

Mesures d'inefficacités et qualité : application au  
contrôle aérien

Géraldine BRUNETEAU

juin 2002

ÉCOLE NATIONALE DE L'AVIATION CIVILE

**NOTE À L'ATTENTION DU LECTEUR**

**Ce mémoire est le travail personnel d'un élève de l'ENAC, rédigé lors de son Projet de Fin d'Études dans une entreprise ou un organisme de recherche.**

## Résumé

Devant les retards générés pour les compagnies aériennes et les coûts croissants des systèmes de contrôle, l'intérêt d'une analyse économique du secteur s'affirme. Ainsi, ce mémoire a pour objet la mesure comparative des performances des centres de contrôle en route au travers d'indices fondés sur la théorie économique de la production. Pour ce faire, nous estimons la fonction de coût total du contrôle en route français grâce à une modélisation où l'inefficacité relative des centres est prise en compte. De plus, nous introduisons dans le modèle la notion de qualité du contrôle via une variable sur les retards. Des indicateurs économiques tels les rendements d'échelle, le taux de progrès technique, les coûts marginaux ainsi que des indicateurs de l'inefficacité et de la productivité, nous permettent de caractériser la structure productive du contrôle en route français.

## Summary

Considering delays suffered by airlines and increasing costs of control systems, an economic analysis of the sector is being essential. Thus, this study compares en-route centres performance through indicators based on economic theory of production. In this way, we estimate the total cost function of the french en-route control system by modeling the inefficiency of centres. Moreover a variable of quality, through delays data, is introduced in our model. Economic indicators such as returns to scale, technical progress rate, marginal costs, cost inefficiency and productivity rate, allow us to characterize the en-route control system production.



# Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Christian Bontemps pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité et sa gentillesse. Je tiens également à remercier le Laboratoire d'Économie et d'Économétrie de l'Aérien (LEEA) pour m'avoir accueillie et permis d'effectuer mon stage dans des conditions matérielles optimales. Merci aussi aux membres du LEEA et du Laboratoire d'Optimisation Globale (LOG) pour leur aide.

Merci également à Aloys pour son soutien.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Présentation de l'entreprise</b>	<b>3</b>
<b>2 Le contrôle aérien</b>	<b>7</b>
2.1 Organisation . . . . .	7
2.1.1 Institutions . . . . .	7
2.1.2 Services du contrôle et règles de l'air . . . . .	8
2.1.3 Organisation de l'espace aérien . . . . .	9
2.1.4 Gestion des flux . . . . .	10
2.1.5 Financement du contrôle en route européen . . . . .	10
2.2 Aspects économiques . . . . .	11
2.2.1 Problème des retards . . . . .	11
2.2.2 La régulation économique : vers une maîtrise des coûts . . . . .	13
<b>3 Comparaison des États</b>	<b>17</b>
3.1 Mesures de productivité . . . . .	17
3.1.1 Indices de productivité partielle . . . . .	18
3.1.2 Indices TFP . . . . .	20
3.2 Évaluation des coûts . . . . .	21
3.2.1 Modèle statistique . . . . .	21
3.2.2 Estimation de la fonction de coût . . . . .	22
<b>4 Fonction de coût</b>	<b>23</b>
4.1 Définitions . . . . .	24
4.1.1 Définition de la fonction de coût . . . . .	24
4.1.2 Notion d'inefficacité . . . . .	25
4.2 Modélisation . . . . .	26
4.2.1 Approximation de la fonction de coût . . . . .	26
4.2.2 Modélisation de l'inefficacité . . . . .	27
4.2.3 Décomposition de l'inefficacité . . . . .	29
4.2.4 Méthodes d'estimation de la frontière de coût . . . . .	30
<b>Conclusion</b>	<b>33</b>
<b>Glossaire</b>	<b>37</b>

<b>Annexes</b>	<b>39</b>
A - Concavité de la forme Translog . . . . .	39
B - Lien entre l'inefficacité allocative et les parts de coût . . . . .	41
C - Prix du fonctionnement . . . . .	43
D - Fonction de coût Translog . . . . .	45
E - Calculs de la log-vraisemblance et de l'inefficacité . . . . .	47
F - Mesures de la productivité . . . . .	51
<b>Bibliographie</b>	<b>53</b>



# Introduction

Le transport aérien a connu dans les deux dernières décennies un développement phénoménal. Avec la croissance du trafic est apparue celle des retards atteignant un niveau record en 1999, année particulièrement touchée par le problème de congestion, notamment en raison de la crise du Kosovo. Dans ce contexte, l'année 2001 marque une pause dans le développement du transport aérien : une baisse de la croissance du trafic suivie des événements du 11 septembre ralentissent l'activité du transport aérien. Les problèmes de congestion semblent s'être améliorés mais ils restent préoccupants pour les usagers de l'espace aérien et donc pour les services du contrôle.

À court terme, les problèmes de la régularité sont abordés dans l'optique d'agrandir la capacité nominale des centres de contrôle critiques. Au niveau opérationnel, l'espace aérien a pu être restructuré pour certains centres et le travail des contrôleurs parfois réorganisé. Au niveau technique, de nouveaux systèmes liés à l'environnement de travail des contrôleurs ont été conçus pour améliorer la capacité des centres. Par ailleurs, on constate que le système de redevances, reposant sur le recouvrement des coûts, est tel qu'il n'existe pas d'incitation économique à fournir le bon niveau de capacité tout en minimisant les coûts. C'est pourquoi des réflexions sur les performances économiques des prestataires européens ont été développées. Ainsi, la création de la Performance Review Commission (PRC) en 1998 a pour but de comparer les performances des différents systèmes ATM. Pour ce faire, elle a pour charge d'établir des Rapports d'Examen des Performances (PRR) s'appuyant sur des domaines essentiels de performance et leurs indicateurs correspondants. Des mesures comparatives permettent à la PRC de dresser des objectifs et des recommandations pour les États de la Conférence Européenne pour l'Aviation Civile (CEAC) en matière de gestion de la circulation aérienne. Dix domaines essentiels de performance ont été définis par ordre de priorité :

- Sécurité, Retards, Efficacité économique ;
- Prévisibilité, Accès, Flexibilité, Efficacité du vol, Disponibilité, Environnement ;
- Équité.

La PRC a identifié en Europe des goulets d'étranglement, c'est-à-dire les centres ou aéroports générant le plus de délais, révélant par là l'importance du contrôle en route dans le problème de congestion (environ 90% des goulets sont des centres en route). Par ailleurs, l'efficacité économique est l'un des trois domaines pour lesquels la PRC donne priorité et a déjà conduit des comparaisons quant à la notion de productivité et d'efficacité des services de contrôle en route. Cependant, les comparaisons concernant l'efficacité des centres ne sont pas fondées car le modèle utilisé ne s'appuie en aucun cas sur la théorie économique des coûts. Seule une démarche économique rigoureuse permettrait de comparer justement les performances des centres. Dans cette optique, notre travail est une analyse comparative des centres en terme d'efficacité économique. Elle est appréhendée à travers l'estimation d'une fonction de coût. La fonction de coût mesure le coût minimum nécessaire pour produire une certaine quantité de biens, les prix des

facteurs de production étant fixés. Il est raisonnable de considérer que les prestataires du service de la circulation aérienne en tant qu'entreprise ont une logique de minimisation des coûts. Ainsi, une fonction de coût permettra-t-elle de comparer justement les CRNA entre eux à condition qu'elle soit en accord avec la théorie microéconomique. De plus, nous intégrerons dans notre modèle la notion de qualité du contrôle par l'introduction d'une variable relative au problème de congestion.

En ce qui concerne le contrôle en route français, des analyses comparatives ont été menées au sein du Laboratoire d'Économie et d'Économétrie de l'Aérien (LEEAA) : mesures de productivité et d'inefficacités ainsi qu'une réflexion sur les fondements théoriques de ces mesures. La présentation du LEEAA, lieu du stage, ainsi que de ses activités fera l'objet du premier chapitre.

Le second chapitre est une description succincte du contrôle aérien, de son organisation et de ses principaux aspects économiques. En particulier, nous expliquerons les conséquences économiques du problème des retards puis nous nous intéresserons à la régulation du contrôle aérien, en abordant notamment les questions de la tarification et du changement de structure. Nous y confirmerons la nécessité de mieux connaître les performances économiques et en particulier la structure des coûts des centres de contrôle. D'où l'objet du troisième chapitre qui présente les différentes mesures de performances, européennes et françaises, sous deux axes : la mesure de productivité et l'évaluation des coûts.

Nous avons vu que notre travail s'intéresse à l'estimation de la fonction de coût du contrôle aérien (plus précisément des centres français, ne disposant que des données françaises). Les fondements théoriques sur lesquels nous nous appuyons constituent la première section du chapitre 4, dans laquelle nous introduirons également la notion d'inefficacité. En effet, nous observons en général que les entreprises (ici les centres) ne peuvent pas produire de façon optimale et leur comportement face à la minimisation des coûts n'est généralement pas efficace ; nous verrons que cette inefficacité peut être de deux origines : allocative ou technique. La seconde section du chapitre 4 détaille comment modéliser la fonction de coût en prenant en compte ces notions d'inefficacité et comment l'estimer.

