est de l'ordre de 21000 vols par jour, et il y a environ 2250 secteurs élémentaires. D'autre part, la description de l'espace est de moins bonne qualité que celle de l'espace français ; elle comporte une grande quantité de trous, qui perturbe encore davantage la connexité géométrique. Enfin, cette description est différente de celle dont nous disposons pour la France, pour les niveaux inférieurs au 95. En effet, la description des secteurs français dont nous disposons ne prend pas en compte les zones FIS (zones d'information de vol), ni les TMA.

On peut clairement voir la différence pour la France sur les secteurs TN et TB qui sont, dans la description européenne, "transformés" en dessous du niveau 95 en la zone LFQQFIS. De la même façon, la zone d'approche de Paris (LFPTMA) absorbe une grande partie des secteurs d'approche de Paris. Cela n'est pas sans poser quelques problèmes. En effet, la zone LFPTMA absorbe à elle seule quelques 3300 avions par jour, empêchant toute optimisation de type min-max dès que nous approchons des 40 zones, car la zone LFPTMA devient alors systématiquement le point bloquant de l'optimisation.

Cela nous a amené à essayer de modifier le jeu de données européen, en enlevant les zones qui posent problème. Nous avons ainsi développé une description de l'espace qui ignore volontairement une partie de l'espace inférieur (nous appellerons par la suite cette description *espace réduit*). Cela induit malheureusement d'autres problèmes : en effet, en enlevant les zones inférieures, nous supprimons des zones qui assuraient une grande partie de la connexité du graphe. Il devient alors très difficile, voire impossible dans certains cas, de trouver des solutions connexes, surtout lorsque le nombre de zones de qualification est important.

4.4.2 Algorithmes

Le problème européen étant beaucoup plus complexe, l'algorithme avait du mal à construire des solutions connexes. Il est d'ailleurs possible (nous n'avons pas trouvé d'impossibilité théorique) qu'une solution contenant des ensembles non-connexes puisse être meilleure qu'une solution contenant des ensembles tous connexes. Cependant, une solution non connexe est peu satisfaisante "à l'oeil". Nous avons donc modifié l'algorithme de façon à ce qu'il ne génère que des solutions connexes. Pour cela, nous avons écrit une procédure simple vérifiant que les sous-ensembles auxquels nous retirons un secteur restent connexes. Si tel n'est pas le cas, la solution est rejetée systématiquement.

4.4.3 Résultats

Il était difficile de savoir sur quel nombre de zones de qualification il fallait nous baser au niveau européen. Nous avons fait un grand nombre d'expérimentations que nous ne présenterons pas ici, mais nous avons finalement décidé d'essayer d'obtenir un partage de l'espace européen respectant un critère d'environ 3100 vols maximum par zone de qualification. Nous avons choisi ce critère en nous basant sur les résultats de l'étude française, où nous obtenions 3150 vols maximum pour 7 zones.

Comme dit précédemment, les données européennes brutes ne nous ont pas permis d'aboutir. En effet, une optimisation avec 60 zones bute sur la TMA de Paris. La fonc-

tion objectif arrive rapidement à 3497 comme valeur, en plaçant la TMA Paris dans une seule zone, dont le flux est justement de 3497. Nous présentons les résultats avec 60 zones dans les figures 4.8 et 4.9.

Nous avons ensuite utilisé la description “réduite” de l’espace avec 50 zones. Nous obtenons alors 3100 pour valeur de la fonction. Nous présentons les résultats pour l’espace supérieur dans la figure 4.10.

Nous avons ensuite réalisé une autre étude en fixant le nombre de zones à 22. Il s’agissait de comparer avec le système américain qui comprend actuellement 22 centres de contrôle. Les résultats sont présentés sur les figures 4.11 et 4.12.

Une dernière étude nous intéressait énormément : il fallait travailler sur 140 zones, ce qui correspond approximativement au nombre de zones de qualification présentes dans l’espace américain. Malheureusement, l’optimisation sur l’espace complet bute encore une fois sur la TMA de Paris, et l’optimisation sur l’espace “réduit” ne parvient pas à construire de solutions connexes viables. Il faudrait donc effectuer un travail supplémentaire de traitement des données que nous n’avons pas eu le temps de faire.

