

## Note NT05-151

### La famille de simulateurs arithmétiques OPAS

#### Résumé

Cette note a pour but de présenter les différents outils de simulation développés dans le cadre du projet « Simulations » au sein du programme « Performance et Simulations » de la SDER, division RFM. Les objectifs et les fonctionnalités de ces simulateurs sont décrites et des exemples d'études où ils ont été utilisés sont aussi fournis.

On parlera à présent de « famille OPAS » pour désigner l'ensemble des 3 simulateurs existants : OPAS-en-route, OPAS-TMA et OPAS-couplé. Auparavant, le nom OPAS correspondait à la version en-route mais dorénavant cet acronyme est réservé à la famille d'outil et le simulateur en-route est appelé naturellement OPAS-en-route.

Ce document donne aussi un bref aperçu des outils annexes qui ont été développés pour analyser les résultats de simulation et voir les trajectoires produites.

<b>CENA : PAGE D'IDENTIFICATION ET DE SUIVI</b>			
<b>Référence</b>	NT05-151	<b>Version</b>	1.0
<b>Marché</b>		<b>Société</b>	
<b>Tranche ou Bon de Commande</b>		<b>Date de publication</b>	18/08/2005
<b>Identification Alternative</b>		<b>Logiciels utilisés</b>	MS Word 2000
	<b>Nom</b>	<b>Signature</b>	<b>Date</b>
<b>Rédigé par :</b>	Yann Le Fablec		16/05/2005
<b>Revu par :</b>	Benoît Rulleau		17/08/2005
<b>Autorisé par :</b>			
<b>Destinataires :</b>		<b>Copies :</b>	

Résumé.....	1
1 Présentation de la famille OPAS.....	4
2 Points communs entre les différents simulateurs.....	6
2.1 Au niveau du code.....	6
2.2 Au niveau de leur utilisation .....	6
3 OPAS-en-route .....	8
3.1 Généralités .....	8
3.2 Fonctionnalités .....	8
3.3 Fonctionnement du simulateur .....	9
3.4 Indicateurs disponibles.....	10
3.4.1 Indicateurs élémentaires .....	10
3.4.2 Métriques INTEGRA .....	11
3.4.3 Charge de travail .....	11
3.5 Autres sorties d'OPAS-en-route .....	12
3.6 Exemples d'études réalisées.....	13
3.6.1 Mise en place du RVSM .....	13
3.6.2 Projet européen MFF .....	13
3.6.3 Blocs fonctionnels d'espace (FAB) .....	13
3.6.4 Etudes sur les rallongements de trajectoires.....	13
4 OPAS-TMA.....	15
4.1 Généralités .....	15
4.2 Fonctionnalités .....	15
4.3 Déroulement d'une étude .....	16
4.4 Fonctionnement du simulateur .....	16
4.5 Indicateurs disponibles.....	17
4.6 Autres sorties d'OPAS-TMA .....	18
4.7 Exemples d'études et modélisations réalisées .....	18
4.7.1 Dispositif CLARINES sur l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry .....	18
4.7.2 Etude de bruit sur les départs Sud d'Orly.....	19
4.7.3 Etudes en région toulousaine .....	19
4.7.4 Plate-formes modélisées.....	19
5 OPAS-couplé .....	20
5.1 Généralités .....	20
5.2 Fonctionnalités .....	20

---

5.3	Sorties .....	20
5.4	Exemple d'étude réalisée .....	21
6	Outils annexes.....	22
6.1	OPAS-ESPRIT .....	22
6.2	OPAS-ARTS.....	23
6.3	REGARDS .....	25
6.4	Autres outils.....	26
7	Développements futurs de la famille OPAS.....	28
	Bibliographie.....	30

## 1 Présentation de la famille OPAS

L'acronyme OPAS signifie Outils de Planification ATM et de Simulation. Il désigne des outils logiciels de simulation numérique du trafic aérien. On parle aussi de simulateurs arithmétiques ou temps accéléré (Fast-Time Simulator ou FTS en anglais). Un simulateur arithmétique de trafic reproduit le déplacement des avions à partir de données de performance associées au type avion considéré en suivant un plan de vol. Le fonctionnement d'un outil de ce type nécessite la prise en compte d'autres informations telles que la définition des positions des balises et des aéroports apparaissant dans les plans de vol, ainsi que la sectorisation. Sur la base de ces éléments, le simulateur « fait voler » les avions et mesure ce qui arrive à ces derniers. On détecte ainsi tous les éléments de nature géométrique du type entrée/sortie de secteur, passage d'une balise, conflit. De plus, on peut aussi demander à éviter les conflits qui ont été détectés. On dispose alors en fin de simulation non seulement des trajectoires des aéronefs mais aussi de toute une batterie d'indicateurs qui permettent de quantifier ce qui a eu lieu au cours de la simulation.

La famille OPAS est composée de trois simulateurs :

- **OPAS-en-route** dont le champ d'application concerne l'en-route ;
- **OPAS-TMA** qui est destiné à la simulation en zone d'approche ;
- **OPAS-couplé** qui réunit les deux précédents et permet par conséquent de simuler tout l'espace aérien.

L'utilisation de ces outils permet de tester et d'évaluer la mise en place de nouveaux concepts ou dispositifs de circulation aérienne. Ils sont capables de fournir divers indicateurs liés à l'écoulement du trafic lors des simulations, ces indicateurs pouvant contribuer à la mesure de performance. Ils peuvent par exemple être utilisés pour tester différents scénarios possibles afin de choisir celui qui semble le plus approprié pour résoudre le problème posé. Ensuite, si l'on veut obtenir des résultats très détaillés sur ce scénario, on peut employer des simulations temps réel qui sont plus précises et plus réalistes, mais qui sont dans le même temps plus coûteuses à mettre en place et prennent beaucoup plus de temps. L'intérêt des simulateurs arithmétiques réside dans le fait qu'ils sont capables de simuler plusieurs journées de trafic en un temps raisonnable : ils fonctionnent en temps accéléré.

D'autres simulateurs du même type existent, les plus couramment utilisés étant **TAAM** (Total Airspace and Airport Modeller) et **RAMS** (Reorganized ATM Mathematical Simulator), mais les simulateurs de la famille OPAS présentent deux types d'intérêts que n'ont pas ces autres outils :

- ils sont légers et flexibles,
- ce sont des outils pleinement maîtrisés par la SDER.

Le fait de disposer du code source permet de leur apporter des évolutions suivant les besoins, et ce de manière aisée.

D'un point de vue historique, les premiers développements en 1995 ont concerné la version en-route et ont été conduits par le Laboratoire d'Optimisation Globale (laboratoire commun ENAC/SDER) avec l'outil CATS. A présent, il est utilisé et

enrichi à la fois par le LOG et la division Routes, Flux et Modélisation de la SDER au fur et à mesure des études réalisées.

La version approche d'OPAS a commencé à voir le jour en 2001. L'élément déclencheur de cette version a été une demande de la DO (SCTA à l'époque) qui avait besoin d'un outil de simulation en TMA plus performant et surtout plus réaliste que l'outil utilisé à l'époque pour ce type de simulation (TAAM). Lors des études sur la réorganisation de l'espace parisien en 2001, l'équipe Espace du SCTA avait en effet noté les carences de leur outil et a indiqué à la division RFM qu'une version TMA d'OPAS aurait été très utile. Depuis, OPAS-TMA a été développé et utilisé avec succès sur différentes plate-formes telles que Lyon, Roissy-Charles de Gaulle et Orly.

Enfin, il est apparu nécessaire de pouvoir utiliser OPAS-en-route et OPAS-TMA de manière conjointe afin de pouvoir par exemple réaliser des simulations mêlant l'en-route et l'approche. Cette version, appelée OPAS-couplé, a été développée à partir de fin 2003 pour réaliser des simulations dans le cadre du projet européen Gate2Gate.

Ces outils sont utilisés dans le cadre d'études mais ne sont pas pour autant figés : ils sont régulièrement améliorés et étendus en fonction des besoins mis au jour par ces mêmes études. De plus, différentes interfaces graphiques ont été développées afin de simplifier leur utilisation et les rendre plus conviviaux, le but étant à terme de fournir ces outils à d'autres équipes à l'intérieur de la DTI et de la DO pour qu'elles puissent s'en servir et réaliser les simulations arithmétiques dont elles ont besoin.

## 2 Points communs entre les différents simulateurs

Même si leurs champs d'action sont différents, les trois outils de la famille de simulateurs arithmétiques OPAS partagent un grand nombre de points communs tant au niveau technique que de leur utilisation.

### 2.1 Au niveau du code

Tous les composants de la famille OPAS sont écrits en langage Objective Caml (OCaml). Ce langage, développé par l'INRIA<sup>1</sup>, permet la programmation de style fonctionnel, impératif ou orienté objets.

Une grande partie du code d'OPAS-en-route et d'OPAS-TMA est commune. De plus, comme ils sont tous les trois développés par la division RFM de la SDER qui les maîtrise parfaitement, il est facile de faire migrer les améliorations apportées à l'un des simulateurs vers un autre.