Le chapitre 5 décrit la mise en œuvre de cette modélisation à travers tout d'abord un descriptif des variables nécessaires à notre estimation. En particulier, la variable de qualité du contrôle est introduite : nous utiliserons le nombre de minutes de retards générés par les régulations en route. Nous nous intéresserons ensuite à l'écriture de la fonction de coût et enfin aux résultats bruts, c'est-à-dire aux coefficients directement estimés.

Une fois estimée, la fonction de coût va permettre de calculer un certain nombre d'indicateurs économiques caractéristiques de la performance des centres. Nous pourrions évaluer les rendements d'échelle et de densité, mesurant l'évolution du coût unitaire avec l'augmentation de la production, le taux de progrès technique révélateur de l'influence des changements de technologie, les coûts moyens et marginaux optimaux ; nous évaluerons également l'influence des inefficacités sur l'augmentation du coût total et nous mesurerons la productivité du contrôle en route français à travers l'évolution dans le temps du niveau de production à inputs fixés. La définition et le calcul de ces indicateurs, ainsi que des commentaires quant à leurs valeurs, constituent le chapitre 6.

La plupart des calculs sont détaillés en annexe pour alléger le côté technique du corps principal du rapport et, de cette façon, en faciliter la lecture.

# Chapitre 1

## Présentation de l'entreprise

Mon stage de fin d'études s'est déroulé sous la direction de Christian Bontemps au sein du Laboratoire d'Économie et d'Économétrie de l'Aérien (LEEAA) dépendant de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC).

L'activité aéronautique relève, en France, d'une administration unique : la DGAC, qui est placée sous l'autorité du ministère de l'Équipement et des Transports. Elle se décompose en directions et services parmi lesquels la Direction de la Navigation Aérienne (DNA). La DNA a pour mission d'assurer, au profit de l'ensemble des usagers aériens, la sécurité et la régularité du trafic.

Dans un contexte caractérisé par une harmonisation progressive des systèmes de contrôle aériens européens, le Centre d'Études de la Navigation Aérienne (CENA), service de la DNA, est chargé de mener des études, recherches et expérimentations afin de préparer la navigation aérienne de demain.

Le contrôle aérien étant une activité qui débuta au début des années cinquante, il connut de grandes transformations avec l'utilisation du radar et l'arrivée des premiers ordinateurs. Le CENA y a joué un rôle de pionnier avec le développement des premières générations de système français d'assistance au contrôle, le CAUTRA. Depuis, le contrôle aérien est devenu un système complexe en raison de ses caractéristiques humaines et techniques, du nombre de ses acteurs et de la nécessité d'une intégration européenne de plus en plus poussée. Il doit s'adapter à un contexte en pleine mutation (avec, notamment, la libéralisation du transport aérien). Les techniques utilisées montrent leurs limites en terme d'efficacité et de capacité et imposent aux usagers des contraintes de plus en plus difficiles à admettre. Il faut donc trouver des solutions plus sûres et plus efficaces qui tirent pleinement partie des nouvelles technologies et définir les étapes pour y parvenir : comprendre le présent, préparer le futur, telle est la mission confiée au CENA. À l'heure actuelle, les domaines d'études du CENA concernent ce qui se rapporte (au sens large) au contrôle aérien : gestion du trafic aérien, communications systèmes de séparation embarqués, sécurité des systèmes, simulations arithmétiques et aspects économiques du contrôle aérien.

Le CENA regroupe plus de 200 personnes dont la moitié sont des personnels de la DGAC et l'autre moitié des personnels sous contrat de sociétés de service, de laboratoires, des stagiaires ou des étudiants en thèse. Ce service est organisé en différents départements (quatre) et laboratoires (deux) et il est situé sur deux sites : à Athis-Mons et à Toulouse dans les locaux de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC). Le CENA y assure la tutelle de certains projets d'élèves, de stages, de thèses, de mo-

dules d'enseignement. Les deux laboratoires du CENA sont communs avec l'ENAC et composés de personnels de l'ENAC et du CENA :

- le LOG (Laboratoire d'Optimisation Globale) a pour but d'appliquer des techniques d'optimisation à différents problèmes du transport aérien (résolution de conflits en route, allocation de créneaux, problème de roulage sur les aéroports...) notamment grâce à un simulateur arithmétique performant ;
- le LEEA (Laboratoire d'Économie et d'Économétrie de l'Aérien), créé en juin 1999, a pour mission de développer et d'appliquer au transport aérien des techniques relevant de l'économie et de l'économétrie.

Plus particulièrement, les travaux effectués au LEEA appartiennent au domaine de l'économie des réseaux (tarification du contrôle, étude des structures de contrôle, problèmes de régulation), de la théorie microéconomique de la production (étude des coûts et productivité du contrôle aérien, comparaisons des fournisseurs de services ATC) et de l'économétrie (construction de modèles de prévision de trafic à court et moyen terme). Examinons maintenant de façon plus détaillée les principaux travaux effectués au sein du laboratoire ces deux dernières années.

Commençons par la prévision de trafic. Une étude a été menée pour étudier l'impact des jours particuliers sur la prévision du trafic à court terme ([42]). Le laboratoire étudie également, via une thèse financée par le CENA, une méthodologie de prévision de trafic en mouvements à moyen terme qui autorise une dynamique d'entrée et de sortie des compagnies sur les lignes qu'elles opèrent. Ainsi, cette méthodologie permettra de prendre en compte l'évolution de la structure du réseau à moyen terme et de comprendre les variables qui régissent une telle évolution. Les prévisions faites actuellement au niveau européen se font à structure fixe.

Un autre pôle important des activités de recherche du laboratoire concerne l'application des théories de l'économie industrielle au secteur du contrôle aérien : tarification et incitations, étude des structures des fournisseurs de service.

Dans plusieurs pays d'Europe les services ont connu des réorganisations de structure, avec la mise en place d'entreprises publiques séparées du giron de l'administration. Certains ont même été plus loin en privatisant le service de contrôle, et en confiant celui-ci à une entreprise privée. Les structures institutionnelles du contrôle aérien dans le monde ont été étudiées : quelles sont les structures existantes, comment peuvent-elles se comparer avec celles existant dans d'autres industries de réseau ? Quels sont les changements apportés par ces modifications de structure ?

La tarification, elle, joue un rôle fondamental sur la demande de contrôle des compagnies. Il est important d'étudier les effets de la tarification actuelle, et les éventuels effets de modifications de celle-ci sur le trafic et la congestion, et sur les usagers du système de contrôle. Une thèse a été initiée sur ce thème et se terminera fin 2002. Les redevances actuelles sont analysées, ainsi que différents mécanismes de tarification possibles. Un mécanisme d'enchères est également envisagé.

D'autres travaux annexes ont été menés au laboratoire : des travaux d'expertise pour la DNA, et également une étude sur la limitation de trafic à l'aéroport de Toulouse-Blagnac en collaboration avec la DRE (Direction de la Recherche de l'Équipement) ([24]). L'objet de cette étude était de faire des simulations des stratégies futures des compagnies aériennes à Blagnac en fonction des limitations de trafic possible.

Enfin, nous terminerons par l'activité la plus importante du laboratoire (qui concerne également ce travail) à savoir la performance : l'augmentation du trafic en Europe depuis les deux dernières décennies a créé des phénomènes de congestion de l'espace aérien, les systèmes de contrôle européens étant proches de la saturation. Devant les retards générés pour les compagnies et les coûts croissants des systèmes, l'intérêt d'une analyse économique du secteur s'affirme. Les questions de performances des systèmes de contrôle sont au cœur des préoccupations actuelles des fournisseurs européens. Afin de répondre à ces attentes, il est nécessaire d'abord de mieux connaître la structure productive et aussi de développer des méthodologies de comparaison des fournisseurs de service entre eux.

La première problématique a été initiée via une thèse [36] dans laquelle une fonction de coût a été estimée sur des données françaises. Le calcul d'un certain nombre de grandeurs économiques (rendements d'échelles, coût marginal du contrôle français) a pu ainsi être mis en œuvre à partir de ces résultats. C'est aussi l'objet du travail présenté ici.

D'autre part, les comparaisons des fournisseurs de service européens initiées par la Performance Review Commission (PRC) ont donné lieu à une réflexion méthodologique sur le fondement économique de ce type de comparaisons et sur les conclusions qu'on pouvait en tirer ([5], [4] et [3]). La notion de productivité économique d'une entreprise a été adaptée au cadre du contrôle aérien : cette notion a été proposée pour le calcul de métriques de performance dans le cadre du projet INTEGRA ([34] et [37]). Ces méthodes ont également été appliquées aux centres français afin de pouvoir observer les résultats qu'on pouvait en attendre. Enfin, la sensibilité des résultats au choix des hypothèses a été étudiée (notamment la question : que produit un centre de contrôle?).