4.5 La tentative pour les États-Unis

Les problèmes de fiabilité du jeu de données rencontrés sur l’Europe ont été multipliés par dix pour l’espace américain. La connaissance que nous avons des secteurs américains est trop imprécise. Tout d’abord les trous entre secteurs sont nombreux, surtout dans l’espace inférieur où il nous manque les *tracon* (voir le paragraphe 2.4). Mais surtout nous avons beaucoup de chevauchements entre secteurs, qui n’apparaissent pas lors de la visualisation de ces derniers, mais ont surgit dès que nous avons essayé de calculer les flux entre secteurs avec CATS.

Pour mener à bien l’étude des zone de qualification sur l’espace américain, il faudrait soit trouver une autre description plus propre de la sectorisation, soit reprendre à la main les données dont nous disposons afin de les corriger, dans la mesure du possible. Hélas le temps nous a manqué pour finir cette étude.

4.6 Conclusion

Le travail de recherche que j’ai effectué ici est tout à fait préliminaire. Les données de trafic sont partielles, la description de l’espace n’a pas été suffisamment vérifiée, certains des problèmes posés (comme la TMA de Paris) ont été résolus à coups de serpe et l’algorithme lui-même mériterait sans doute d’être amélioré. Enfin, le critère à optimiser (un min/max sur les flux traversant les zones) doit être discuté et certainement enrichi à travers des discussions avec des agents opérationnels.

D’autre part, il faut souligner qu’il existe généralement (et c’est un point que nous n’avons pas évoqué) plusieurs solutions proches en terme de coût, qui sont très différents au niveau de leur représentation géographique. De plus notre modélisation du problème, aussi bonne soit-elle, est forcément réductrice vu la complexité du contrôle aérien. Notre approche, théorique, ne prétend pas donner de solution miracle aux problèmes étudiés, mais se contente d’apporter un nouveau point de vue, généré sous certaine hypothèses simplificatrices. Il faut donc se garder de toute interprétation trop hâtive de nos résultats sur un plan opérationnel.

Cependant, les résultats obtenus montrent bien les possibilités offertes, et le travail commencé ici devra certainement être développé dans les mois à venir.