En ce qui concerne les parties de code communes, on compte :

- La gestion des données du type base de performances avions (BADA), balises, aéroports, sectorisation, zones restreintes ou plans de vol (puisque ces données sont les mêmes pour OPAS-en-route et OPAS-TMA). On notera que les fonctions de lecture de ces données sont placées dans une librairie partagée qui sait gérer tous les types dont la divisions RFM dispose. Ainsi, les outils de la famille OPAS savent lire des informations provenant du système COURAGE, de la CFMU, des systèmes américains ou encore d'autres simulateurs tels que TAAM ou RAMS. Toutefois, certaines données ne sont utilisées que par un simulateur, on pense à celles définissant les procédures d'approche ou de décollage notamment.
- Le déplacement des avions. La base de performances tabulée BADA étant utilisée par les différents outils, les fonctions associées de déplacement d'un aéronefs sont les mêmes.
- Les fonctions de nature géométrique déterminant par exemple dans quel volume (secteur ou zone militaire) se trouve un avion sont elles aussi partagées.

De plus, le temps est discrétisé dans tous les simulateurs : les avions avancent par pas de temps. Par exemple, cela signifie que lorsque l'on veut réaliser une simulation en-route entre 10h00 et 12h00 avec un pas de temps égal à 10s, l'intervalle de temps à simuler est découpé en 720 parties de 10s et les avions avancent de 10s à chaque fois.

### 2.2 Au niveau de leur utilisation

Les méthodes utilisées pour réaliser des études avec les outils de la famille OPAS sont très proches.

---

<sup>1</sup> <http://caml.inria.fr/index.fr.html>

Tout d'abord, il y a toujours une phase de traitement des données : sélection des vols qui seront simulés, éventuellement augmentation de ce trafic.

Ensuite, chaque simulateur produit à la fois des trajectoires (qui sont bien évidemment sauvées dans le même format) et des indicateurs élémentaires ou composites qui sont pour un certains nombre communs à tous les outils OPAS.

Enfin, on simule quasiment toujours un scénario que l'on appelle « référence » puis un scénario « modifié », avant de comparer les indicateurs évalués par les outils dans les deux cas pour déterminer quelles sont les différences entre les deux scénarios. Le scénario « modifié » peut correspondre par exemple à l'introduction d'un nouveau concept affectant le vol des avions (Free-Route) ou bien encore à de nouvelles procédures d'approche.

Malgré tous ces points communs, OPAS-en-route et OPAS-TMA sont deux outils distincts car pour des raisons techniques ils n'ont pas la même logique de fonctionnement comme cela sera décrit dans la suite.

## 3 OPAS-en-route

### 3.1 Généralités

Comme cela a été précisé plus tôt, le plus « ancien » des outils OPAS est dédié à la simulation de l'espace en-route. Il est capable de faire voler les avions depuis leur aéroport de départ jusqu'à leur destination, mais les phases initiales et finales ne sont pas simulées fidèlement (les avions ne suivent pas les SID ni les STAR). La simulation fine de ces phases de vol est du ressort d'OPAS-TMA comme nous le verrons plus loin dans ce document.

### 3.2 Fonctionnalités

En ce qui concerne la gestion des conflits entre avions, lors d'une simulation avec OPAS-en-route, il est possible soit de ne rien faire, soit de se contenter de les détecter pour les comptabiliser, soit encore de les éviter. Dans le cas d'une détection simple, tous les paramètres liés au conflit sont enregistrés : avions concernés ainsi que les types, caps, vitesses, positions 3D et attitudes de ces avions, secteurs où ces derniers se trouvent et temps de début et de fin du conflit. Si l'évitement de conflit est activé, alors l'utilisateur peut choisir parmi les différentes méthodes proposées.

On notera que les algorithmes d'évitement disponibles ont été développés par le Laboratoire d'Optimisation Globale. Parmi ceux-ci, on trouve deux méthodes centralisées ainsi qu'un algorithme de résolution embarqué. Ces méthodes de résolution emploient pour la plupart des algorithmes génétiques.

Les normes de séparation prises en compte sont évidemment paramétrables et peuvent être différentes suivant les zones de l'espace.

Les conflits entre avions sont classés en 8 types différents par le simulateur. Tout d'abord, quatre types de croisements sont définis :

- Dépassement
- Face à face
- Croisement à angle faible
- Autre croisement

Ensuite, chacun de ces types de croisements correspondent à deux types de conflits : un correspondant au cas où les deux avions sont stables et un second lorsque l'un des deux avions au moins est évolutif.

Au total, cela fait donc  $(4 \text{ types de croisements}) \times (2 \text{ cas par type}) = 8 \text{ types de conflits différents}$ .

L'outil est de plus capable de réaliser un évitement automatique de zones géométriques 3D fixes. Cela peut servir par exemple à contourner de manière automatique et optimale en terme de distance des zones militaires.



En plus de ces fonctionnalités que l'on retrouve dans d'autres simulateurs, d'autres possibilités ont été ajoutées à OPAS-en-route au fur et à mesure des études. Nous avons dit combien il est aisé d'améliorer le simulateur puisque son code informatique est disponible et maîtrisé. Ainsi, avec un minimum d'expérience il est possible de modifier le comportement de l'outil et son moteur de navigation pour, par exemple, changer la façon dont les avions volent.

Cela a permis d'ajouter à OPAS-en-route les capacités de :

- Faire voler les avions en route directe depuis l'aéroport de départ jusqu'à l'arrivée ou bien à l'intérieur d'une zone prédéfinie (aussi bien géographiquement qu'en niveaux). Cette fonctionnalité a été développée et utilisée dans le cadre du projet européen Mediterranean Free Flight (MFF).
- Simuler le concept de croisement ASAS (*ASAS Crossing*). Ce mode d'évitement a lui aussi été développé pour réaliser des simulations pour MFF.
- Simuler le concept d'espacement ASAS (*ASAS Spacing*). Cette fonctionnalité a été intégrée à OPAS-en-route dans le cadre du projet européen Gate2Gate. On verra pour plus d'information à ce sujet la partie 5.2 de ce document.

### 3.3 Fonctionnement du simulateur

Dans le cas standard, une simulation OPAS-en-route passe par les étapes suivantes.

**Initialisation** : lecture des données et autres paramètres de configuration de l'outil.

La **simulation** proprement dite qui consiste à faire voler les avions depuis leur aéroport de départ jusqu'à leur aéroport d'arrivée en respectant les performances liées au type de chacun. Le temps est discrétisé et tous les aéronefs se déplacent d'un pas de temps simultanément (ce pas de temps étant par défaut égal à 10s avec OPAS-en-route). Pendant cette phase interviennent aussi la détection et éventuellement l'évitement des conflits ainsi que l'enregistrement des autres événements lié au vol du type entrée secteur ou passage balise.

Phase de « **post-processing** ». Cette étape permet d'apporter un peu plus de réalisme en corrigeant certaines affectations d'évènements aux secteurs.

Lorsque l'on simule un nouveau concept, du type Free-Route, il peut arriver que les avions traversent un secteur pendant un laps de temps très court égal à quelques pas de temps seulement. Dans la réalité, l'avion ne serait probablement pas comptabilisé mais passé directement du secteur précédent au suivant. Un paramètre existe dans l'outil qui précise la durée minimale de traversée secteur pour qu'un avion soit comptabilisé dans le secteur (par défaut 1 minute). Lors de la phase de post-processing, un avion qui serait resté moins de ce temps dans un secteur S2 serait considéré comme se trouvant toujours dans le secteur précédent S1. Ainsi, tous les événements pouvant avoir été comptabilisés pour cet avion dans S2 sont mis au crédit du secteur S1.

De même, dans la réalité, le contrôleur ayant en charge un secteur S1 n'enverra pas tels quels deux avions qu'il a en fréquence vers un autre secteur S2 s'il prévoit qu'il y aura conflit juste après l'entrée de ces avions dans S2. Il règlera le conflit avant de les envoyer à son collègue en aval. Pour prendre en compte cela, le simulateur propose de régler un paramètre, égal par défaut à 5 minutes, qui indique que si dans le secteur S2 il y a conflit entre deux avions provenant du même secteur S1 moins de 5 minutes après l'entrée du premier, alors le conflit est réaffecté au secteur S1 et non pas à S2.

**Sauvegarde** : les trajectoires simulées et tous les indicateurs calculés sont sauvés dans des fichiers. L'**évaluation de la charge de travail** est effectuée dans cette étape, une fois que tous les événements ont éventuellement été réaffectés dans les bons secteurs lors de la phase de « post-processing ».

Ensuite, les trajectoires peuvent être rejouées à l'aide de l'outil OPAS-ARTS et les indicateurs traités par Excel ou d'autres programmes de statistiques.

### 3.4 Indicateurs disponibles

Parmi les indicateurs produits par OPAS-en-route, on compte deux types : les indicateurs que l'on appelle élémentaires et qui ne relèvent que d'un comptage simple d'évènements, et les indicateurs que l'on appelle composites, qui sont en général une combinaison d'indicateurs élémentaires.

#### 3.4.1 Indicateurs élémentaires

La liste exhaustive des indicateurs élémentaires à l'issue d'une simulation en-route est fournie ci-après.

