



Titre de la thèse (acronyme) : STAI

Sujet de thèse : Identification et modélisation des inefficacités du système de transport aérien

Directeur de thèse : R. Vingerhoeds

Comité de Pilotage : D. Bonnet (Thales AVS), F. Barbaresco (Thales LAS) et S. Chatty (DSNA)

Mots-clefs

Transport aérien, modélisation, simulation, ingénierie système

Contexte et problématique

Dans les discussions environnementales, il y a un œil critique sur le transport aérien. Des discussions suggèrent une meilleure optimisation de l'avion lors de la phase de sa conception. En revanche, on ne peut pas dire que si un avion a été complètement optimisé pendant sa phase de conception, et validé par rapport à cela, que c'est une garantie d'optimalité une fois en opération. En effet, l'avion en opération est tributaire de beaucoup de contraintes, comme par exemple les routes proposées par l'Air Traffic Control et des modifications pendant le vol. Cette séparation sol-bord (Air Traffic Control – pilotage d'avions) handicape notre capacité à traiter les enjeux de transformation de l'aérien et qu'on aura besoin d'une approche structurée, systémique. Cette thèse vise à mobiliser de nouvelles disciplines pour mieux faire évoluer le système de transport aérien et couvre les aspects suivants :

- nouvelles bases scientifiques pour la modélisation de la complexité de gestion des flux du trafic aérien,
- de nouvelles modélisations ou simulations pour les composantes clés du système technique du transport aérien,
- comprendre les dynamiques et les résistances à l'évolution du système sociotechnique,
- proposer des approches pour lever les freins,
- combiner méthodes d'ingénierie système et disciplines non technologiques (droits, économie, sociologie, innovation, design, etc).

C'est un sujet très vaste, et le but est ainsi de faire un premier pas vers une vraie approche systémique d'optimisation du trafic aérien. Dans le cadre de cette thèse, un sous-ensemble des points évoqués sera adressé, notamment l'identification et la modélisation des inefficacités du système de transport aérien.

Verrous scientifiques et techniques

Il est à noter que pendant le développement d'un avion à différents niveaux les concepts sont optimisés, et il en est de même pour chaque autre élément dans ce qu'on appelle le système de transport aérien (on peut penser à l'air traffic control, les lignes aériennes, etc.). En fait il s'agit de ce qu'on appelle un système de systèmes. Ces systèmes sont caractérisés par le fait que chaque système est développé par une autre partie prenante, avec des objectifs différents, répondant à d'autres exigences, parfois conflictuel entre chaque système. Aussi, il est peu probable, voire illusoire, de penser qu'un optimum puisse être trouvé en

optimisant chaque système individuellement. Là où on peut estimer l'efficacité du transport aérien à ~90%, les derniers 10% ne peuvent être trouvés en continuant d'optimiser les systèmes individuellement, mais une approche globale et collaborative doit être mise en place.

Les verrous scientifiques suivants peuvent être identifiés :

- La difficulté à obtenir un modèle (ou un ensemble de modèles) adéquat qui décrit fidèlement le système de transport aérien dans sa globalité et d'assurer/maintenir la cohérence entre le système et le modèle,
- La difficulté à identifier de façon exhaustive les facteurs à prendre en compte a minima pour les modèles à différents niveaux d'abstraction,
- La difficulté à définir les critères d'acceptation (ou de précision), ainsi que leur agrégation, des modèles afin de pouvoir les utiliser par la suite pour comparer les solutions entre elles et pour proposer un nouveau concept d'opérations,
- La difficulté à définir un cadre MBSE (Model-Based Systems Engineering) pour un système de systèmes de cette ampleur (voir la conférence <https://cesam.community/fr/csdm-2024/>).