Le lecteur pourra se rapporter aux sections 2.2 et 3.1 pour un complément d'informations quant à ces aspects économiques du contrôle aérien (mesures de productivité, changements de structure et modulation de la tarification).



# Chapitre 2

## Le contrôle aérien

Ce chapitre est une présentation du contrôle aérien, de son organisation et de ses principaux aspects économiques, nécessaire à la bonne compréhension des problèmes soulevés et des solutions alors envisagées dans notre étude. Les notions décrites ici sont succinctes et le lecteur non averti pourra se référer aux documents [23] ou encore [41] pour un complément d'information.

Le service du contrôle de la circulation aérienne a pour but d'assurer la sécurité et la régularité des vols en favorisant la cohabitation des différents usagers du transport aérien. Parmi ces utilisateurs de l'espace aérien sont les compagnies aériennes, l'aviation générale et les usagers militaires.

Le contrôle aérien répond à un besoin de sécurité de la navigation aérienne, besoin croissant avec la densité de trafic et qui s'est révélé à mesure que l'aviation se développait. Il s'inscrit dans un cadre réglementaire fort, garant de la sécurité des vols quelles que soient les conditions météorologiques. Voyons quelles sont ces règles et dispositifs.

### 2.1 Organisation

#### 2.1.1 Institutions

Au niveau mondial, régional et national, des institutions s'attachent à définir au mieux un cadre réglementaire adapté au contrôle aérien. Parmi elles, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) créée en 1947 et aujourd'hui ratifiée par plus de 180 États. Elle établit des normes et des recommandations pour réglementer la navigation aérienne et son contrôle au niveau mondial.

Au niveau européen, une autorité unique prend jour en 1960 : l'Organisation Européenne pour la Sécurité de la Navigation Aérienne ou EUROCONTROL. Cette agence, regroupant aujourd'hui 31 États<sup>1</sup>, s'occupe de la coordination du contrôle aérien en Europe et du développement de ses capacités. Parmi les missions d'EUROCONTROL, nous retiendrons la gestion des flux de trafic par le biais de la CFMU (Central Flow Management Unit), le service du contrôle (centre de Maastricht), le calcul, la collecte et la redistribution des redevances de route par le CRCO (Central Route Charges Office ou

---

1. Les États membres d'EUROCONTROL sont : l'Albanie, l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Bulgarie, Chypre, la Croatie, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Italie, l'ancienne République yougoslave de Macédoine, le Luxembourg, Malte, la Moldavie, Monaco, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, la Roumanie, le Royaume-Uni, la Slovénie, la Suède, la Suisse et la Turquie.

Service Central des Redevances en Route), les études grâce à l'EEC (EUROCONTROL Experimental Centre ou Centre d'Études et d'Expérimentation).

Au niveau national, l'aéronautique française relève d'une administration unique : la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). Elle a pour rôle à la fois d'être autorité réglementaire et d'assurer la sécurité de la navigation aérienne. Elle se décompose en directions et services dont la Direction de la Navigation Aérienne (DNA). La DNA a pour mission d'assurer, au profit de l'ensemble des usagers aériens, la sécurité et la régularité du trafic. Parmi ses services, le CENA (Centre d'Études de la Navigation Aérienne) est l'organisme chargé, dans un contexte européen, de concevoir et de promouvoir le futur système de contrôle du trafic aérien<sup>2</sup>.

### 2.1.2 Services du contrôle et règles de l'air

Il faut savoir qu'il existe différents régimes de vol dépendant des conditions météorologiques et de l'usager pour lesquels le service du contrôle aérien se différencie. On distingue trois services :

- le service du contrôle : prévenir les abordages en vol, les collisions au sol, accélérer et ordonner la circulation aérienne.
- le service d'information de vol : fournir les avis et renseignements utiles à l'exécution sûre et efficace des vols.
- le service d'alerte : alerter les organismes de recherche et de sauvetage lorsque des aéronefs ont besoin d'aide.

Les régimes de vol nécessitant différents types de services du contrôle aérien sont :

- le vol à vue ou régime VFR où le pilote utilise les références visuelles extérieures pour piloter son avion. Le dépôt d'un plan de vol<sup>3</sup> garantit le service d'alerte.
- le vol aux instruments ou régime IFR où le pilote utilise les instruments de bord pour piloter son avion. Il y a obligation de dépôt d'un plan de vol et le vol bénéficie de tous les services de la circulation aérienne (contrôle, information et alerte).

Dans cette étude, nous nous intéressons au service du contrôle dont bénéficient les vols IFR. Pour assurer la sécurité et la fluidité de la circulation aérienne, les contrôleurs font respecter des minima de distances qui séparent les aéronefs. Le respect des règles de séparations verticale et horizontale s'inscrit dans la prévention des collisions au sol et des abordages en l'air. Ces règles sont fixées par la réglementation et tendent à évoluer à mesure des progrès techniques vers plus de fiabilité : en ce sens le programme d'EUROCONTROL de réduction de la séparation verticale (RVSM) est en application. Lors du franchissement de ces seuils, les contrôleurs ou les pilotes peuvent rendre compte de l'incident «airprox». De même, une procédure «réclamation» leur permet de signaler une dégradation de la sécurité. D'autre part, une détection automatique de conflits se fait par l'intermédiaire de filets de sauvegarde pour les contrôleurs et grâce à des systèmes embarqués tels TCAS pour les usagers de la circulation aérienne.

---

2. Voir la présentation de l'entreprise au chapitre 1.

3. Un plan de vol renseigne notamment sur la route suivie et les heures caractéristiques du vol.



### 2.1.3 Organisation de l'espace aérien

L'espace aérien est divisé en deux principales régions par une limite de niveau : FL 195 (ou 19500 pieds<sup>4</sup>). Au-dessus, on distingue les UIR (Upper Information Region) et en-dessous les FIR (Flight information Region). Une autre distinction à l'intérieur de ces espaces définit le type de contrôle effectué et dépend de la phase du vol contrôlé. En-dessous du FL 195, on distingue :

- les voies aériennes (Airways) larges de 10 NM<sup>5</sup> ;
- les régions de contrôle terminales (TMA) qui englobent les trajectoires arrivées et départs d'un aéroport (contrôle d'approche);
- les zones de contrôle terminales qui englobent les trajectoires initiales, finales et de circulation au sol; c'est le contrôle d'aérodrome effectué depuis la tour de contrôle (TWR).

Au-dessus du FL 195, tout l'espace est contrôlé jusqu'au niveau de vol 660. Cependant des zones d'activité particulières ont été créées essentiellement pour les besoins de l'Armée de l'Air. Les voies aériennes sont principalement des itinéraires prédéterminés et des itinéraires conditionnels qui traversent des zones militaires. Le concept européen de Flexible Use of Airspace (FUA) ou gestion flexible de l'espace aérien vise à coordonner les activités civiles et militaires.

Le long des voies aériennes et dans l'espace aérien supérieur, le contrôle est dit en route, assuré par des Centres de Contrôle en Route (CCR). En France ils sont au nombre de cinq et sont appelés Centres Régionaux de la Navigation Aérienne (CRNA) ; ils sont basés à Reims, Athis-Mons, Brest, Aix-en-Provence et Bordeaux. Nous concentrerons notre étude sur le contrôle en route qui possède certaines caractéristiques décrites ci-après.

Chaque centre gère sa FIR (avec des délégations au contrôle d'approche) et son UIR et rend les services de contrôle, d'information et d'alerte. Son espace aérien est divisé en volumes élémentaires appelés secteurs de contrôle. À chaque secteur est associée une fréquence radio VHF permettant les communications bilatérales entre les pilotes et le poste de contrôle. Avec l'aide des images radar, le contrôleur dit radariste applique les règles de séparation minimale des avions de son secteur. Il est assisté par un contrôleur organique, chargé de négocier avec les secteurs et centres voisins le transfert des vols et d'informer le premier contrôleur de conflits potentiels. À chaque secteur correspond ainsi une position de deux contrôleurs.

Les contraintes de sécurité et d'espace définissent pour chaque secteur une capacité horaire : c'est le nombre maximal d'avions (répartis sur la plage horaire) que le secteur peut contrôler tout en garantissant un service sûr et efficace. Le découpage de l'espace en secteurs de contrôle doit en principe garantir ce volume de trafic maximal admissible appelé capacité du secteur. Il arrive qu'en période de faible trafic des secteurs soient regroupés permettant l'optimisation des moyens opérationnels et l'entraînement des jeunes contrôleurs.

---

4. 1000 pieds = 305 mètres.

5. 1 NM = 1852 mètres.

## 2.1.4 Gestion des flux

Nous venons de voir qu'il existe une notion de capacité de contrôle liée au nombre maximal d'avions qu'un secteur peut contrôler à la fois. Dans le cas où le nombre d'avions qui demandent à passer dans un secteur (prévus la veille ou constatés le jour même) dépasse cette capacité, il faut instaurer des règles qui vont permettre la réalisation de ces vols via le décalage de leur heure de décollage donc de leur passage dans le secteur critique.