##### Au niveau global :

Les indicateurs suivants sont évalués sur l'ensemble des secteurs étudiés. Ils peuvent en plus être calculés sur un sous-ensemble de secteurs défini par l'utilisateur. Ces indicateurs comprennent :

- le temps total de vol cumulé pour l'ensemble des avions dans les secteurs d'étude ;
- la distance volée cumulée sur l'ensemble des avions dans les secteurs ;
- le nombre de conflits total ;
- le nombre de conflits par type ;
- le nombre de conflits moyen par secteur.

##### Au niveau de chaque secteur d'étude :

- le nombre total d'avions entrant dans le secteur et le nombre moyen par heure ;
- le nombre maximum d'avions présents simultanément dans le secteur ;
- le nombre maximum d'avions entrant dans une période de une heure ;
- le nombre total d'avions sortant du secteur ;
- le nombre total d'avions entrant dans le secteur en évolution ;
- le nombre total d'avions sortant du secteur en évolution ;
- le temps total de traversée pour l'ensemble des avions passant par le secteur ;
- le temps moyen de traversée par avion ;
- la distance totale parcourue par l'ensemble des avions passant par le secteur ;
- la distance moyenne par avion ;

- le nombre total de conflits détectés ainsi que le nombre de conflits de chaque type ;
- le nombre d'avion entrant par tranche horaire et par tranche d'un quart d'heure. On dispose ainsi facilement du graphe de charge pour le secteur ;
- le nombre de conflits par tranche horaire et par tranche d'un quart d'heure.

On notera que la consommation de carburant n'est pas calculée actuellement, mais il est prévu de la rajouter à cette liste d'indicateurs. De manière plus générale, tous les autres indicateurs qui pourraient être basés sur des considérations géométriques ou sur les performances avions peuvent être ajoutés facilement au simulateur.

### 3.4.2 Métriques INTEGRA

Les métriques de *safety* **INTEGRA**, la *propensity* et la *resilience* sont évaluées. Ce sont des indicateurs composites. Des fichiers Excel sont produits par le simulateur. Tous les paramètres liés à l'évaluation de ces métriques peuvent être modifiés par l'utilisateur.

Le lecteur intéressé pourra se reporter au site Web du projet CARE/INTEGRA à l'adresse suivante :

[http://www.eurocontrol.int/integra/public/subsite\\_homepage/homepage.html](http://www.eurocontrol.int/integra/public/subsite_homepage/homepage.html)

Ce site regroupe les documents décrivant toutes les métriques développées dans le cadre d'INTEGRA.

### 3.4.3 Charge de travail

Une évaluation de la charge de travail du contrôleur est disponible dans OPAS-en-route. Cette évaluation de la charge de travail est exprimée en minutes et correspond au temps où le contrôleur est occupé par la gestion des avions qu'il a en fréquence.

Pour l'évaluation de la charge de travail on considère qu'elle est constituée de trois composantes : la charge de coordination, la charge de surveillance et enfin la charge liée à la gestion des conflits. Chacune de ces composantes dispose de ces paramètres propres, appelés poids, qui sont entièrement modifiables par l'utilisateur. Ces poids indiquent pour chaque type d'action de la part du contrôleur le temps pris pour les effectuer. La charge de travail est donc au final un somme pondérée d'évènements. C'est généralement de cette manière que les autres simulateurs arithmétiques tels RAMS ou TAAM définisse cette quantité.

#### 3.4.3.1 Charge de surveillance

En ce qui concerne la charge de surveillance, elle est évaluée en affectant une valeur temporelle à chacun des évènements suivants :

- passage d'une balise ;
- instant de début de descente ;
- instant de fin de montée ;
- arrivée à un CFL.

Le calcul de la charge de surveillance affecte de plus un poids aux différentes attitudes possibles des avions dans le secteur considérée : montée, descente, avion stable.

### 3.4.3.2 Charge de coordination

Cette composante de la charge de travail est liée au passage des avions d'un secteur à un autre. Le simulateur fait la distinction entre le passage d'un avion d'un secteur à un autre secteur du même centre et le passage à un secteur d'un autre centre. Il considère aussi des poids différents suivant que l'avion entre ou sort d'un secteur ainsi que suivant l'attitude que celui-ci a au moment du transfert.

Il y a ainsi 12 paramètres temporels définis (et paramétrables) au sein du calcul de la charge de coordination :  $(3 \text{ attitudes possibles}) \times (2 \text{ cas : entrée ou sortie}) \times (\text{transfert intra ou inter-centre}) = 12 \text{ possibilités.}$

### 3.4.3.3 Charge liée aux conflits

Nous avons indiqué précédemment dans la partie traitement de la détection/résolution de conflits que 8 types de pertes de séparation potentielles sont définis. Le calcul de la part des conflits dans la charge de travail totale du contrôleur est alors effectué en affectant une durée de traitement différente suivant chacun de ces 8 types.

### 3.4.3.4 Indicateurs lié à la charge de travail

En fin de simulation, la charge de travail est fournie par OPAS-en-route pour chaque secteur et sous les formes suivantes :

- charge par fenêtre glissante (d'un quart d'heure et d'une heure) ;
- répartition de la charge suivant ces 3 composantes coordination, surveillance et conflits ;
- la charge maximum relevée pendant la simulation ;
- le nombre de minutes où la charge du contrôleur est supérieure à une certaine valeur. Pour ce dernier indicateur, on considère en général le nombre de minutes où la charge est supérieure à 70% d'une heure, cela revient à s'intéresser aux périodes d'une heure où le contrôleur passe au moins 70% de son temps occupé.

## 3.5 Autres sorties d'OPAS-en-route

Le simulateur fournit d'autres éléments que les indicateurs précédents à l'issue d'une simulation. En effet, l'outil est capable de générer :

- Des fichiers contenant les trajectoires des avions simulés. La fréquence d'échantillonnage des points constituant ces trajectoires peut être fixée par l'utilisateur et vaut par défaut 30s. Cette précision par défaut suffit en général pour des études en-route.
- Des fichiers contenant des plans de vol après simulation aux formats COURAGE et TACT. Ces fichiers indiquent pour chaque avion les temps et niveaux de passage balise ainsi que les secteurs traversés et les heures correspondantes d'entrée et de sortie.
- Des fichiers permettant de réaliser des cartes de densités. Actuellement, il est possible de générer des cartes indiquant la densité soit en nombre d'avions, soit en

nombre de conflits. L'étendue de la zone à considérer ainsi les niveaux minimum et maximum pour générer les cartes sont entièrement paramétrables.

- La liste des ordres donnés aux avions afin d'éviter les conflits est aussi disponible en fin de simulation.

### **3.6 Exemples d'études réalisées**

Nous décrivons ici brièvement quelques unes des études qui ont été réalisées au moyen de la version en-route d'OPAS.

#### **3.6.1 Mise en place du RVSM**

Dans ce cadre, différentes études ont été menées afin de mesurer l'impact de l'introduction de normes de séparation réduites dans l'espace français. Les cinq centres en-route français ont été traités.

#### **3.6.2 Projet européen MFF**

Les simulations réalisées avec OPAS-en-route dans ce projet ont porté sur plusieurs points.

En premier lieu sur l'utilisation de routes directes dans une portion définie de l'espace aérien. Cela a impliqué aussi de réaliser un contournement automatique des zones militaires. En effet, avec le réseau de routes classique, elles sont naturellement évitées mais dans le cadre du Free-Route, les avions peuvent avoir des trajectoires directes qui traversent ces zones. Pour évaluer le concept routes directes la flexibilité d'OPAS-en-route a rendu possible l'ajout des fonctionnalités nécessaires.

En second lieu, il s'est agit de réaliser des simulations arithmétiques du concept de croisement ASAS. Là encore, la maîtrise du code a permis de mener à bien l'étude.

Les indicateurs retenus pour évaluer ces concepts ont été, entre autres, les distances volées ainsi que les temps de vol, l'évaluation de la charge de travail, le nombre de conflit ou encore la densité d'avions.

OPAS-en-route a par la suite été employé pour évaluée des charges sur certains secteurs méditerranéens lors de la préparation des échantillons de trafic pour les simulations temps réel de MFF (RTS3).

#### **3.6.3 Blocs fonctionnels d'espace (FAB)**

OPAS-en-route a été employé lors d'une phase exploratoire sur les blocs fonctionnels d'espace (FAB). Ici, le simulateur a été utilisé pour générer des trajectoires afin de déterminer les points de percées de niveaux de coupe prédéfinis aussi bien pour les descentes que pour les montées. Cela a été utilisé pour déterminer les zones de chalandises des 40 plus importantes approches européennes et voir les endroits où ces zones se recouvrent.

#### **3.6.4 Etudes sur les rallongements de trajectoires**

Ces simulations ont eu pour objectif de mesurer la différence de distance volée entre les traces radar réelles enregistrées, les plans de vol et les vols en route directe. Ces études ont montré que la différence est relativement faible : la distance volée en suivant

strictement le plan de vol est 2% plus longue que celle réellement parcourue (dans les traces radar) qui est elle même environ 2% plus longue que le vol en route directe.