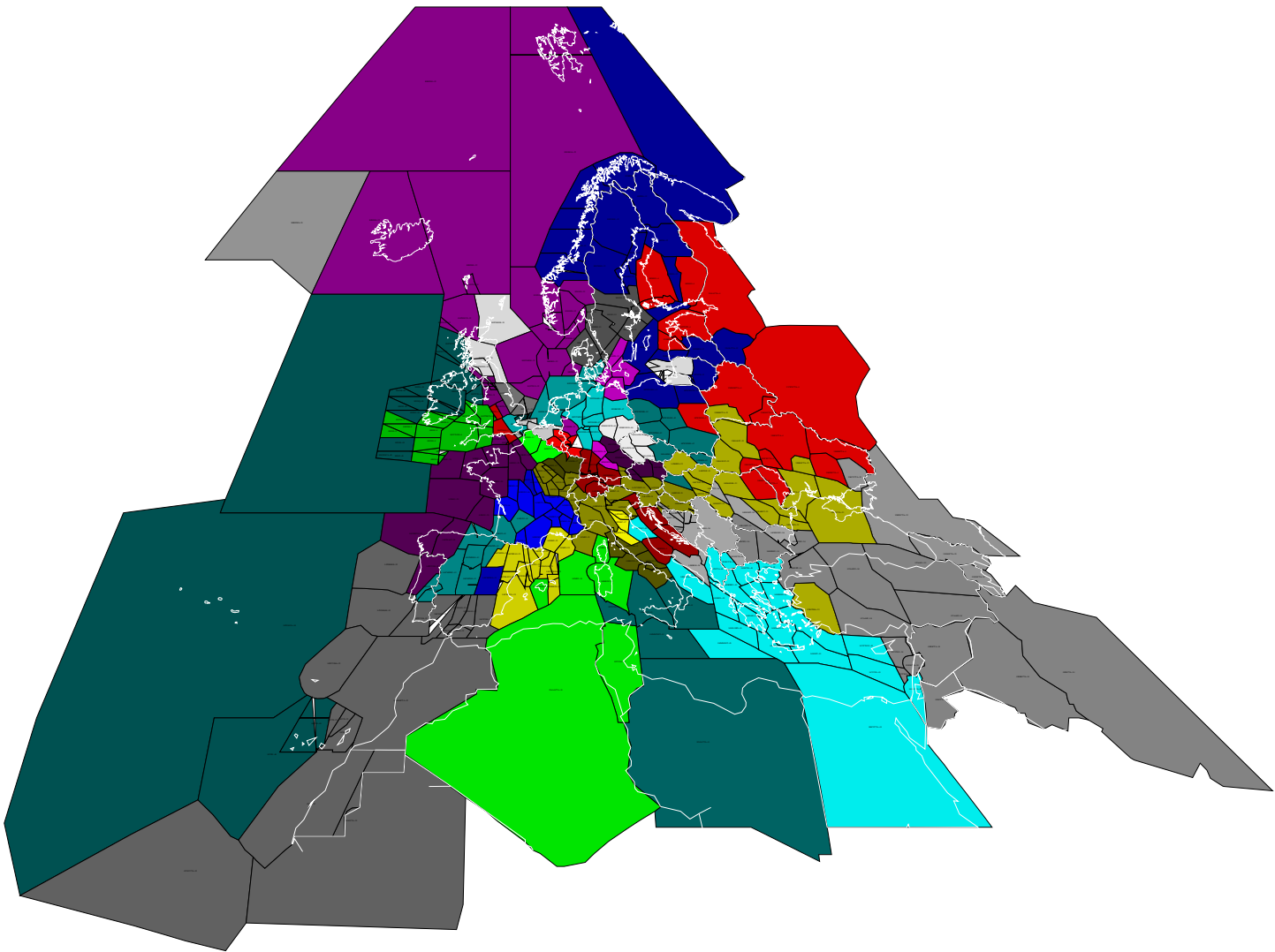


FIG. 4.8 – Espace supérieur avec 60 zones