Les plans de vol déposés par les opérateurs aériens (renseignant notamment sur la route suivie et les heures caractéristiques de passage selon les phases de vol : décollage, entrées/sorties par secteur traversé, croisière, approche...) sont collectés et étudiés afin de prévoir et gérer le trafic. En Europe, le système est centralisé et est assuré par la CFMU ; les bénéficiaires de ce service sont les 31 États membres d'EUROCONTROL ainsi que sept États de la Conférence Européenne pour l'Aviation Civile (CEAC). La CFMU répond à la règle : "premier prévu, premier servi" et attribue ainsi des créneaux au décollage afin d'éviter qu'un secteur ne soit surchargé. C'est la régulation, rôle de la gestion des flux ou Air Traffic Flow Management (ATFM). Elle s'applique à obtenir la plus grande ponctualité possible (en particulier en période de fort trafic dite période de régulation) tout en préservant le meilleur niveau de sécurité.

## 2.1.5 Financement du contrôle en route européen

Au fur et à mesure que le coût du contrôle croissait, il est apparu plus satisfaisant économiquement que ce service soit financé par les usagers eux-mêmes d'où le système de redevances, ainsi recommandé par l'OACI. Comme nous l'avons précisé auparavant, le système européen de redevances en route est géré par le CRCO qui traite tous les plans de vol activés des centres de contrôle européens. Le tarif des redevances en route dépend de trois paramètres : la masse maximale au décollage de l'aéronef  $M$ , la distance parcourue dans l'espace contrôlé  $D^6$  et le taux unitaire  $T_u$ .

$$R = T_u \times \frac{D}{100} \times \sqrt{\frac{M}{50}}$$

Le taux unitaire correspond à ce qu'une compagnie paie pour un avion de cinquante tonnes effectuant un vol de cent kilomètres. Il est calculé par chaque pays en fonction des prévisions de trafic sur l'année et correspond à un recouvrement total des coûts<sup>7</sup>. C'est une tarification au coût moyen. En 2002 le taux unitaire français est fixé à 59,9 euros et sera exceptionnellement appliqué à partir du 1er avril 2002<sup>8</sup>.

Ces redevances servent au financement des services de contrôle en route : rémunération des services de la navigation aérienne (personnel, installations, moyens de communication) et de services annexes comme ceux de la météorologie.

On remarque qu'il y a discrimination dans cette tarification car le prix de contrôle du vol diffère selon que l'avion est petit ou gros. La tarification n'est pas fondée sur

---

6.  $D$  est la distance orthodromique entre le point d'entrée et le point de sortie de l'espace concerné ; pour les avions décollant (atterrissant) dans cet espace, cette distance, en France, est ôtée des 20 premiers (derniers) kilomètres supposés contrôlés par les aérodromes de départ (d'arrivée).

7. Le système de recouvrement des coûts est appliqué par tous les pays européens excepté le Royaume-Uni depuis 2001. Nous décrirons en 2.2.2 le cas de la tarification britannique.

8. Voir la section 2.2.1 pour plus d'information.

le coût de production mais plutôt sur la notion de charge marchande : un avion plus lourd paiera de plus grosses redevances mais pourra transporter plus de passagers. C'est pourquoi les compagnies aériennes ont accepté ce tarif fondé sur leur propension à payer. Cependant, nous remarquons que ce tarif ne prend pas en compte les retards, pourtant économiquement très influents dans l'activité des compagnies aériennes, comme nous allons le voir dans la section suivante.

## 2.2 Aspects économiques

### 2.2.1 Problème des retards

Le problème des retards est extrêmement préoccupant pour les usagers de l'espace aérien car il représente des pertes financières énormes et concerne une partie très importante des vols. En effet, les retards créent d'importants problèmes de gestion de l'activité des compagnies en imposant des délais pour leurs rotations et parfois des suppressions de vols. La PRC (rapport [30]) estime pour l'année 1999 une perte économique d'environ 5 milliards d'euros due aux retards en Europe, combinant les coûts pour les compagnies aériennes et ceux liés à la valeur du temps des passagers<sup>9</sup> !

Il faut savoir qu'environ 50% des délais sont générés par le contrôle aérien en route pour cette même année. Il est à préciser que cette année est exceptionnellement touchée par les problèmes de délais en partie à cause de la crise du Kosovo. Cependant, les problèmes de congestion sont toujours critiques : en 2001, au départ des 14 principaux aéroports français, presque un tiers des vols commerciaux sont retardés de plus de 15 minutes dont 20% sont imputés directement à la navigation aérienne (l'enchaînement des rotations, cause indirecte de retards, représente 35% des vols retardés de plus de 15 minutes). Concernant les délais générés par les régulations françaises en 2001, une très grande majorité (84% du nombre de minutes de retards) provenait du contrôle en route<sup>10</sup>. De même, parmi les trente premiers « responsables » de retards dus au contrôle européen en 1999 (d'après le rapport [28]), seuls trois sont des aéroports, le reste étant des centres de contrôle en route (CCR).

Il est donc primordial de s'intéresser au rôle des CCR dans le problème de congestion. Mais, cette question est délicate car l'affectation des retards n'est pas une mesure parfaite et toute interprétation doit se faire avec vigilance. En effet, l'interconnexion des secteurs et des centres (en route, d'approche et d'aéroport) biaise l'affectation des responsabilités : plusieurs secteurs peuvent demander une régulation pour un même vol qui sera attribuée au secteur le plus critique mais dont bénéficieront les autres secteurs demandeurs sans pour autant porter une quelconque responsabilité.

Malgré le ralentissement de l'activité du transport aérien suite aux événements du 11 septembre 2001, le problème des retards reste un problème central qui pénalise les compagnies encore plus fragiles. Elles payent cependant le même prix pour le contrôle d'un vol, qu'il soit retardé ou non ! Les compagnies cherchent à inciter les prestataires du service de la circulation aérienne à mieux gérer leurs coûts pour baisser les tarifs. Déjà en 1994, des petites compagnies aériennes françaises firent la grève des redevances

---

9. Pour plus de détails sur le calcul des coûts du retard, se référer à l'étude [15] et à la note [2].

10. Source : Dossier DNA, la Ponctualité en 2001.

TAB. 2.1 – *Évolution du trafic contrôlé par la France, du taux unitaire et du retard attribué au contrôle en route de 1990 à 2001.*

Année	Trafic <sup>a</sup>	Évolution du trafic	Taux unitaire <sup>b</sup>	Évolution du taux	Retard en route <sup>c</sup>	Évolution du retard
1990	1 602	+5,2%	51,1	+4,9%	nd <sup>d</sup>	nd
1991	1 605	+0,2%	59,6	+16,6%	nd	nd
1992	1 690	+5,3%	62,6	+5,0%	nd	nd
1993	1 676	-0,8%	65,3	+4,3%	nd	nd
1994	1 751	+4,5%	67,0	+2,6%	nd	nd
1995	1 831	+4,6%	66,3	-1,0%	5 373 <sup>e</sup>	nd
1996	1 932	+5,5%	64,0	-3,5%	5 352	nd
1997	2 057	+6,5%	61,4	-4,1%	5 409	+1,1%
1998	2 215	+7,7%	61,9	+0,8%	5 735	+6,0%
1999	2 392	+8,0%	59,9	-3,2%	8 637	+50,6%
2000	2 517	+5,2%	55,0	-8,2%	4 973	-42,4%
2001	2 501	-0,6%	52,4	-4,7%	4 251	-14,5%

<sup>a</sup> En milliers de mouvements ou vols IFR. Source: STAR et STAN.

<sup>b</sup> En euros. Source: DNA.

<sup>c</sup> En milliers de minutes. Source: bilans SCTA et TACT/CASA.

<sup>d</sup> nd: non disponible.

<sup>e</sup> Les données du retard sont disponibles depuis juin 1995. Ce chiffre est donc le nombre de minutes de retard de juin à décembre 1995.

et réclamèrent un moyen de contrôler les dépenses de la DGAC<sup>11</sup>. Les entreprises dans un contexte de crise aiguë du transport aérien voyaient leurs recettes diminuer face à des taxes et des redevances toujours grandissantes. Les compagnies mirent en cause l'établissement d'un budget «sans aucun souci de rentabilité» et déposèrent un recours judiciaire. Le Conseil d'État leur donna raison et obligea la DGAC à rembourser aux compagnies aériennes les sommes «indûment» perçues<sup>12</sup>.

Nous pouvons illustrer les contraintes de congestion et de tarifs auxquelles les compagnies aériennes font face par le tableau de données françaises 2.1. Il permet de comparer dans le temps l'évolution du trafic, celle du taux unitaire donnant le coût du contrôle en route et celle des retards attribués aux régulations françaises pour le contrôle en route (seule mesure, certes imparfaite, dont on dispose).