## 4 OPAS-TMA

### 4.1 Généralités

Comme l'indique son nom, cet outil de la famille OPAS a pour objet la simulation de trafic en zone d'approche.

Le but d'OPAS-TMA est de pouvoir permettre la réalisation d'études liées à l'environnement (génération de trajectoires utilisées ensuite par un modèle de bruit du type INM ou ENHANCE), de capacité et plus généralement d'évaluation de nouveaux dispositifs de circulation aérienne en zone d'approche.

Son développement a débuté courant 2001 sur la base du simulateur existant OPAS-en-route. OPAS-TMA partage une partie de son code informatique avec ce dernier. Mais pour des raisons techniques liées aux objectifs de simulation réaliste en zone d'approche, il est apparu nécessaire d'avoir des fonctionnements différents. C'est la raison pour laquelle les deux outils sont distincts.

### 4.2 Fonctionnalités

La principale caractéristique d'OPAS-TMA est de reproduire fidèlement la dispersion des trajectoires due aux actions de contrôle en zone d'approche. Le simulateur génère des trajectoires sans conflit en respectant aussi bien les normes de séparation que la turbulence de sillage aux abords de la piste, cette dernière dépendant des types des avions impliqués.

Le simulateur gère la séquence à la piste. Il sait également répartir fidèlement les avions à l'arrivée entre les différentes pistes s'il y en a plusieurs sur l'aéroport étudié. Dans ce cas, l'affectation se fait suivant des règles définies avec l'aide des experts de la plate-forme considérée.

La gestion des circuits d'attente fait aussi partie des capacités offertes par l'outil : quand cela est nécessaire, les avions vont en stack et en sortent par le bas lorsque le reste du trafic le permet. Cette fonctionnalité a été ajoutée lors des simulations CLARINES réalisées pour la plate-forme de Lyon Saint-Exupéry en 2003.

Parmi les autres possibilités offertes par OPAS-TMA, on compte le respect des volumes interdits ou obligatoires. Dans la première catégorie peuvent se trouver des zones militaires ou encore des zones orageuses (fixes pour l'instant). Dans la seconde catégorie, les volumes obligatoires, se trouvent les volumes de protection environnementale (VPE). Le simulateur sait en effet forcer les avions à entrer par une face d'un volume de ce type et à en sortir par une autre.

L'outil a récemment reçu une extension au sujet des données de performances avion utilisées. Précédemment, seules les données BADA tabulées étaient utilisables, mais les contrôleurs ayant participé aux modélisations et aux études faites avec OPAS-TMA ont indiqués que les performances de certains types avions étaient trop optimistes. Il était par conséquent nécessaire d'améliorer le réalisme des simulations en utilisant d'autres données. Un travail à ce sujet a donc été entrepris et il est depuis peu possible d'utiliser un modèle à énergie totale (TEM) avec les coefficients fournis par les données BADA

brutes (i.e non tabulées). Ce modèle à énergie totale est celui employé par les simulateurs temps réel ELECTRA et MASS. Il est de plus envisageable d'employer les données AIVADE en lieu et place de ces données BADA pour le TEM puisque le modèle est le même et la logique très proche.

L'utilisation de ce nouveau modèle de performances associé à de nouvelles données plus complètes et plus précises a permis d'accroître le réalisme des simulations OPAS-TMA, comme l'on constaté les experts opérationnels consultés.

On notera que cette amélioration d'OPAS-TMA pourra être transposée dans la version en-route du simulateur arithmétique.

Pour les simulations Gate2Gate, le concept d'espacement ASAS a été inclus dans l'outil. OPAS-TMA est à présent capable d'espacer les avions pour intégrer les flux de trafic en approche en utilisant ce nouveau concept. Le lecteur se reportera à la partie 5.2 dans cette note pour une explication plus détaillée de cette fonctionnalité.

Dernièrement, OPAS-TMA a aussi reçu d'autres améliorations concernant le langage de description des procédures utilisé pour indiquer au simulateur les plages de manœuvres autorisées dans sa recherche de trajectoires. Ce langage a été amélioré (ajout de nouvelles manœuvres pour couvrir un plus large spectre de possibilités) et simplifié. De même, la définition des critères guidant la recherche de trajectoires a été revue.

Ces améliorations ont eu pour objectif de simplifier la tâche de l'utilisateur désirant employer OPAS-TMA pour réaliser des simulations. Ainsi, OPAS-TMA n'est plus réservé aux personnes qui le développent à RFM. En effet, la division SAS de la SDER l'utilise déjà. Suivant cette stratégie qui consiste à permettre à d'autres d'utiliser le simulateur, une interface graphique de saisie des procédures a été développée afin de simplifier encore la phase fastidieuse de préparation des simulations. Cette interface en constante évolution est d'ores et déjà utilisée par RFM et SAS.

### 4.3 Déroulement d'une étude

La toute première étape consiste en la définition des procédures d'arrivée et/ou de départ à simuler et un recueil d'expertise en vue de leur modélisation. Cette phase est en général la plus longue car le réalisme des trajectoires produites dépend grandement de son bon déroulement.

Ensuite, deux simulations, au minimum, sont réalisées : une servant de référence (en général elle correspond à la situation existante) et une seconde rendant compte d'un scénario « futur ». La comparaison des résultats obtenus lors de ces simulations permet d'évaluer la pertinence des modifications envisagées.

### 4.4 Fonctionnement du simulateur

Dans le cas standard, une simulation OPAS-TMA passe par les étapes suivantes.

**Initialisation** : lecture des données et autres paramètres de configuration de l'outil. Les données comprennent la définition des procédures et des critères de recherche des trajectoires, les balises, les positions des pistes et de leurs seuils, les secteurs de contrôle, les plans de vol ou encore les éventuels volumes de protection environnementale à prendre en compte ainsi que les zones interdites s'il y en a.



Ensuite vient la **recherche d'une séquence** de simulation qui déterminera l'ordre dans lequel les vols seront simulés. Elle déterminera l'ordre à la piste et influera par conséquent sur les trajectoires produites. Cette séquence peut être remise en cause par la suite, notamment dans le cas où des avions sont retardés à la piste ou sont placés en circuit d'attente.

**Simulation du premier vol.** Au début de la simulation de tout vol, il y a détermination de la piste à employer dans le cas où plusieurs pistes sont possibles. De même, il peut aussi y avoir détermination de la procédure qui sera utilisée : celle-ci peut en effet être fonction du trafic et sur certains aéroports (Roissy en face à l'Est par exemple), certaines procédures ne sont utilisables qu'à certaines heures.

La logique de recherche de trajectoires est guidée par défaut par le temps de vol : on cherche à minimiser ce dernier. Il est aussi proposé de se baser sur la distance. Ainsi le simulateur recherche la suite de manœuvres à appliquer à l'avion pour qu'il se pose au plus tôt, en respectant les éventuels VPE ou zones interdites. Comme dans OPAS-en-route l'avion se déplace par pas de temps, en approche la valeur par défaut est de 5s (plus court qu'en-route).

**Simulation du second vol :** la logique employée est la même que pour le premier vol à la différence que de nouvelles contraintes sont ajoutées à la recherche. En effet, ce second avion doit en plus ne pas entrer en conflit avec le premier, ni se retrouver dans la turbulence de sillage de celui-ci.

On procède ensuite de la même façon de proche en proche, un vol numéro  $n$  prenant comme contrainte les  $n-1$  avions le précédant (en fait ceux qui sont encore en vol à ce moment). Dans le cas où la recherche échoue, cela signifie que le trafic est trop dense et qu'il n'est pas possible, en tout cas pour le simulateur, d'intégrer le vol dans les arrivées ou de le faire partir. Dans ce cas, un avion au départ sera retardé et une arrivée ira en circuit d'attente pour n'en sortir que lorsque le reste du trafic le permet. Comme cela a été précisé, la séquence de simulation est alors réévaluée.

**Sauvegarde :** finalement, les trajectoires simulées et tous les indicateurs calculés sont sauvés dans des fichiers.

Note : on voit ici que la logique de simulation est différente de celle appliquée dans la version en-route : dans cette dernière les vols avancent simultanément d'un pas de temps, tandis qu'avec OPAS-TMA les trajectoires sont calculées intégralement les unes après les autres. C'est la principale raison qui a conduit RFM à avoir deux outils distincts.

## 4.5 Indicateurs disponibles

Nous décrivons ici les indicateurs disponibles à la suite d'une simulation réalisée avec la version approche de l'outil. La liste exhaustive est la suivante :

- statistiques sur les temps de vol au niveau de l'ensemble de l'approche étudiée ainsi que pour chaque procédure de départ ou d'arrivée : temps total, moyen, minimum, maximum et écart type ;
- même statistiques globales ou par procédures en ce qui concerne la distance volée : total, moyenne, minimum, maximum et écart-type ;

- délai total et moyen d'attente à la piste pour les vols qui ont besoin d'être retardés au départ (dans le cas de fort trafic) ;
- utilisation des circuits d'attente au total et pour chaque stack : nombre de vols concernés, pourcentage par procédure d'arrivée, temps moyen passé en stack ;

Il n'y a à l'heure actuelle pas d'indicateur composite évalué dans OPAS-TMA. Il est prévu d'intégrer un modèle de charge de travail dès qu'il sera disponible. Le travail de développement de ce modèle est actuellement réalisé dans le cadre du projet Complexité de la division RFM.