L'objectif de cette thèse est donc dans un premier temps faire une étude sur les inefficacités du système de transport aérien, avec pour but de pouvoir proposer un nouveau concept opérationnel collaboratif bord/sol. Pour atteindre cet objectif, le model-based systems engineering (MBSE) et la simulation au sens large (y incluant la simulation basée agents) seront étudiés, ce qui permettra de poser les bases pour une prise de décisions multicritères fiable. Puis, en appliquant une approche d'ingénierie systèmes, tous les parties prenantes et leurs besoins sont étudiés, afin de pouvoir identifier, autant que possible, exhaustivement tous les effets, les contraintes et les dépendances qui impactent l'efficacité du système transport aérien. Pour cela, des données concrètes (ex. flight radar, météo, des entretiens avec des opérateurs d'air traffic control, etc.) doivent être utilisés. Le but est d'arriver à une simulation fidèle à la réalité, afin de (mieux) comprendre ce système complexe.

Organisation du travail de thèse

Le travail de thèse s'organisera en trois phases principales (la tâche d'État de l'Art inhérente à tout travail de thèse n'est pas mentionnée en tant que phase) :

L'objectif de cette thèse est donc dans un premier temps faire une étude sur les inefficacités du système de transport aérien, avec pour but de pouvoir proposer un nouveau concept opérationnel collaboratif bord/sol. Pour atteindre cet objectif, le model-based systems engineering (MBSE) et la simulation au sens large (y incluant la simulation basée agents) seront étudiés, ce qui permettra de poser les bases pour une prise de décisions multicritères fiable. Puis, en appliquant une approche d'ingénierie systèmes, tous les parties prenantes et leurs besoins sont étudiés, afin de pouvoir identifier, autant que possible, exhaustivement tous les effets, les contraintes et les dépendances qui impactent l'efficacité du système transport aérien. Pour cela, des données concrètes (ex. flight radar, météo, des entretiens avec des opérateurs d'air traffic control, etc.) doivent être utilisés. Le but est d'arriver à une simulation fidèle à la réalité, afin de (mieux) comprendre ce système complexe. Des outils d'agrégation multicritères peuvent être utilisés pour comparer les solutions entre elles.

Phase 1 : La première étape consistera en un état des lieux sur la situation existante pour le système transport aérien : les parties prenantes, leurs besoins, les optimisations faites pour chaque système dans le système transport aérien, etc. Cela permettra d'avoir une vue globale comme point de départ.

Phase 2 : Dans un deuxième temps, les différents aspects influençant l'efficacité du système transport aérien doivent être identifiés. Puis une modélisation de ce système afin de pouvoir analyser les inefficacités doit être faite. Pour que cette modélisation puisse être utilisée, des données doivent être collectées (partiellement déjà disponible) afin de pouvoir simuler ce système, par exemple avec des approches multi-agents.

Phase 3 : La modélisation et les simulations d'alternatives opérationnelles sont validées sur des données réelles, et évaluées par analyse multicritère, point de départ pour la proposition d'un nouveau concept opérationnel collaboratif sol/bord.

Cette organisation peut également être représentée par le diagramme de Gantt suivant :

	2024				2025				2026				2027			
	oct-dec	jan-mar	avr-jun	juil-sep	oct-dec	jan-mar	avr-jun	juil-sep	oct-dec	jan-mar	avr-jun	juil-sep	oct-dec	jan-mar	avr-jun	juil-sep
Etude de l'état de l'art																
Identification des parties prenantes et leurs besoins																
Identifications des facteurs d'inefficacité																
Analyse de données																
Modélisation																
Afiner le(s) modèle(s) en validant avec des données réelles																
Rédaction du manuscrit de thèse de doctorat et préparation de la soutenance																

Figure 1 – Diagramme de Gantt

Les travaux de thèse s'inscrivent dans les activités de recherche menées au sein du Département d'ingénierie des systèmes complexes (DISC) de l'ISAE-SUPAERO. Le DISC développe des compétences en mathématiques et informatique pour l'ingénierie aéronautique et spatiale. En enseignement comme en recherche, il s'intéresse aux modèles, méthodes et outils nécessaires pour maîtriser le comportement et les performances de systèmes complexes. Cette complexité peut être induite par le caractère multi-physiques ou multi-échelles des systèmes étudiés, leur comportement dynamique, leur structure distribuée et communicante. Les activités de cette thèse se trouvent dans le groupe de recherche « Ingénierie Systèmes » du DISC, qui s'intéresse à l'ingénierie des systèmes complexes dans le but de développer des méthodes, techniques et outils permettant de maîtriser (c'est-à-dire comprendre, analyser, évaluer, contrôler et concevoir) le comportement fonctionnel, opérationnel et les performances de ces systèmes.