Une lecture de ces données révèle les difficultés financières rencontrées par les compagnies: les chiffres illustrent la crise aiguë de 1994 et les problèmes de congestion. En effet, de 1990 à 1994, le taux unitaire augmente de presque un tiers pour une croissance du trafic d'à peine 10%! Depuis, l'évolution du trafic notamment a permis à la DGAC de réduire le taux unitaire (exceptée une légère hausse en 1998) mais les compagnies doivent toujours faire face au problème de congestion: les retards après une amélioration en 1996 ne cessent d'augmenter pour atteindre un niveau record en 1999. Le problème des délais semble ensuite s'être amélioré avec la baisse de la croissance du trafic, puis sa

11. Voir article [7].

12. Ces sommes sont déduites des nouveaux taux de taxe fixés rétroactivement par le ministre chargé du budget et le ministre des transports. Pour plus de détails, se référer au rapport de la Commission des Affaires Économiques du Sénat [21].

décroissance depuis septembre 2001<sup>13</sup>, mais la situation des compagnies aériennes aujourd'hui fragilisées reste préoccupante. Dans ce contexte de ralentissement de l'activité, les usagers ont demandé aux prestataires du service de la navigation aérienne de contenir l'augmentation de leurs coûts afin d'éviter une hausse des taux unitaires des redevances en 2002. Tous les États membres d'EUROCONTROL ont d'ailleurs décidé de conserver jusqu'au 31 mars 2002 leur taux 2001 de redevance de route. Ce gel correspond à une avance de la trésorerie auprès des usagers et il est prévu de recouvrer les coûts 2002 par application d'un taux majoré à partir du 1er avril correspondant, en moyenne sur la zone EUROCONTROL, à une hausse de 6,6%. Le taux unitaire français de redevance de route sera de 59,9 euros (+14,3% soit 11,3% hors gel par rapport au taux 2001) à partir du second trimestre 2002<sup>14</sup>.

Ainsi, le contexte économique critique du transport aérien conduit les compagnies à faire pression sur les fournisseurs du service de contrôle vers une meilleure gestion de leur coûts et une optimisation de l'usage de l'espace aérien. Nous allons voir comment les services du contrôle peuvent répondre à cette demande pressante des compagnies. Deux principaux axes de réflexion seront pour cela évoqués : une meilleure répartition de la demande via un changement de tarification tenant compte des contraintes de congestion, et une action sur l'offre elle-même, dans le changement de structure et/ou une régulation des fournisseurs par le système de financement.

## 2.2.2 La régulation économique : vers une maîtrise des coûts

### Agir sur la demande : modifier la tarification

Nous avons vu que les tarifs des redevances appliqués jusqu'alors n'étaient pas parfaitement adaptés au contexte actuel en particulier parce qu'ils ne prennent pas en compte le problème de congestion. De nouvelles tarifications issues de la théorie économique et déjà appliquées dans des secteurs monopolistiques<sup>15</sup> peuvent être envisagées. Elles prennent en compte la notion de qualité du service rendu et tendent vers une allocation optimale des ressources c'est-à-dire une répartition efficace de la capacité entre les usagers de l'espace aérien. Ainsi, une meilleure répartition de la demande permettrait aux fournisseurs du service du contrôle de mieux gérer leur activité et d'améliorer la qualité de leurs prestations. C'est le cas de la tarification de pointe et la tarification par priorités que nous définirons succinctement.

Un tarif de pointe varie en fonction du temps et applique des prix d'autant plus élevés que la période concernée est demandée. Elle est appliquée notamment dans le secteur des télécommunications en France mais aussi à l'aéroport d'Heathrow pour la taxe d'atterrissage depuis le début des années 70. Cependant, dans le cas du contrôle en route, il ne suffit pas de tarifier par tranche horaire mais aussi par zone géographique : cette tarification apparaît alors trop complexe pour d'une part prévoir parfaitement les pointes temporelles et spatiales et d'autre part tenir informés les usagers en temps voulu !

Le système de priorités définirait des classes associées à un niveau de qualité et donc

---

13. Le trafic du 4ème semestre 2001 décroît de 7,4% par rapport à la même période en 2000.

14. Source: Lettre DNA, janvier 2002.

15. Le contrôle aérien est par nature un monopole économique en raison notamment des contraintes de sécurité.

à un prix que la compagnie choisit pour chacun de ses vols. On peut imaginer quatre ou cinq classes de priorités révélant la propension des compagnies à payer une certaine ponctualité. Mais ici aussi le calcul de chaque prix s'avère très délicat.

Certains secteurs monopolistiques utilisent une autre tarification qui discrimine les consommateurs en fonction de leur goût pour le bien : c'est un tarif binôme particulier appliqué par EDF ou encore par France Telecom. Le tarif est la somme d'un terme proportionnel à la quantité (quantité  $\times$  prix unitaire) et d'un droit d'accès. Le prix unitaire est égal au coût marginal et le droit d'entrée est calculé pour recouvrer les coûts<sup>16</sup>. Il semble très complexe d'appliquer ce tarif au contrôle aérien car le modèle de tarification doit prendre en compte les coûts et la nature de la fonction de demande.

Nous remarquons que l'application de ces tarifications doit se faire avec précaution afin de ne pas désavantager les petites compagnies (car ce sont les compagnies les plus lucratives qui pourront s'offrir les créneaux voulus). Que ce soit pour appliquer une tarification de pointe, par priorités ou binôme, une meilleure connaissance de la demande et des coûts est indispensable.

Par ailleurs, pour les compagnies aériennes, il s'agirait plutôt d'améliorer le système de gestion des centres de contrôle lui-même, sans modifier les règles de tarifs de leur point de vue. Pour elles, l'inefficacité se situe dans l'organisation des centres et des incitations à une meilleure maîtrise des coûts pourraient se faire en agissant directement sur l'offre. Voyons quelles régulations envisager sans pour autant modifier les règles du point de vue des compagnies aériennes.

## Agir sur l'offre

**Modulations du système de financement** D'après la théorie économique du monopole, il semblerait qu'aucune incitation ne conduise les fournisseurs du service à mieux gérer leurs coûts. En effet, le contrôle aérien régulé par l'État exerce son activité sans dégager de profit par la tarification au coût moyen, comme nous l'avons vu en 2.1.5. Il serait efficace économiquement si le prix du service était égal au coût marginal de le rendre, optimum atteint dans un contexte économique sans contrainte. Ici, quel que soit le comportement du prestataire du service de la circulation aérienne, son bénéfice sera nul. À partir du système de tarification dans sa forme actuelle (2.1.5), il est possible d'inciter à une meilleure qualité de service par des contraintes sur le taux unitaire comme le régulateur britannique l'a récemment imposé. Ainsi l'augmentation du taux unitaire est plafonnée par un terme dépendant de la conjoncture économique nationale, de l'erreur des prévisions et des retards (price-cap fixé pour cinq ans). Via ce mécanisme où le prix est fixé, l'opérateur pourra agir sur ses coûts et générer alors des bénéfices s'il est plus efficace. Nous ne connaissons pas encore les conséquences de cette nouvelle régulation mais par définition elle se veut incitatrice d'une meilleure maîtrise des coûts et elle prend en compte le problème de congestion.

Considérons également la solution suivante : n'y aurait-il pas meilleure gestion des coûts si le taux unitaire était fixé par un organisme extérieur et non plus par chaque État? Par exemple au niveau européen, imaginons qu'un organisme fixe le taux unitaire

---

16. La théorie économique montre qu'il y a efficacité dans un contexte sans contrainte lorsque le prix du bien est égal au coût marginal. Mais la tarification au coût marginal n'assure pas toujours la suffisance des revenus et l'État devra subventionner le monopole pour qu'il puisse fonctionner : l'ajout du droit d'accès permet de résoudre ce problème.

pour tous les pays. La question qui se pose alors concerne la base de ce taux : devrait-il être une moyenne des pays, une moyenne des dix meilleurs pays ? Quel serait le critère de sélection pour connaître le « meilleur » prestataire ? Là aussi, il nous faudrait mieux connaître les coûts du contrôle aérien et les performances des divers pays.

Il s'agirait donc d'inciter l'opérateur à contrôler ses coûts par le biais de la régulation. Cette régulation économique vers plus d'efficacité peut paraître moins aisée pour des gestions administratives que pour des structures privées. Apparaît alors la volonté de certains pays de privatiser la gestion du contrôle aérien.

**Changements de structure** Nous savons que la France a décidé de conserver une structure administrative. Il en est de même pour certains pays européens qui sont la Grèce et l'ancienne République yougoslave de Macédoine. Mais il existe d'autres modes de gestion où l'État perd de son pouvoir. L'omniprésence de l'État cède la place à une logique économique pour laquelle la gestion du contrôle aérien se veut plus souple, vers une plus grande efficacité. Cette tendance récente s'illustre de deux façons : en transformant les opérateurs en organismes publics (corporations ou agences) ou bien en les privatisant.