## 4.6 Autres sorties d'OPAS-TMA

Les trajectoires générées font bien évidemment partie des données produites par OPAS-TMA. Comme cela a été dit, elle sont au même format que celles fournies par la version en-route. Les mêmes outils de rejeu et d'analyse sont donc utilisables.

Pour chaque trajectoire produite, la liste des manœuvres qui ont été appliquées est aussi fournie. Cette liste est en fait stockée directement dans le fichier contenant les trajectoires. Il est ainsi facile de savoir à quel moment et à quel endroit telle ou telle manœuvre a eu lieu.

Le simulateur d'approche peut aussi produire des cartes de densités en nombre d'avions, comme le simulateur en-route.

## 4.7 Exemples d'études et modélisations réalisées

Nous décrivons ici quelques études pour lesquelles OPAS-TMA a été employé.

### 4.7.1 Dispositif CLARINES sur l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry

L'étude a porté sur la mise en place de ce dispositif de circulation aérienne fin 2003/début 2004. Il consistait principalement en l'introduction d'un quatrième circuit d'attente au Sud-Est du terrain et impliquait par conséquent la redéfinition d'un certain nombre de procédures d'arrivées et influait sur quasiment toutes les procédures. La question à laquelle devait répondre l'étude était la suivante : l'enveloppe des trajectoires en dessous du niveau 65 changeait-elle de plus ou moins de 10% ?

Pour y répondre, il a fallu modéliser à la fois le dispositif actuel et le dispositif CLARINES et prendre en compte non seulement Lyon mais aussi les deux terrains satellites de Bron et Grenoble. Cela a impliqué d'ajouter à OPAS-TMA la gestion des stacks (auparavant les avions ne volaient pas en circuit d'attente à proprement parler mais voyaient leur entrée de la TMA retardée).

Il s'est avéré que l'enveloppe en question était modifiée de l'ordre de 3 à 4% donc bien en dessous des 10% qui auraient imposé une enquête publique. Depuis que l'étude a été réalisée, le dispositif a été mis en place (le 18 mars 2004) mais la division RFM a voulu attendre qu'il soit rodé avant de comparer les trajectoires CLARINES simulées à celles qui peuvent être observées au jour d'aujourd'hui. Ce travail de comparaison va être fait prochainement (les traces radar actuelles ont été récupérées auprès de Lyon) et permettra de valider l'utilisation d'OPAS-TMA.

#### 4.7.2 Etude de bruit sur les départs Sud d'Orly

Au mois d'avril 2004, ADP a fait la demande à RFM d'appliquer le simulateur en approche pour réaliser une étude de bruit concernant les départs Sud d'Orly. La plate-forme avant précédemment été modélisée et les modifications à apporter pour simuler les départs Sud ont été relativement minimales. Des trajectoires ont ainsi pu être produites rapidement pour être ensuite fournies dans le format demandé par ADP afin que cette entité les utilise en entrée du logiciel INM pour réaliser des cartes indiquant les contours de bruit.

#### 4.7.3 Etudes en région toulousaine

La division RFM a été sollicitée par le SNA Sud pour réaliser des études concernant trois projets.

Le premier concerne la mise en place d'un VPE de type mur sur les départs Nord-Est en piste 32 afin de protéger le village de Merville. L'étude de faisabilité réalisée à l'aide d'OPAS-TMA a montré que les performances avions au décollage ne permettent pas de mettre en place la solution envisagée.

Le deuxième projet concerne la reprise de l'approche d'Agen par le SNA Sud. La subdivision Instruction du SNA souhaitait disposer de trajectoires « standard » d'approche et de départ sur la plate-forme agenaise comme support de formation.

Le troisième et plus important en termes d'efforts concerne la restructuration des espaces toulousains vis à vis du CRNA-SO d'une part et de Pau et Tarbes de l'autre. L'équipe RFM en est actuellement à la phase de modélisation de l'existant sur la plate-forme de Blagnac.

#### 4.7.4 Plate-formes modélisées

Les plate-formes suivantes ont été modélisées par la division RFM pendant ces études ou parallèlement à ces études :

- Orly en configuration face à l'Est et face à l'Ouest ;
- Lyon Saint-Exupéry en configuration face au Nord ;
- Roissy en face à l'Ouest. La modélisation de la configuration en face à l'Est est actuellement en cours de terminaison (phase de validation avec les experts opérationnels).
- Des terrains satellites des plate-formes parisiennes ont aussi été partiellement modélisées : le Bourget, Toussus Le Noble, Villacoublay et Beauvais.

Certains de ces aéroports n'ont pas été utilisés dans le cadre d'études mais ont pourtant été modélisés. En effet, il semblait opportun de disposer dès à présent de leur modélisation (dans le dispositif existant), notamment pour Roissy, car cela a permis d'une part d'améliorer l'outil de simulation et d'autre part de se préparer à de futures études. Le travail réalisé ne sera plus à faire lorsqu'une étude sera demandée et cela permettra de gagner du temps à ce moment.

Comme cela a été précisé plus haut, Blagnac et ses satellites (Francazal, Agen, Pau, Tarbes, Muret et Carcassonne) sont en cours de modélisation dans les deux configurations.

## 5 OPAS-couplé

### 5.1 Généralités

La famille OPAS propose un troisième outil de simulation, il s'agit d'OPAS-couplé. Ce n'est pas à proprement parler un simulateur distinct des deux autres car il consiste en la réunion d'OPAS-en-route et OPAS-TMA en une seule plate-forme de simulation permettant de réaliser des études incluant toutes les parties de l'espace aérien. Nous le qualifierons malgré tout de simulateur arithmétique dans la suite de ce document pour simplifier.

Cet outil a été à l'origine développé pour la campagne de simulations réalisée par RFM dans le cadre du projet européen Gate2Gate.

### 5.2 Fonctionnalités

Le simulateur couplé bénéficie bien évidemment de toutes les fonctionnalités disponibles dans OPAS-en-route et OPAS-TMA.

Il est notamment capable de simuler le concept d'*ASAS-Spacing*, capacité qui a été mise en œuvre pour les simulations Gate2Gate. Ces nouvelles instructions offertes aux contrôleurs sont applicables aussi bien en-route qu'en TMA. Le simulateur applique donc des manœuvres ASAS, quand cela est nécessaire dans ces deux types d'espace :

- en-route, on utilise le concept pour pré-réguler les flux sur les points d'entrée de la TMA ;
- en approche, il est employé afin d'intégrer les différents flux à l'arrivée.

De plus, il sait réaliser des espacements soit en temps, soit en distance. Il est aussi capable d'appliquer des espacements différents suivant les types des avions concernés : il est ainsi possible de conserver 90s entre deux avions de même type tandis qu'on applique 120s dans le cas d'un « petit » avion derrière un « gros ».

### 5.3 Sorties

A l'issue des simulations, des mesures quantitatives sont fournies concernant les points suivants :

- nombre de manœuvres *ASAS-Spacing* appliquées au total, sur chaque point d'entrée (en-route) et sur chaque point de merge (en zone d'approche) ;
- types et nombres de manœuvres de chacun de ces types ;
- espacement obtenu sur les points avec une répartition des différentes valeurs ;
- valeurs des caps utilisés pour les avions sortant de leur route ;
- répartition géographique des points de début de manœuvre ASAS ;
- pour chaque secteur traversé, pourcentage moyen du temps passé sous ASAS par rapport au temps total passé dans le secteur.

En ce qui concerne les autres données produites par l'outil, tous les indicateurs générés par ses deux composants sont proposés. De plus, les trajectoires obtenues en-route d'une part et en approche d'autre part sont recollées et fournissent en sortie des trajectoires uniques et continues par avion qui comprennent les plots produits dans chacune des deux zones.

## 5.4 Exemple d'étude réalisée

Jusqu'à présent, OPAS-couplé n'a été utilisé que pour les simulations Gate2Gate. Néanmoins, l'équipe SAS à laquelle a été fourni ce simulateur doit l'employer pour des simulations du projet Cristal.

Pour les simulations Gate2Gate, le concept principal à étudier concernait l'espacement ASAS. Un grand nombre de simulations a été effectué : plusieurs journées de trafic ont servi pour les scénarios de référence correspondant à la situation actuelle. Pour les scénarios additionnels, permettant d'évaluer le concept *ASAS-Spacing*, certains étaient effectués avec des espacements en temps, d'autres en distance et d'autres encore combinant les deux types (avec un espacement en distance en-route et en temps en TMA). De plus, différentes valeurs de séparation ont été testées pour mesurer le taux d'application des manœuvres d'espacement.

Pour la partie en-route uniquement, une évaluation de la part de la charge de travail mise en cause a aussi été obtenue. Elle indique sur quel pourcentage de la charge actuelle joue le concept.

## 6 Outils annexes

En parallèle du développement des trois simulateurs, d'autres outils permettant de visualiser les résultats et de les analyser ont été écrits. Il y en a trois principaux, il sont décrits dans les sections qui suivent.