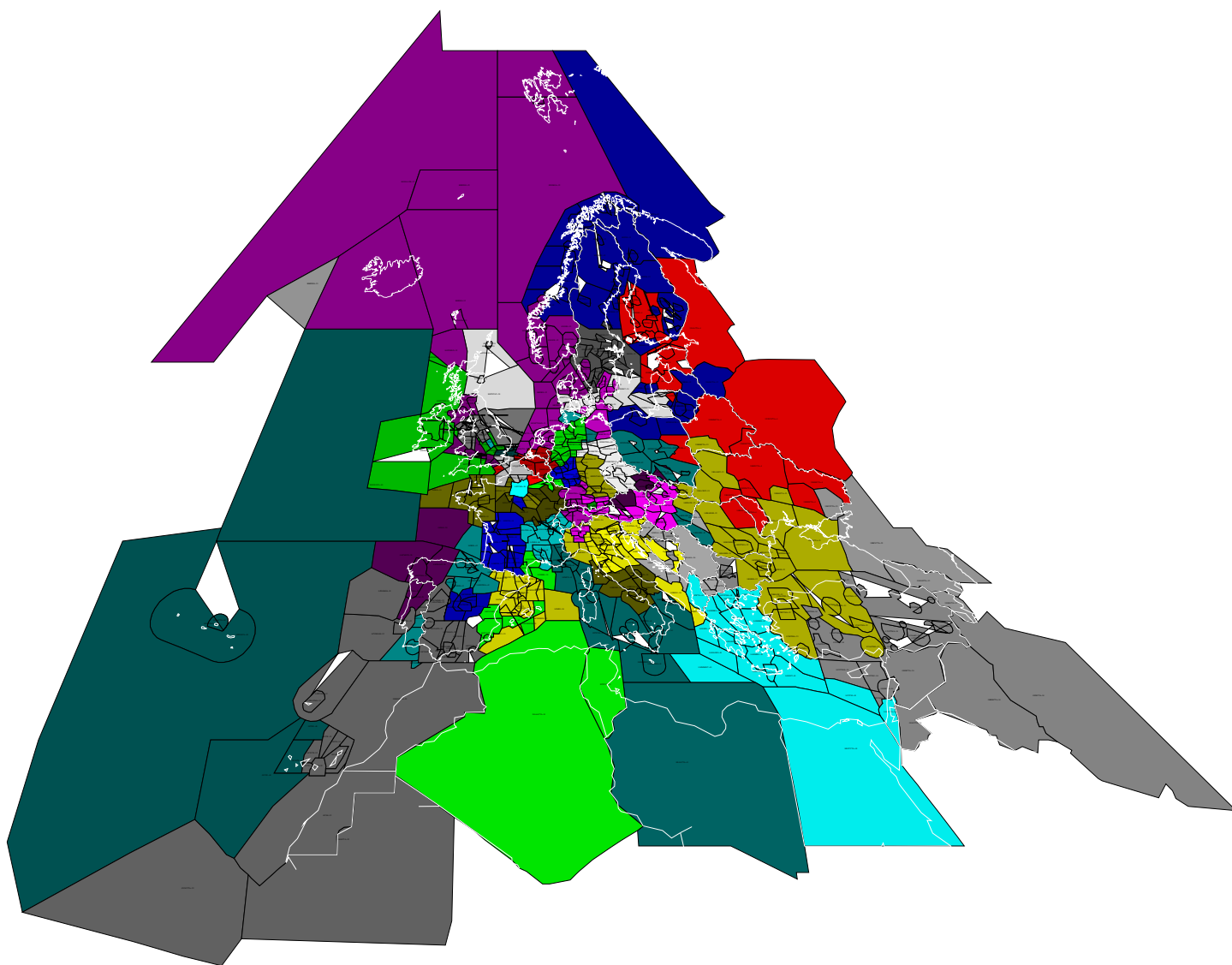


FIG. 4.9 – Espace inférieur avec 60 zones