Le premier changement conserve le caractère public du service du contrôle et l'agence ainsi créée permet une meilleure flexibilité de gestion et a une certaine responsabilité financière. Ainsi, un établissement public à caractère commercial a été créé par l'Australie en 1988 (Airservices Australia) et par l'Allemagne en 1993 (Deutsche Flugsicherung DFS). De nombreux pays européens ont depuis choisi cette structure d'entreprise publique de droit privé<sup>17</sup>.

Quant à la privatisation totale ou partielle du service de la navigation aérienne, elle fut appliquée par le Canada en 1996 (Nav Canada) et par le Royaume-Uni en 2001 (National Air Traffic Services NATS). Ce qui est intéressant ici, c'est la possibilité unique de mise en concurrence des entreprises pour le marché du service du contrôle. Ainsi, un appel d'offre eut lieu pour la privatisation du contrôle britannique et un consortium de sept compagnies fut sélectionné sous des critères en matière d'investissement et de redevances. Cet actionnaire privé détient 51% du NATS laissant l'actionnaire public minoritaire.

Ces changements de structure ont répondu à une volonté d'assouplir la gestion du contrôle aérien vers une maîtrise des coûts. Mais les opposants aux changements craignent que l'aspect commercial gouverne au détriment de la sécurité et prônent l'utilisation du service public. De plus, une idée de souveraineté nationale du contrôle des avions qui survolent un pays tend aussi vers la gestion administrative. Le débat très délicat soulevé ici nécessite des analyses approfondies vu le caractère récent de ces changements. Notre étude n'étant pas directement liée à ce débat, nous ne faisons que l'évoquer et nous retiendrons que pour chacune des trois structures, il est possible de créer des incitations vers plus d'efficacité à condition que le régulateur et l'opérateur soient gérés indépendamment.

---

17. Voir rapport [32] de la PRC pour un descriptif des statuts des ANSP européens.





# Chapitre 3

## Comparaison des États

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les services du contrôle aérien sont sous la pression des compagnies aériennes pour une maîtrise de leurs coûts. Afin d'inciter les fournisseurs du contrôle à être plus efficaces, il s'agit tout d'abord de mieux connaître leurs coûts et de comparer leurs performances afin de dégager des critères de comparaison. Ainsi, une fois repérés les points faibles et forts de chacun, on aura connaissance des meilleurs systèmes et on pourra améliorer la gestion des prestataires par le biais d'incitations économiques.

Nous avons donc compris que l'incitation vers une maîtrise des coûts du contrôle aérien nécessite au préalable une mesure des performances. Pour cela, des travaux ont été effectués et des indicateurs définis. Nous nous intéressons ici au contrôle européen et en particulier français, étant donnée la disponibilité des informations (données brutes<sup>1</sup> et résultats d'études). Des analyses ont pu cependant être menées dans d'autres pays sans que nous ne puissions en avoir connaissance ; de même, les travaux sur les centres français ne sont pas publics. Ici est soulevé un problème d'ordre politique concernant le manque de divulgation d'informations entre les États prestataires qui entrave les démarches scientifiques.

Les seuls travaux publics européens, à notre connaissance, sont ceux de la Commission d'Examen des Performances (PRC). Quant au contrôle aérien français, des analyses ont été menées par le LEEA : elles s'intéressent à la comparaison de performances par mesure de productivité totale ou par l'estimation d'une fonction de coût.

Dans les travaux européens comme français, la mesure des performances est appréhendée soit par la construction d'indices sur la productivité soit en terme d'efficacité de coût. Dans le premier cas, on s'intéresse à une mesure non-paramétrique et les indices sont calculés directement à partir des données disponibles. Dans le second cas, il s'agit d'approches statistiques fondées (ou non !) sur la théorie économique et relevant du domaine de la microéconomie de la production.

### 3.1 Mesures de productivité

Dans un domaine comme celui du contrôle aérien où plusieurs ressources sont utilisées, la mesure de la productivité est de deux ordres :

- La mesure partielle consiste à comparer la croissance d'un bien produit à celles de plusieurs facteurs de production (mais pas de tous), ou d'un seul comme la

---

1. Nous verrons d'ailleurs en section ?? de quelles données notre étude a besoin.

productivité du travail. Elle a pour inconvénients de ne considérer qu'un sous-ensemble de biens et de ne pas rendre compte de la nature non-homogène des ressources et des biens produits.

- La mesure totale de la productivité (TFP) construite à partir d'indices agrégés pondérés par la part des différentes ressources dans le coût total et des différents biens produits dans la recette totale. Le problème de multiplicité des biens est résolu et cette mesure permet de comparer des entreprises dans le temps.

Nous allons en premier lieu rendre état des objectifs de mesure de la PRC quant à l'efficacité économique des centres de contrôle au travers d'une liste d'indices de productivité partielle à envisager. Nous nous intéresserons en second lieu aux mesures de productivité totale des travaux sur le contrôle en route français.

### 3.1.1 Indices de productivité partielle

L'approche théorique du problème est d'une part décrite dans un rapport de 1999<sup>2</sup> où il est précisé que l'objectif final est de permettre aux prestataires du contrôle aérien de fournir leur service au coût minimal sur le long terme, en respectant les contraintes de sécurité et d'environnement. Les comparaisons économiques se fondent sur l'observation de données en route relatives aux coûts et à la productivité.

D'autre part, un groupe d'études de la PRC (le KPI Drafting Group) s'attache tout particulièrement à définir un système de mesures économiques et des indicateurs essentiels de performance. Un document référencé [33] consacré à l'efficacité économique présente les travaux de ce groupe.

Des mesures de coûts, pour la plupart déjà appliquées dans les PRR, sont proposées et des indices sur la productivité sont également présentés. Les informations classées par pays concernent notamment les coûts totaux, leur répartition par type de dépenses (opérationnelles et relatives au capital) et par catégorie (service de la météorologie, formation...), les coûts par kilomètre contrôlé (coûts unitaires), les dépenses opérationnelles par kilomètre contrôlé ou encore les coûts totaux ou opérationnels par nombre de secteurs.

Ceux relatifs à la productivité du personnel et à la productivité du capital sont par exemple le nombre d'heures de vol ou de kilomètres contrôlés sur respectivement le nombre de contrôleurs et les capitaux fixes. Le tableau 3.1<sup>3</sup> montre un exemple d'indices de productivité partielle : le nombre de kilomètres contrôlés et de vols contrôlés par contrôleur pour 20 pays européens en 1998. Nous remarquons que déjà sur deux indicateurs, il y a disparité des classements : par exemple, la Turquie, classée deuxième pour le nombre de kilomètres contrôlés par contrôleur, a le huitième meilleur indice relatif au nombre de vols contrôlés par contrôleur ; ou encore la Slovénie, avant-dernière pour les kilomètres, est septième pour les vols !

Une remarque générale applicable à tous les domaines de performances étudiés concerne la difficulté liée au manque de données ainsi qu'au problème de divergences dans la taxinomie ATM. Ces contraintes (déjà soulevées en introduction) limitent le niveau de mesure et donc d'analyse en particulier pour ce qui est de la sécurité, des coûts et de l'environnement. Pour cette raison, bon nombre de recommandations émanant de la PRC s'attachent à une meilleure diffusion des informations et une plus grande coor-

---

2. Rapport de la PRC [27].

3. Source: rapport [26] de la PRC.

TAB. 3.1 – *Nombre de kilomètres contrôlés et de vols contrôlés par contrôleur pour l'année 1998, par pays.*

Pays <sup>a</sup>	Kms par <sup>b</sup> contrôleur	Vols par contrôleur
Autriche	681	3 650
Bulgarie	187	667
Croatie	55	358
République tchèque	216	1 033
Danemark	458	2 580
France	304	666
Allemagne	476	1 550
Hongrie	541	2 172
Irlande	469	1 649
Italie	327	774
Malte	317	1 198
Portugal	578	1 334
Roumanie	159	349
République slovaque	179	1 082
Slovénie	128	1 555
Canaries <sup>c</sup>	308	884
Espagne continentale	388	883
Suède	282	869
Suisse	203	1 810
Turquie	637	1 215

<sup>a</sup> Selon disponibilité des données.

<sup>b</sup> En milliers de kilomètres.

<sup>c</sup> Les données permettent de distinguer les Canaries de l'Espagne continentale pour l'établissement des indices.

dination entre les parties intéressées.<sup>4</sup>

Pour palier le manque de données relatives à l'efficacité économique et à la productivité, l'étude sur les indices de productivité partielle s'inscrit dans le cadre d'un projet global de divulgation d'information d'ordre économique [31]. Ce projet mis en place en 2001 s'adresse à tout prestataire du service du contrôle dépendant du CRCO et rend obligatoire la diffusion d'informations tant d'un point de vue général et contextuel (services offerts, statut, pratiques comptables...) que d'un point de vue quantitatif (coûts et revenus, effectifs, bilan financier...).