### 6.1 OPAS-ESPRIT

OPAS-ESPRIT (Edition et Simulation de PRocédures Imaginées pour la TMA) est l'interface d'édition des procédures spécifique à la version approche du simulateur. Cet outil permet de simplifier la saisie des procédures définissant les plages de manœuvres disponibles pour OPAS-TMA. Il sert aussi pour l'édition des critères de recherche des trajectoires.

A l'origine, la description des procédures et la définition des critères se faisait à l'aide d'un fichier texte qu'il fallait remplir à la main. Cela comportait un certain nombre d'inconvénients :

- il était nécessaire de connaître parfaitement le langage de description associé ;
- cette étape était fastidieuse ;
- la saisie manuelle de toutes les manœuvres décrivant une procédure pouvait conduire à des erreurs : de frappe, de copier-coller malencontreux. L'interface a permis de se débarrasser d'un grand nombre de sources d'erreur ;
- afin de tester une procédure, il était nécessaire d'écrire un fichier contenant des plans de vols de test pour ensuite lancer à la main une simulation pour enfin les afficher et les analyser à l'aide de l'interface OPAS-ARTS (qui sera décrite en section 6.2).

Au travers de cette interface, il devient beaucoup plus aisé, aussi bien pour les spécialistes à RFM que pour d'autres utilisateurs (SAS en possède une version), de réaliser le travail de saisie une fois le recueil d'expertise effectué auprès des opérationnels. Il devient même envisageable de laisser les experts opérationnels faire ce travail afin de réduire le temps de préparation des simulations.

A présent, le processus de vérification des procédures saisies est automatisé et les trajectoires s'affichent directement dans une fenêtre présente dans l'interface d'édition. Des plans de vols proposant des types avions différents sont disponibles et il suffit de cliquer sur un bouton pour voir tout de suite ce que donne la procédure en cours d'écriture.

Naturellement, l'interface d'édition évolue au fur et à mesure des améliorations qui sont apportées au simulateur lui-même. Par exemple, lorsque de nouveaux types de manœuvres sont ajoutés à OPAS-TMA, ils sont simultanément intégrés à l'interface de saisie.

La photo d'écran qui suit montre cette interface de saisie des procédures pour OPAS-TMA.



- Interface OPAS-EDIP -

## 6.2 OPAS-ARTS

OPAS-ARTS (Analyse et Rejeu de Trajectoires Simulées) est un outil graphique de rejeu et d'analyse des trajectoires produites par les différents simulateurs de la famille OPAS. Il était initialement utilisé uniquement pour visualiser et analyser les sorties d'OPAS-TMA et portait alors le nom TMA-Visu. Il est maintenant capable de fonctionner avec des trajectoires provenant d'OPAS-en-route ou d'OPAS-couplé et peut également lire des enregistrements radar. L'utilisateur peut ainsi superposer les traces réelles avec celles obtenues par simulation.

Il permet de visualiser l'ensemble des trajectoires, d'opérer des sélections sur certaines d'entre elles, de les colorer en fonction de l'altitude où se trouvent les avions, de rejouer le trafic simulé en affichant de manière optionnelle les manœuvres appliquées par

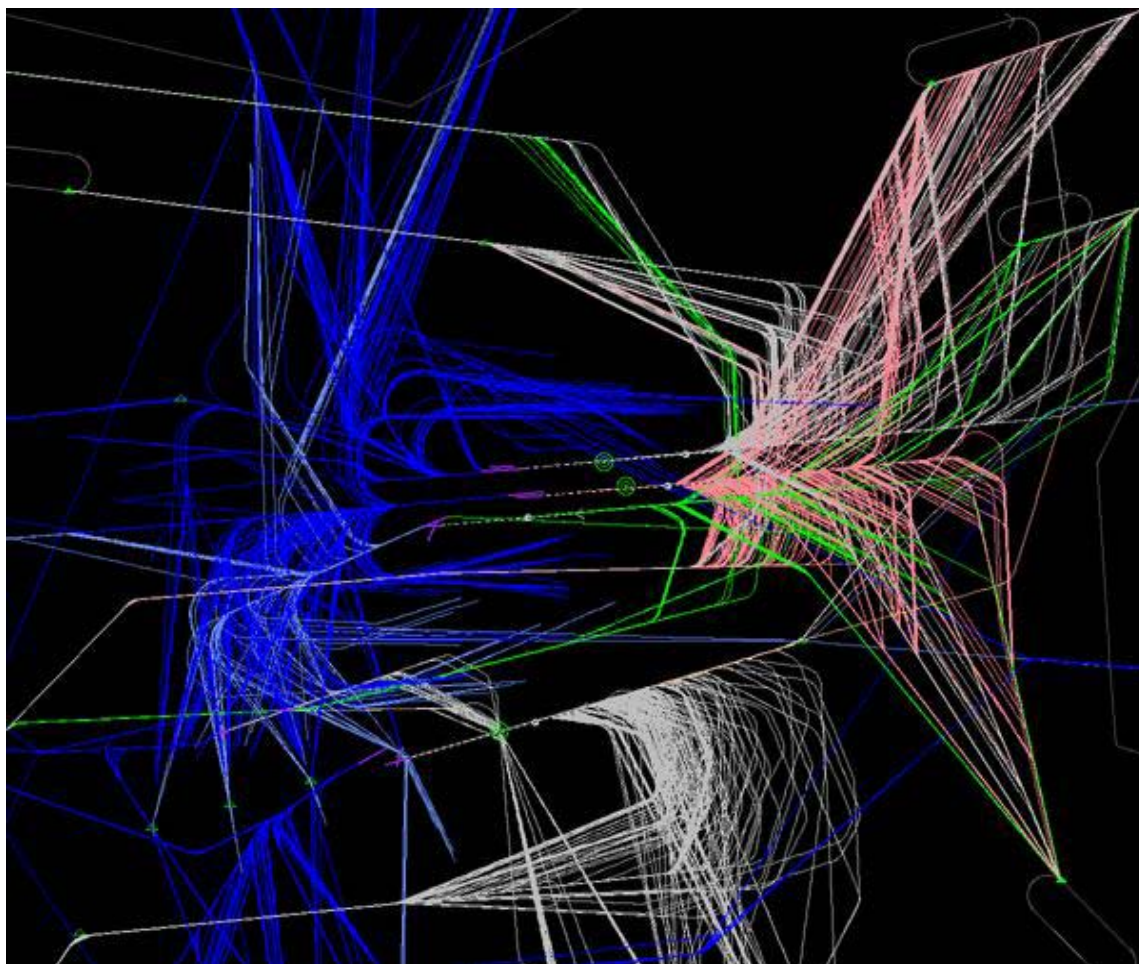
OPAS-TMA. De plus, une fenêtre montre la séquence de simulation déterminée par le simulateur et les trajectoires peuvent être visualisées aussi bien en deux qu'en trois dimensions.

OPAS-ARTS est aussi capable de calculer les enveloppes de faisceaux de trajectoires à X%. Cette fonctionnalité a par exemple servi lors de l'étude portant sur le dispositif CLARINES.

Sur la base des trajectoires chargées, cet interface permet aussi de produire des cartes de densités si celles-ci n'ont pas déjà été produites directement avec OPAS-en-route ou OPAS-TMA. Cette dernière fonctionnalité permet aussi de réaliser des cartes de densités à partir de trajectoires issues d'autres sources (traces radar entres autres).