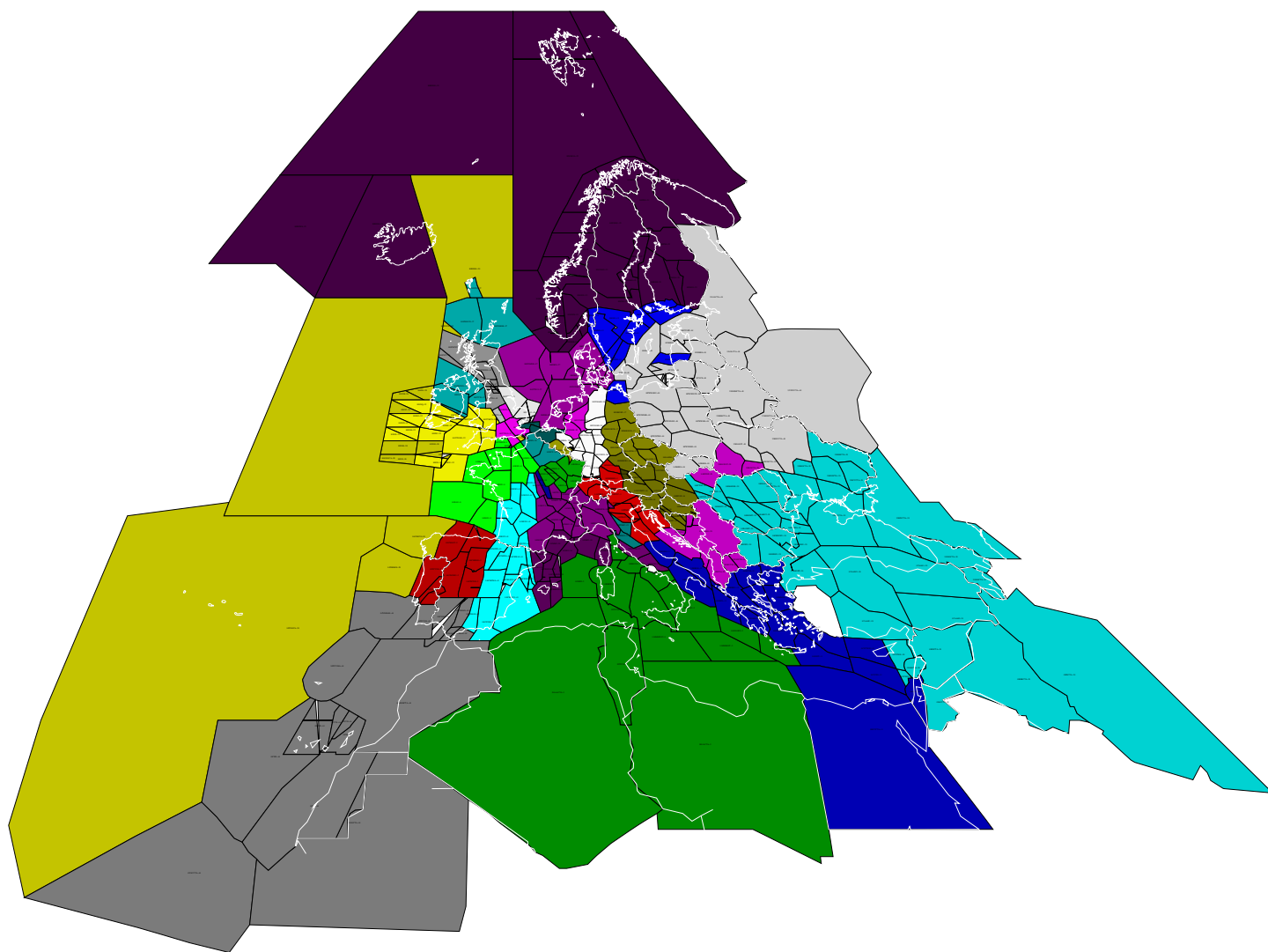


FIG. 4.10 – Espace supérieur avec 50 zones (espace réduit)