Ainsi, les études de la PRC menées jusqu'à aujourd'hui n'ont pas encore permis des comparaisons complètes au niveau européen. Cependant, des premières comparaisons (rapport de la PRC [30]) ont pu être effectuées entre les États-Unis et l'Europe grâce à la collaboration de la Federal Aviation Administration (FAA). La PRC déclare que le système européen a une efficacité économique presque moitié moindre et que sa productivité correspond environ à la moitié de celle des USA. En effet, il semble que des coûts totaux et des effectifs similaires gèrent aux USA quasiment le double de volume de trafic! Mais attention, il s'agirait ici aussi d'approfondir ces études afin de pouvoir confirmer ce constat.

### 3.1.2 Indices TFP

Comme nous l'avons vu en introduction de cette section, la mesure totale de productivité se construit à partir d'indices agrégés. Elle représente le montant total de bien agrégé produit par unité de ressource totale agrégée. L'indice TFP est l'indice le plus utilisé dans la littérature sur la productivité dans le secteur des transports.

Les études sur le contrôle aérien français<sup>5</sup> utilisent un indice multilatéral afin de mesurer la productivité totale des facteurs. L'indice le plus utilisé est celui de Caves, Christensen et Diewert (1982). Il se calcule à partir du ratio d'un indice de production sur un indice de ressources utilisées et est construit de manière à conserver la propriété de transitivité. Les calculs reposent sur des hypothèses économiques comme le fait que l'entreprise maximise ses recettes par rapport aux niveaux de biens produits et minimise ses coûts par rapport aux niveaux des ressources.

La mise en pratique de la procédure d'indice multilatéral s'est faite sur les cinq centres régionaux de contrôle en route sur la période 1991-1997 pour la première étude. La seconde étude allonge cette période à dix ans, jusqu'à 2000, et propose pour les quatre dernières années, selon disponibilité des données, des comparaisons d'indices multilatéraux selon le choix de la mesure du bien produit. Ainsi, des comparaisons quant à la productivité des cinq centres ont pu être effectuées, et pour différents choix de production de 1996 à 2000. Il a pu être constaté que les résultats étaient très sensibles à ce choix<sup>6</sup> d'où l'extrême précaution qu'il convient d'adopter quant à l'interprétation de ces comparaisons.

Cette méthode de calcul a donc permis de connaître les performances des CRNA les

---

4. On entend par parties intéressées les autorités, les prestataires du service de la circulation aérienne, les usagers de l'espace, de l'aviation civile, militaire et générale.

5. Voir les travaux de Raffarin et de Salvat [34] et [37].

6. Nous reviendrons sur ce problème de choix de la mesure de l'output pour notre fonction de coût dans la section ??.

uns par rapport aux autres et a l'avantage d'être fondée économiquement et de pouvoir prendre en compte tous les facteurs de production. Cependant elle comporte quelques inconvénients : elle se fonde sur une règle d'agrégation que l'on aurait pu définir tout autrement et surtout elle ne donne pas de véritable indication sur les coûts du contrôle aérien. Un des arguments que l'on peut opposer à cette méthode est que les compagnies, via le système de recouvrement des coûts, font face au coût de chaque fournisseur et non à sa productivité. On peut par exemple être plus productif entre l'année  $n$  et  $n + 1$  tout en étant moins efficace économiquement<sup>7</sup>.

## 3.2 Évaluation des coûts

### 3.2.1 Modèle statistique

Il a été effectué par le centre expérimental d'EUROCONTROL une analyse comparative des coûts du contrôle en route construite à partir d'un modèle statistique [8] et [9], et utilisée par la PRC. Une régression linéaire du coût total du service du contrôle en route sur un certain nombre de grandeurs est estimée pour 16 pays sur une période de cinq années. Les variables explicatives du coût total tiennent compte du service produit, de la taille de l'espace aérien, de la densité du trafic, de sa complexité et du temps. Le coût estimé est alors comparé au coût réel. Le modèle a été spécifié comme suit :

$$\ln C = \alpha_0 + \alpha_1 \ln K + \alpha_2 \ln D + \alpha_3 \ln L + \alpha_4 \ln O + \alpha_5 T + \varepsilon$$

où  $C$  est le coût total du contrôle en route,  $K$  le nombre de kilomètres contrôlés,  $D$  la densité du trafic,  $L$  la distance moyenne d'un vol contrôlé,  $O$  le pourcentage de survol dans le trafic contrôlé,  $T$  un indice des années<sup>8</sup> et les  $\alpha_i$  pour  $i = 0..5$  les paramètres à estimer.

La lecture des estimations du modèle ainsi spécifié montre l'influence statistiquement significative de toutes les variables explicatives.

Cette régression, si elle permet de calculer des corrélations statistiques, n'a aucune signification économique : le fait qu'un coût réel soit supérieur au coût estimé ne signifie pas forcément une inefficacité car ce modèle ne s'appuie en aucun cas sur la théorie économique des coûts. Dans ce sens, une note (Bontemps [1]) nous éclaire sur la limitation d'une telle approche. Au-delà des défauts de la démarche économétrique employée, elle souligne combien il faut être vigilant quant à l'interprétation des résultats<sup>9</sup>. Le modèle «explique» les variations des coûts entre pays et dans le temps mais les écarts observés ne sont en aucun cas liés à des inefficacités, comme le précisent d'ailleurs les auteurs dans le premier rapport.

---

7. Par exemple, dans le cas où un seul bien est produit avec des rendements d'échelle (voir chapitre ?? pour une définition) égaux à 2, doubler la production entre l'année  $n$  et  $n + 1$  conduirait à augmenter le coût de 50% si l'entreprise est efficace. Cependant, imaginons que l'on constate une augmentation du niveau des ressources de 75% : les coûts sont supérieurs aux coûts optimaux et on produit cependant deux fois plus de bien avec 75% de plus de facteurs de production ! Il y a donc amélioration de la productivité et dégradation de l'efficacité économique.

8.  $T$  vaut 1 la première année, 2 la deuxième,...

9. Par exemple, un coefficient de détermination  $R^2$  (variance expliquée/variance totale) de 0,973 ne garantit pas la qualité de la modélisation ! Nous y reviendrons lors de la présentation de nos résultats au chapitre ??.

«Un modèle plus économique, où les coûts seraient appréhendés à travers une fonction de coût, permettrait cependant de calculer ces inefficacités. Cela demande cependant (comme cela est cité dans le papier d'EUROCONTROL) des données plus complètes et plus détaillées.», conclut l'auteur de la note [1].

Le modèle d'EUROCONTROL a certes l'intérêt d'être une véritable interrogation quant à la détermination des coûts du contrôle en route européens, mais il ne peut en aucun cas justifier une prise de décision. Le calcul de rendements d'échelle du rapport [8] et les conclusions du second rapport comparatif ([9]) interprétant les résultats comme des inefficacités ne sont donc pas fondées! Voyons à présent comment une démarche économique rigoureuse permet de comparer les performances des prestataires du contrôle au travers de l'estimation de la fonction de coût des centres de contrôle en route français.

### 3.2.2 Estimation de la fonction de coût

Une comparaison des performances peut se faire via la caractérisation de l'offre du contrôle aérien permettant alors de comprendre les problèmes de fonctionnement auxquels font face les pays. Pour ce faire, on va s'intéresser à l'estimation de la fonction de coût des prestataires du service du contrôle.

Cette fonction permet non seulement de mesurer l'effet des facteurs de production sur le coût mais aussi de déterminer le coût minimum pour produire un niveau de bien donné. De nombreux articles économiques ont appliqué cette méthode dans divers secteurs comme l'industrie, les compagnies aériennes, les banques ou le téléphone. Dans le domaine du contrôle aérien, nous n'avons connaissance que d'une seule analyse menée au LEEA (Rondé-Ousteau [36]). L'estimation de la fonction de coût concerne les 5 CRNA sur la période 1991-1997. Des indices d'économie d'échelle, de progrès technique et de productivité sont calculés et commentés. Cette étude constitue une aide vers l'élaboration de solutions adaptées pour améliorer l'efficacité des centres de contrôle.

Nous avons choisi d'utiliser cette même méthode afin de comparer au mieux les performances du contrôle. En complément de cette première analyse, notre étude possède divers avantages : l'échantillon d'observations plus large, grandi de trois années donc de 15 observations, permet d'améliorer l'estimation et de vérifier la robustesse du modèle ; l'ajout de la variable de qualité représentée par les retards permet la prise en compte du phénomène de congestion dans nos comparaisons.

Nous allons voir comment l'estimation de la fonction de coût permet d'établir dans quelle mesure le contrôle est inefficace et quelle est l'origine de cette inefficacité.

# Chapitre 4

## Fonction de coût

Afin d'étudier l'offre du contrôle aérien français dans son ensemble et de comparer les performances de ses cinq centres en route, nous allons chercher à caractériser sa technologie. La théorie économique suppose que toute entreprise ou prestataire de service a pour objectif de produire un niveau maximal de biens pour un coût minimal. Cette stratégie économique s'exprime au travers de relations mathématiques entre les facteurs de production (inputs) et ce qui est produit (outputs). Ainsi, deux fonctions dites duales<sup>1</sup> caractérisent la technologie de l'entreprise :

- la fonction de production mesure la production maximale à quantités d'inputs données ;
- la fonction de coût mesure le coût minimal pour produire un certain niveau de biens à prix d'inputs donnés.