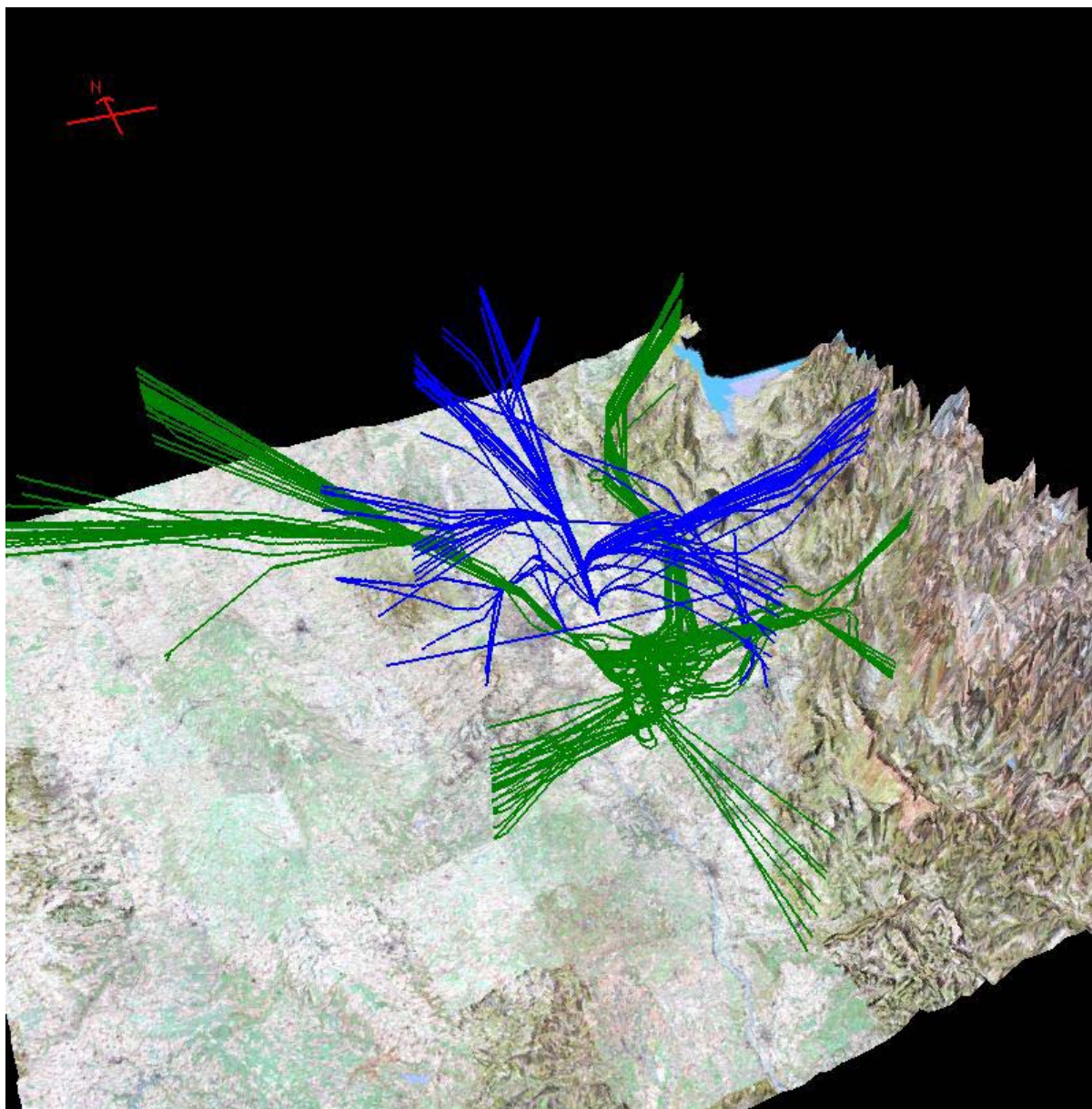
L'outil sert de plate-forme de démonstration afin de montrer le réalisme des trajectoires produites par nos simulateurs. Il a par exemple servi au salon ATC Maastricht 2005 pour les démonstrations OPAS-TMA.

Les deux images suivantes sont des captures d'écran provenant de OPAS-ARTS.



- OPAS-ARTS : Trajectoires générées sur la région parisienne par OPAS-TMA -





- OPAS-ARTS : vue 3D des trajectoires simulées par OPAS-TMA à Lyon  
(CLARINES) -

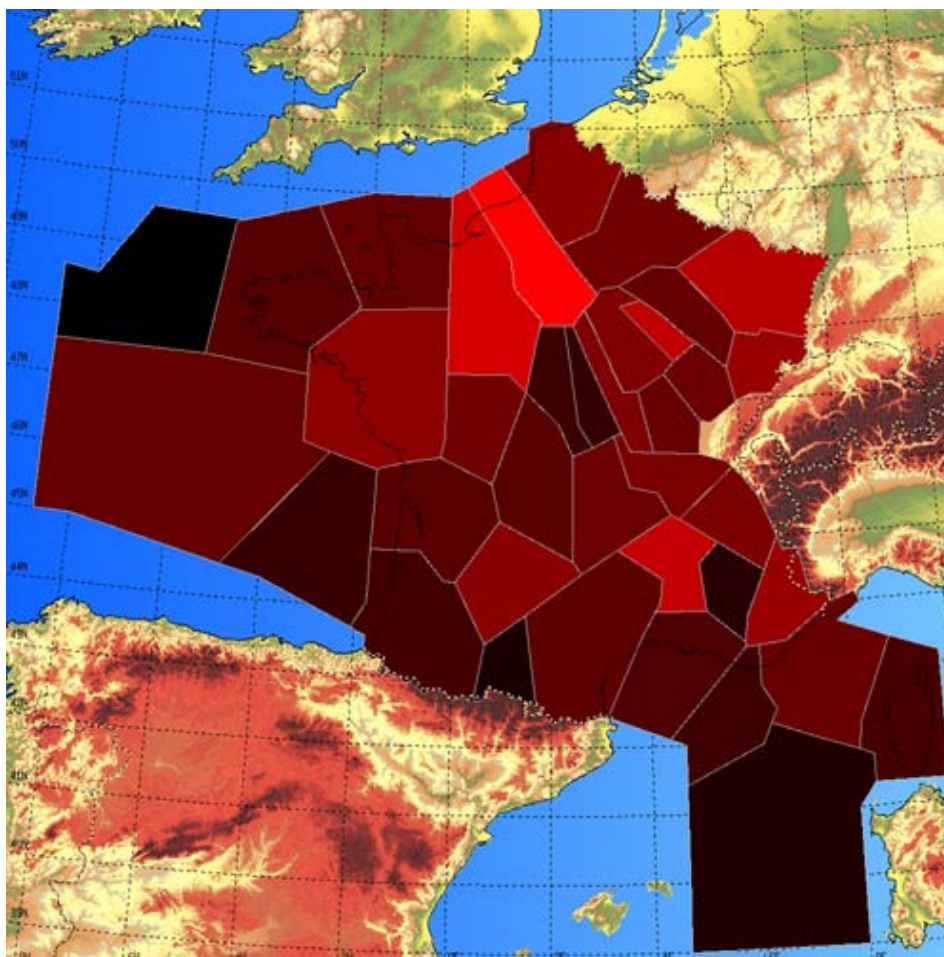
### 6.3 REGARDS

L'outil REGARDS (REprésentation Graphique des données ATC Réelles et de Données Simulées) est une interface graphique qui sait gérer tous les types de données rencontrés à ce jour par RFM : plans de vol COURAGE / TACT / US / RAMS / TAAM / OPAS, trajectoires OPAS / IMAGE / ELVIRA et plusieurs autres formats de traces radar, et de même pour tout ce qui est balises, aéroports, secteurs ou zones militaires. De fait, il peut être utilisé pour transformer des données d'un format à un autre.

Son but principal est d'afficher toutes ces données (de manière statique contrairement à OPAS-ARTS) en 2D et en 3D, de réaliser des sélections, des comptages, etc. Il est ainsi possible de comparer les plans de vol initiaux avec des résultats de simulations ou des traces radar.

En ce qui concerne la partie analyse de résultats de simulations, REGARDS sait lire les fichiers contenant les indicateurs produits par la famille OPAS. Il est ensuite possible de les afficher sous forme graphique en colorant par exemple les secteurs en fonction du nombre d'avions qui les traversent, du nombre de conflits qui s'y trouvent, de la charge de travail, etc. Il peut aussi par exemple servir à afficher les endroits où débutent les manœuvres *ASAS-Spacing*, fonctionnalité qui a été utilisée pour Gate2Gate.

L'image qui suit est un exemple de carte de secteurs colorés obtenue avec l'outil REGARDS en prenant comme base la charge de travail secteur calculée par OPAS-en-route.



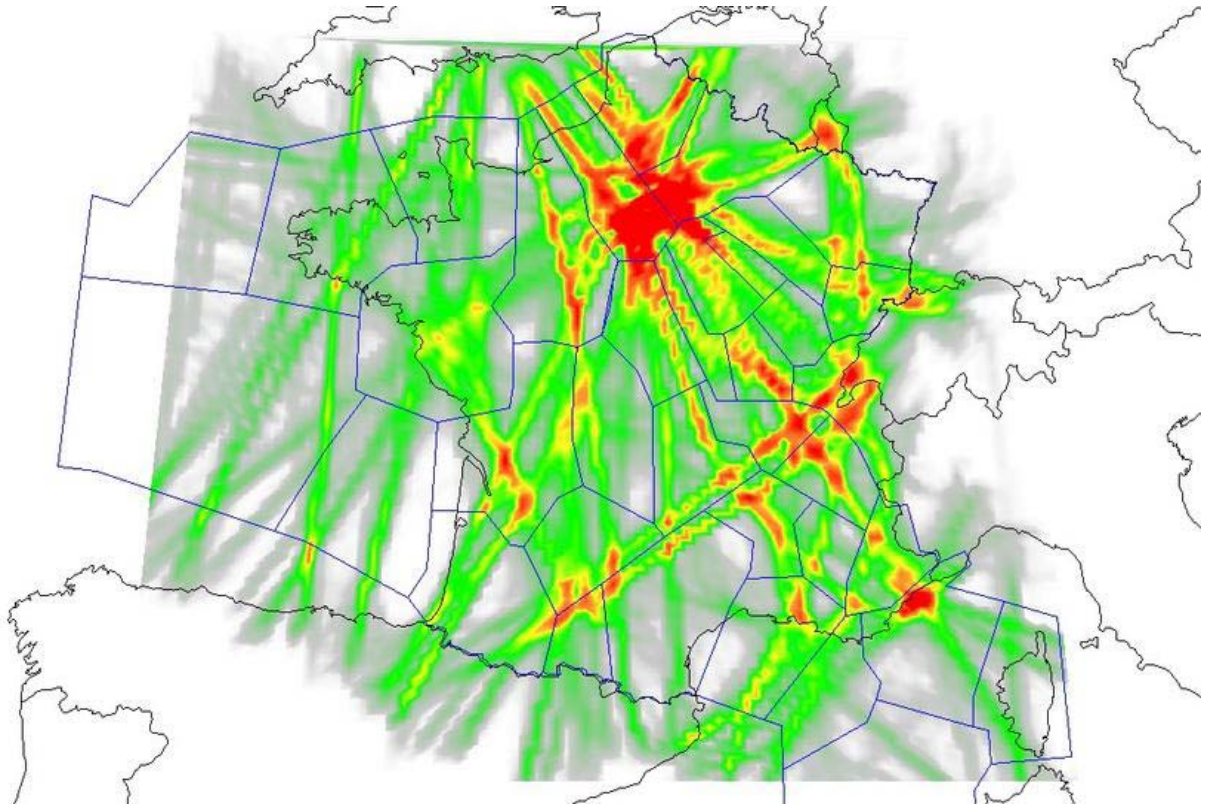
- REGARDS : secteurs colorés en fonction de l'évaluation de la charge de travail -