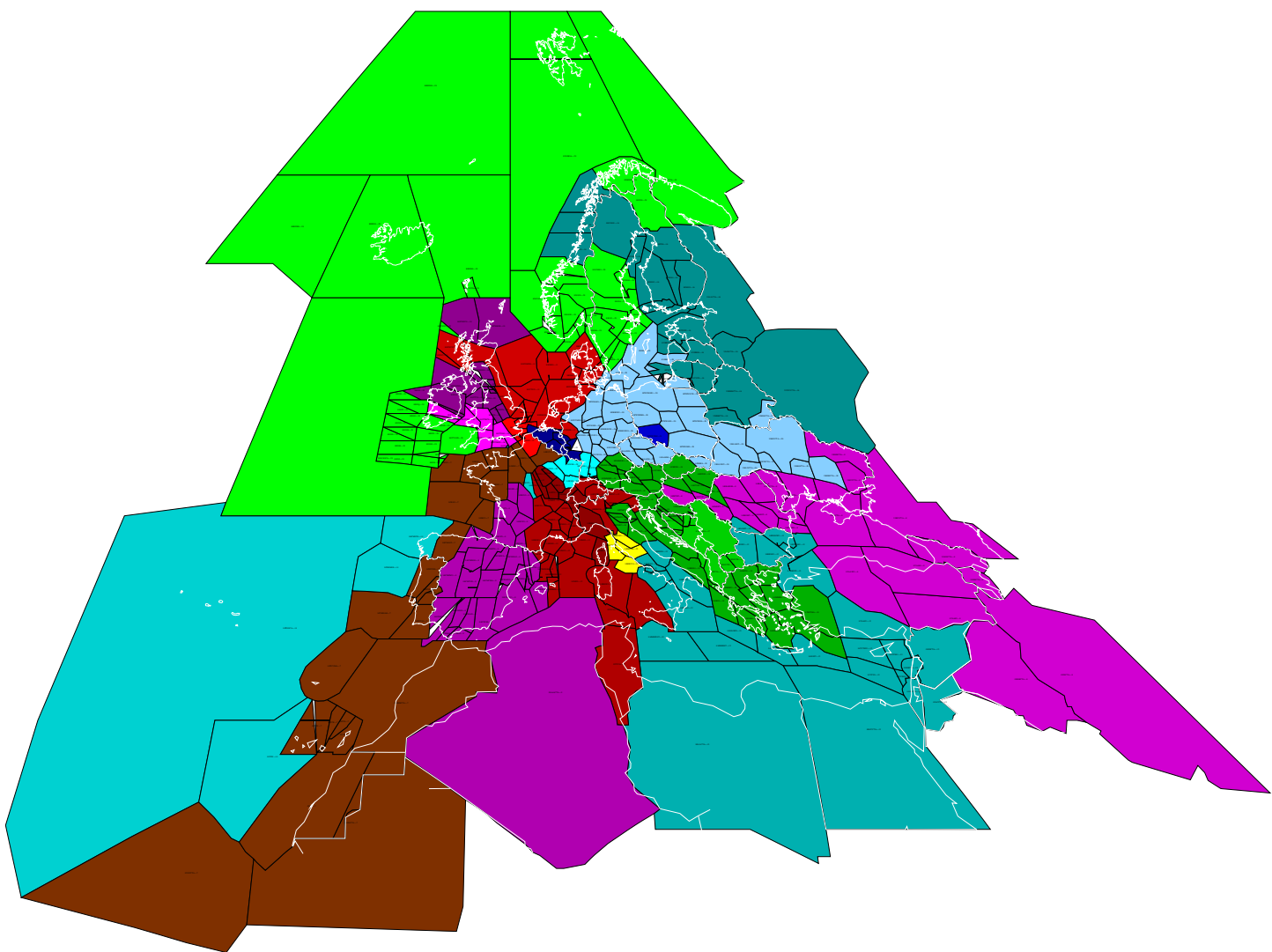


FIG. 4.11 – Espace supérieur avec 22 zones (espace complet)