Puis dans le cadre de cette thèse, une coopération avec Thales et la DSNA est mise en place, et d'autres coopérations sont à l'étude (ex. le Lincoln Laboratory du MIT).

Supervision de la thèse

La thèse sera dirigée par l'ISAE-SUPAERO (Rob Vingerhoeds, HDR) d'un point de vue académique.

De plus, des contributions d'encadrement d'un point de vue industriel et autorités seront assurées par un comité de pilotage, Thales (D. Bonnet et F. Barbaresco) et de la DSNA (S. Chatty).



Thesis title (acronym): STAI

Thesis topic : Identification et modélisation des inefficacités du système de transport aérien

PhD Advisor : R. Vingerhoeds

Industrial Advisors : D. Bonnet (Thales AVS), F. Barbaresco (Thales LAS) et S. Chatty (DSNA)

Keywords

Air transport, modeling, simulation, systems engineering

Context and Problem Description

In environmental discussions, there is a critical eye on air transport. Discussions suggest better optimization of the aircraft during its design phase. On the other hand, we cannot say that if an aircraft has been completely optimized during its design phase, and validated in relation to this, that this is a guarantee of optimality once in operation. Indeed, the aircraft in operation is subject to many constraints, such as for example the routes proposed by Air Traffic Control and modifications during the flight. This ground-on-board separation (Air Traffic Control – aircraft piloting) handicaps our ability to deal with the challenges of transforming the air sector and we will need a structured, systemic approach. This thesis aims to mobilize new disciplines to better evolve the air transport system and covers the following aspects:

- new scientific bases for modeling the complexity of air traffic flow management,
- new modeling or simulations for key components of the air transport technical system,
- understand the dynamics and resistance to the evolution of the socio-technical system,
- propose approaches to remove the obstacles,
- combine system engineering methods and non-technological disciplines (laws, economics, sociology, innovation, design, etc.).

This is a very broad subject, and the aim is to take a first step towards a real systemic approach to optimizing air traffic. As part of this thesis, a subset of the points raised will be addressed, in particular the identification and modeling of inefficiencies in the air transport system.

Scientific and technical challenges

It should be noted that during the development of an aircraft at different levels the concepts are optimized, and it is the same for each other element in what is called the air transport system (we can think of air traffic control, airlines, etc.). In fact, it is what we refer to as a system of systems. These systems are characterized by the fact that each system is developed by another stakeholder, with different objectives, meeting other requirements, sometimes conflicting between each system. Also, it is unlikely, even illusory, to think that an optimum can be found by optimizing each system individually. Where air transport efficiency can be estimated at ~90%, the last 10% cannot be found by continuing to optimize systems individually, but a global and collaborative approach must be put in place.

The following scientific challenges can be identified:

- The difficulty in obtaining an adequate model (or set of models) which faithfully describes the air transport system as a whole and in ensuring/maintaining consistency between the system and the model,
- The difficulty in exhaustively identifying the factors to be taken into account at a minimum for models at different levels of abstraction,
- The difficulty in defining the acceptance (or precision) criteria, as well as their aggregation, of the models in order to be able to use them subsequently to compare the solutions with each other and to propose a new concept of operations,
- The difficulty in defining an MBSE (Model-Based Systems Engineering) framework for a system of systems of this magnitude (see the conference <https://cesam.community/fr/csdm-2024/>).