## 6.4 Autres outils

L'outil SHAMAN développé dans le cadre du programme ATFM de la division RFM est lui aussi employé : soit pour afficher des plans de vol et réaliser des comptages du type charge secteur, soit pour préparer les données. En effet, pour certaines simulations on l'utilise pour augmenter le trafic si l'on désire créer des plans de vols représentatifs du niveau de trafic prévu dans le futur.



Le logiciel gratuit NMPlot<sup>1</sup> est quant à lui très régulièrement utilisé pour créer des cartes de densités à partir des fichiers produits par les simulateurs de la famille OPAS. L'image qui suit est un exemple de carte de densité produite grâce à cet outil.



- Carte de densité (nombre d'avions) produite avec NMPlot -

---

<sup>1</sup> NMPlot est disponible gratuitement, sous Windows uniquement, à l'adresse <http://wasmerconsulting.com/nmplot.htm>

## 7 Développements futurs de la famille OPAS

Plusieurs axes s'offrent pour l'avenir des simulateurs OPAS. Tout d'abord, de nouvelles fonctionnalités ou des améliorations leur seront apportées. La liaison forte qui existe entre les projets « Simulations » et « Complexité » (tous deux faisant partie du programme Performances à RFM) doit permettre de faire bénéficier les outils de simulation OPAS des indicateurs qui sont produits par le projet « Complexité ». Ce projet a en effet pour objectif de définir de nouveaux indicateurs liés à la complexité et à la charge de travail du contrôleur. Parmi les objectifs de ce projet, il y a la définition d'un indicateur de charge de travail en approche : une fois celui-ci développé, il sera intégré à OPAS-TMA et servira dans les études réalisées avec ce simulateur.

Actuellement en cours, le projet OPAS-IVY consiste à connecter la version en-route d'OPAS au bus logiciel IVY développé par la division PII de la SDER. A l'origine de ces travaux est un souhait d'Aix qui voudrait disposer d'un simulateur arithmétique simple à mettre en œuvre qui pourrait prendre en charge une grande partie des avions tout en laissant la possibilité à l'utilisateur de donner des ordres à certains autres aéronefs. Le but est de réaliser des simulations en temps réel, dans le cadre d'une modification de l'espace par exemple, tout en testant ce qui arrive si certains avions sont contrôlés. Le bus IVY présente l'intérêt de proposer des interfaces de type radar semblables à celles qu'utilisent les contrôleurs dans leur travail de tous les jours ainsi que des interfaces de saisie d'ordres à donner aux avions. A peu de frais, il est donc possible de réaliser un simulateur simple qui propose des interfaces réalistes et faciles d'utilisation. La connexion a débuté en 2005 et permet dès à présent de réaliser une simulation en-route tout en affichant en temps réel les plots simulés sur l'interface radar Twinkle.

L'interfaçage avec le bus IVY a un autre intérêt possible à plus long terme : il existe une version du séquenceur MAESTRO connectée à IVY (ainsi qu'un émulateur de MAESTRO). Il est envisageable de mettre à profit cette connexion pour utiliser conjointement MAESTRO et OPAS-TMA. On peut par exemple imaginer remplacer l'algorithme de séquençement « maison » actuellement employé dans OPAS-TMA par MAESTRO, ce qui apportera encore plus de réalisme à nos simulations en approche.

Dans le but de diffuser les outils de la famille OPAS à d'autres entités (dans un premier temps à l'intérieur de la SDER, puis ensuite à la DO par exemple), une documentation utilisateur de l'outil OPAS-en-route a été écrite et il est prévu de fournir le même document de référence pour OPAS-TMA. Ensuite, les interfaces graphiques existantes seront développées afin de rendre possible leur utilisation par des personnes qui ne seraient pas expertes en informatique. Il est également planifié de réaliser une interface permettant le lancement de simulations qui offrira aux utilisateurs un environnement simple pour saisir tous les paramètres (pas de temps, activation ou non de la détection/résolution de conflits, etc.) puis d'archiver sous la forme d'un « projet » tous ces paramètres ainsi que les données employées. Cet environnement permettra ainsi facilement de reproduire des simulations après coup, sans avoir à se remémorer quels étaient les paramètres choisis quelques années auparavant.

Dans le même souci de diffusion des outils, plusieurs rencontres et démonstrations sont prévues pour les faire connaître auprès des utilisateurs ou demandeurs d'études potentiels. OPAS-TMA a par exemple été montré au salon ATC Maastricht en 2005, présenté au TAAM user group en septembre 2004 à Paris ainsi qu'au SIMMOD user

group en avril 2005 à Nice. Le bon accueil qui a été fait à cet outil laisse présager que ce type de simulateur a de l'avenir.

## Bibliographie

- NT99-045 : Etude du dispositif RVSM dans l'espace aérien. Lionnel Maugis & Philippe Kerlirzin – Mars 1999.
- NT00-176 : Etude du dispositif RVSM dans l'espace aérien du centre de contrôle de Bordeaux. Pierre Guglielmi & Lionnel Maugis – Novembre 2000.
- NT01-060 : Etude du dispositif RVSM dans l'espace aérien du centre de contrôle de Reims. Pierre Guglielmi, Lionnel Maugis & Frédéric Médioni – Mars 2001.
- NT01-091 : Répartition macroscopique de la demande de trafic en environnement RVSM dans les centres français à l'horizon 2002. Lionnel Maugis – Mai 2001.
- NT02-088 : Extension du simulateur OPAS aux zones terminales de contrôle. Julien Thierry – Avril 2002.
- NT02-146 : Contribution de l'outil OPAS à la mesure de performance. Yann Le Fablec – Juillet 2002.
- NT03-064 : Analyse des trajectoires radar et des routes plans de vol dans l'espace aérien français. Arnaud Vielle – Avril 2003.
- NT03-173 : Rapport d'avancement d'OPAS-TMA : prise en compte de volumes de protection environnementale. Yann Le Fablec – Octobre 2003.
- NT03-175 : Etude de la connexion entre les versions en-route et TMA d'OPAS. Arnaud Vielle – Octobre 2003.
- NT03-219 : Rapport intermédiaire sur l'avancement du projet de connexion d'OPAS en-route et OPAS-TMA pour Gate2Gate. Arnaud Vielle – Décembre 2003.
- NT04-069 : Modélisation du concept d'ASAS-Spacing pour simulations OPAS en temps accéléré. Arnaud Vielle – Mars 2004.
- NT04-075 : Avancement de la modélisation du concept d'ASAS-Spacing dans OPAS et définition des scénarios. Arnaud Vielle – Mars 2004.
- NT04-091 : Résultats des simulations OPAS-TMA sur le dispositif CLARINES. Julien Thierry & Yann Le Fablec – Avril 2004.
- NT04-109 : Phase exploratoire sur les blocs fonctionnels d'espace. Yann Le Fablec - Mai 2004.
- NT04-152 : Avancement de la modélisation du concept d'ASAS-Spacing dans OPAS et premières simulations. Arnaud Vielle – Août 2004.
- NT04-963 : Suitability of OPAS and OPAS-TMA for ASAS procedures evaluation. Stéphane Chabert – Octobre 2004.
- NT05-152 : Documentation utilisateur OPAS-en-route. Nicolas Cochenec – Mai 2005.
- Projet MFF : deliverable D341 – Scenarios modeling specifications and development – Février 2002.
- Projet MFF : deliverable D351 – Reference case scenario MBS results – Mai 2002.

Projet MFF : deliverable D352 – Free Route MBS results (A1) – Mai 2002.

Projet MFF : deliverable D353 – Results of MBS for A3, A4 & A5 applications – Janvier 2003.

Projet G2G : deliverable D344 - WP3 Fast Time simulation report DNA – décembre 2004.

INTEGRA : Metrics & Methodologies. Detailed specification of safety metrics – Inputs, Processing, Outputs (Final Draft).

INTEGRA : Metrics & Methodologies. Validation of safety metrics – Analysis (Draft).