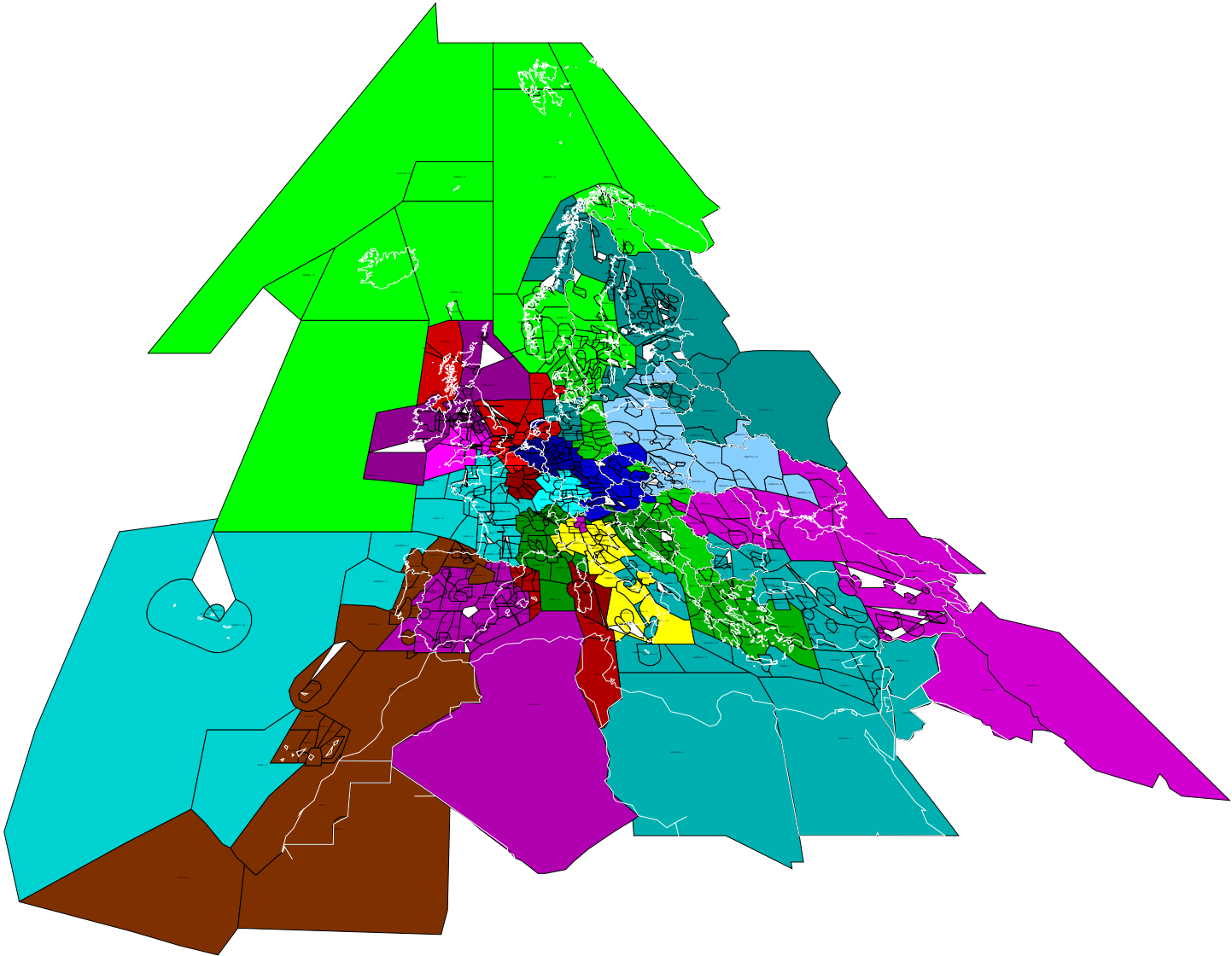


FIG. 4.12 – Espace inférieur avec 22 zones (espace complet)

Glossaire

- ADS-B** : Automatic Dependent Surveillance - Broadcast. Programme de surveillance ATC par Data Link.
- AERA** : Advanced EN-Route ATC. Projet d'automatisation de contrôle en route.
- AMPF** : Airspace Manager Planning Functions. Un composant de AERA utilisé pour planifier l'occupation de l'espace aérien.
- ASAS** : Airborne Separation Assurance System. Système d'aide au maintien de séparation embarqué.
- ASF** : Automated Separation Function. Un composant de AERA utilisé pour séparer les paires d'avions.
- ATC** : Air Traffic Control. Contrôle du trafic aérien.
- ATFM** : Air Traffic Flow Management. Gestion des flux de trafic aérien.
- ATMS** : Air Traffic Management System. Système de gestion du trafic aérien.
- BADA** : Base of Aircraft Data. Base de données avion utilisée pour la simulation de vol.
- CASA** : Computer Assisted Slot Allocation. Système d'allocation de créneau.
- CATS** : Complete Air Traffic Simulator. Simulateur de trafic aérien.
- CAUTRA** : Coordonnateur AUtomatique TRafic Aérien
- CENA** : Centre d'Etudes de la navigation Aérienne.
- CFMU** : Central Flow Management Unit. Cellule européenne de gestion des flux de trafic.
- CNS** : Communication Navigation and Surveillance.
- Data-Link** : Liaison de données. Terme généralement employé dans le domaine aéronautique pour désigner les liaisons de données sol-air ou air-air, afin de renseigner soit les systèmes sols, soit les autres avions sur l'état et/ou les intentions d'un avion donné.
- DGAC** : Direction Générale de l'Aviation Civile.
- EATMS** : European Air Traffic Management System. Futur système européen.
- EFR** : Extended Flight Rules. Règles de vol étendues utilisées dans Free-R.
- ENAC** : Ecole Nationale de l'Aviation Civile.
- EOBT** : Estimated Off-Block Time. Heure estimée du départ du parking.
- FAA** : Federal Aviation Administration. Organisme américain de l'administration de l'aviation.
- FANS** : Futur Air Navigation System. Comité issu de l'OACI chargé de traiter des concepts de gestion de trafic.