The objective of this thesis is therefore to initially carry out a study on the inefficiencies of the air transport system, with the aim of being able to propose a new collaborative operational concept on board/ground. To achieve this objective, model-based systems engineering (MBSE) and simulation in the broad sense (including agent-based simulation) will be studied, which will lay the foundations for reliable multi-criteria decision-making. Then, by applying a systems engineering approach, all stakeholders and their needs are studied, in order to be able to identify, as much as possible, exhaustively all the effects, constraints and dependencies that impact the efficiency of the air transport system. To do this, concrete data (e.g. flight radar, weather, interviews with air traffic control operators, etc.) must be used. The goal is to achieve a simulation faithful to reality, in order to (better) understand this complex system.

Organisation du travail de thèse

The thesis work will be organized into three main phases (the State-of-the-Art task inherent to all thesis work is not mentioned as a phase):

The objective of this thesis is therefore to initially carry out a study on the inefficiencies of the air transport system, with the aim of being able to propose a new collaborative operational concept on board/ground. To achieve this objective, model-based systems engineering (MBSE) and simulation in the broad sense (including agent-based simulation) will be studied, which will lay the foundations for reliable multi-criteria decision-making. Then, by applying a systems engineering approach, all stakeholders and their needs are studied, in order to be able to identify, as much as possible, exhaustively all the effects, constraints and dependencies that impact the efficiency of the air transport system. To do this, concrete data (e.g. flight radar, weather, interviews with air traffic control operators, etc.) must be used. The goal is to achieve a simulation faithful to reality, in order to (better) understand this complex system. Multi-criteria aggregation tools can be used to compare solutions with each other.

Phase 1: The first step will consist of an inventory of the existing situation for the air transport system: the stakeholders, their needs, the optimizations made for each system in the air transport system, etc. This will allow you to have a global view as a starting point.

Phase 2: Secondly, the different aspects influencing the efficiency of the air transport system must be identified. Then a modeling of this system in order to be able to analyze the inefficiencies must be done. For this modeling to be used, data must be collected (partially already available) in order to be able to simulate this system, for example with multi-agent approaches.

Phase 3: Modeling and simulations of operational alternatives are validated on real data, and evaluated by multi-criteria analysis, the starting point for proposing a new ground/onboard collaborative operational concept.

This organization can also be represented by the following Gantt chart:

	2024	2025				2026				2027		
	oct-dec	jan-mar	avr-jun	jul-sep	oct-dec	jan-mar	avr-jun	jul-sep	oct-dec	jan-mar	avr-jun	jul-sep
Etude de l'état de l'art	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Identification des parties prenantes et leurs besoins	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Identifications des facteurs d'inefficacité	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Analyse de données	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Modélisation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Afiner le(s) modèle(s) en validant avec des données réelles	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Rédaction du manuscrit de thèse de doctorat et préparation de la soutenance	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figure 1 – Gantt Chart

The thesis work is part of the research activities carried out within the Department of Complex Systems Engineering (DISC) of ISAE-SUPAERO. The DISC develops skills in mathematics and computer science for aeronautical and space engineering. In teaching and research, he is interested in the models, methods and tools necessary to control the behavior and performance of complex systems. This complexity can be induced by the multi-physics or multi-scale nature of the systems studied, their dynamic behavior, their distributed and communicating structure. The activities of this thesis are found in the “Systems Engineering” research group of the DISC, which is interested in the engineering of complex systems with the aim of developing methods, techniques and tools allowing control (i.e. (meaning understand, analyze, evaluate, control and design) the functional, operational behavior and performance of these systems.

Then as part of this thesis, cooperation with Thales and DSNA is set up, and other cooperations are being studied (such as for example the MIT Lincoln Laboratory).

Thesis Advisors

The thesis will be supervised by ISAE-SUPAERO (Rob Vingerhoeds, HDR) from an academic point of view.

In addition, supervisory contributions from an industrial and authority point of view will be provided by a steering committee, Thales (D. Bonnet and F. Barbaresco) and DSNA (S. Chatty).