- FFA** : Free-Flight Airspace. Espace aérien réservé au Free-Flight.
- FMP** : Flow Management Position. Cellule de gestion des flux du trafic aérien d'un centre de contrôle travaillant en collaboration avec la CFMU.
- FMS** : Flight Management System. Système embarqué de gestion du vol (paramètres, poussée, consommation, type de croisière...)
- FREER** : Free Route Experimental Encounter Resolution. Projet de vol free-flight d'Eurocontrol.
- GPS** : Global Positioning System. Système de positionnement par satellite provenant du département de la défense américain.
- HIPS** : Highly Interactive Problem Solver
- IFR** : Instrument Flight Rules. Règles de vol aux instruments.
- MOM** : Maneuver Option Manager. Un composant de AERA utilisé pour gérer un ensemble de manoeuvre.
- OACI** : Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ICAO International Civil Aviation Organization).
- STD** : Standard Traveled Distance. Distance moyenne parcourue.
- STIP** : Système de Traitement Initial Plan de vol.
- STT** : Standard Transit Time. Temps de transit moyen.
- TCAS** : Traffic alert and Collision Avoidance System. Système anti-abordage embarqué à bord des avions.
- TMA** : Terminale Maneuvering Area. Région de contrôle terminale. Région de contrôle établie en principe au carrefour de routes ou aux environs d'un ou plusieurs aéroports importants.
- VFR** : Visual Flight Rules. Règles de vol à vue.

Bibliographie

- [ABDM97] JM Alliot, JF Bosc, N Durand, and L Maugis. Cats : A complete air traffic simulator. *16th DASC*, 1997.
- [AGP02] J.M. Alliot, G. Granger, and J.M. Pomeret. Arithmetic simulation and performance metrics. In *Digital Avionics System Conference*, 2002.
- [BB00] Nicolas Barnier and Pascal Brisset. Allocation de créneaux pour la régulation du trafic aérien. In *JFPLC*, 2000.
- [Cha01] Franck Chatton. Etudes de nouvelles métriques de complexité de la navigation aérienne. Rapport de DEA, Ecole Nationale de l'Aviation Civile, 2001.
- [DAG99b] N. Durand, J.M. Alliot, and G. Granger. Peut-on supprimer le contrôle au sol. *La recherche*, Avril 1999.
- [DAG01] Nicolas Durand, Jean-Marc Alliot, and Géraud Granger. A statistical analysis of the influence of vertical and ground speed errors on conflict probe. In *Proceedings of the 4th USA/Europe R and D Seminar*, 2001.
- [DAM00] N. Durand, J.M. Alliot, and F. Medioni. Neural nets trained by genetic algorithms for collision avoidance. *Applied Artificial Intelligence*, 2000.
- [DAN96] N. Durand, J.M. Alliot, and J. Noailles. Collision avoidance using neural networks learned by genetic algorithms. In *Ninth International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*, Fukuoka, 1996.
- [Dur96] Nicolas Durand. *Optimisation de trajectoires pour la résolution de conflits en route*. Thèse de doctorat, INPT, 1996.
- [Gol89] David Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989. ISBN : 0-201-15767-5.
- [Hol62] John Holland. Outline for a logical theory of adaptative systems. *Journal for the Association of Computing Machinery*, 3, 1962.
- [Ing89] L. Ingber. Very fast simulated reannealing. *Journal of Mathematical Computing Modelling*, 12, 1989.
- [Kir83] S. Kirkpatrick. Optimization by simulated annealing. *Science*, 13 May 1983.
- [Mar02] David Marsh. Air traffic statistics and forecasts (statfor) : Medium-term forecast of annual number of IFR flights (2002-2009). Technical report, EUROCONTROL, 2002.
- [Méd98] Frédéric Médioni. *Méthodes d'optimisation pour l'évitement aérien : systèmes centralisés, systèmes embarqués*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 1998.

- [Met53] N. Metropolis *J. Chem. Phys.*, vol 21, 1953.
- [Rog00] Guillaume Roger. Optimisation des routes alternatives et évaluations des retards. Rapport de DEA, Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), 2000.