Même si l'inefficacité peut être appréhendée par l'estimation de l'une ou de l'autre fonction (pour des résultats heureusement équivalents), nous choisissons d'estimer la fonction de coût. D'abord, parce que le niveau d'output (*i.e.* le nombre de vols contrôlés) n'est pas choisi par le fournisseur de service. Il est alors plus naturel de dire que le fournisseur cherche à minimiser son coût à output donné plutôt qu'il cherche à maximiser son profit à inputs donnés. De plus, nous avons vu en section 2.2 que l'on cherche à inciter les prestataires à mieux contrôler leurs coûts : la fonction de coût semble alors plus adaptée pour comparer les centres. Ensuite, d'un point de vue modélisation, il est plus facile de traiter le cas d'une production à plusieurs outputs dans le cadre d'une fonction de coût. Les indicateurs économiques tels les rendements d'échelle, le taux de progrès technique, les inefficacités techniques et allocatives<sup>2</sup> peuvent être calculés simplement une fois la fonction estimée. Par ailleurs, ce choix répond à des exigences techniques générales liées à l'homogénéité linéaire<sup>3</sup> - déterminant le comportement de minimisation des coûts -, aux problèmes de multicollinéarité généralement moindres - car il y a moins de corrélation entre les prix des inputs qu'entre les quantités d'inputs - et à la faculté de mieux déterminer l'origine de l'inefficacité, technique ou allocative, par comparaison avec la fonction de production.

La caractérisation de l'offre du contrôle aérien en route se fera donc à partir d'une fonction de coût que l'on estimera et de l'analyse économique des résultats ainsi générés.

---

1. La dualité de ces deux fonctions tient à leur équivalence sous respect de certaines contraintes : alors l'une comme l'autre permet de parfaitement caractériser la production, voir Varian [40].

2. Nous définirons ces deux types d'inefficacités en section 4.1.2.

3. Nous verrons comment définir l'homogénéité linéaire en section 4.1

Pour cela, nous définirons les fondements théoriques de notre estimation (fonction de coût et inefficacités) puis nous décrirons la modélisation choisie.

## 4.1 Définitions

### 4.1.1 Définition de la fonction de coût

Nous utiliserons les notations suivantes :

- $\bar{X}$ , vecteur des  $n$  quantités d'inputs  $X_i$  et  $\bar{P}$ , vecteur des  $n$  prix des inputs  $P_i$ , pour  $i = 1..n$  ;
- $\bar{Y}$ , vecteur des  $m$  biens produits ou outputs  $Y_j$  pour  $j = 1..m$  ;
- $C$  le coût optimal ;
- $C_i$  les coûts relatifs à l'input  $i$  :  $C_i = P_i X_i$ .

La fonction de coût mesure le coût minimum nécessaire pour produire un certain niveau de biens ( $\bar{Y}$ ) étant donnés les prix des facteurs de production. Le coût moindre est fonction des prix des inputs et du niveau des outputs<sup>4</sup> :

$$C = f(\bar{P}, \bar{Y}) = \min_{\bar{X}} \left( \sum P_i X_i \right)$$

s.c.  $\bar{X}$  permet de produire  $\bar{Y}$

La fonction de coût doit respecter les contraintes dites de régularité par rapport aux prix définies par la théorie économique :

- continuité :  $C = f(\bar{P}, \bar{Y})$  est une fonction continue par rapport aux prix pour des prix strictement positifs ;
- homogénéité linéaire : doubler les prix double aussi les coûts.  
 $\forall t > 0, C(t\bar{P}, \bar{Y}) = tC(\bar{P}, \bar{Y})$  ;
- croissance, correspondant à l'augmentation des coûts avec celle des prix !  
si  $\bar{P}' > \bar{P}$  alors  $C(\bar{P}', \bar{Y}) > C(\bar{P}, \bar{Y})$  ;
- concavité, représentant le fait que lorsque le prix d'un input augmente, alors la part utilisée de cet input diminue : la matrice des dérivées partielles secondes du coût par rapport aux prix est semi-définie négative.

On définit par ailleurs pour chaque input  $i$  la fonction de part de coût  $S_i$  : elle est égale au coût relatif  $C_i = P_i X_i$  divisé par le coût  $C$ . On montre grâce au lemme de Shephard que les fonctions de part de coût sont aussi les dérivées logarithmiques du coût par rapport aux prix<sup>5</sup>. La fonction de part de coût relative au prix de l'input  $i$  s'écrit donc :

$$S_i = \frac{P_i X_i}{C} = \frac{\partial \ln C(\bar{P}, \bar{Y})}{\partial \ln P_i}$$

---

4. s.c. : sous la contrainte.

5. En effet, on a :

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_i} = \frac{\partial C}{\partial P_i} \frac{P_i}{C}$$

et d'autre part le lemme de Shephard permet d'écrire :

$$\frac{\partial C}{\partial P_i} = X_i.$$



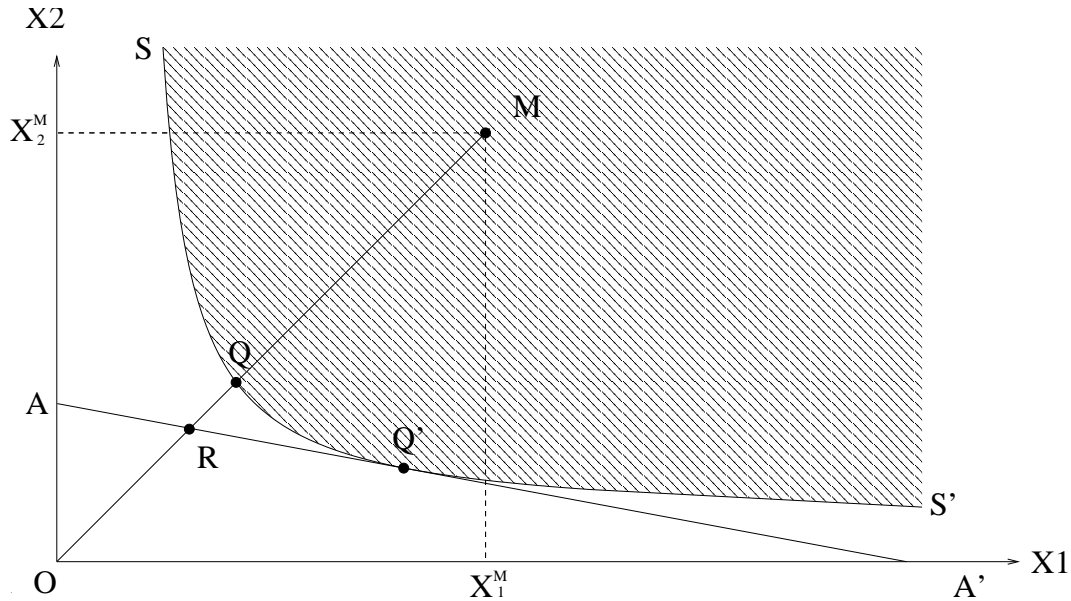


FIG. 4.1 – Inefficacités technique et allocative

#### 4.1.2 Notion d'inefficacité

La notion d'inefficacité intègre d'une part l'inefficacité technique et d'autre part l'inefficacité allocative.

- L'inefficacité technique apparaît lorsque l'entreprise produit moins que le niveau optimal étant donné les quantités d'inputs ou lorsqu'à niveau d'outputs fixe, elle utilise une trop grande quantité d'inputs par rapport au niveau optimal.
- L'inefficacité allocative correspond quant à elle à un choix de niveaux d'inputs dans des proportions sous-optimales par rapport aux prix relatifs, c'est-à-dire une allocation d'inputs ne satisfaisant pas la minimisation du coût.

Afin de mieux comprendre cette distinction, nous allons illustrer ces deux notions pour le cas où il existe deux inputs ( $X_1, X_2$ ) grâce à la figure 4.1.

On considère une entreprise qui produit une quantité d'output  $y^*$  avec  $X_1^M$  unités de bien 1 (de prix  $P_1$ ) et  $X_2^M$  unités de bien 2 (de prix  $P_2$ ). Au niveau d'output  $y^*$  est associée l'isoquante  $SS'$ , ensemble des paires  $(X_1, X_2)$  techniquement efficaces : on ne peut diminuer simultanément ces deux quantités sans diminuer la quantité produite. Tout point à l'«intérieur» de l'isoquante (zone hachurée sur la figure) est techniquement inefficace. C'est le cas de notre entreprise située au point  $M$  qui pourrait produire le même niveau  $y^*$  avec moins de quantités d'inputs, l'optimum de même proportion étant atteint en  $Q$ , comme on le voit sur la figure. La comparaison du point  $M$  avec le point  $Q$  techniquement efficace montre un excès d'utilisation des deux inputs dans la même proportion.

Considérons maintenant les courbes isocoût : ces courbes (qui sont des droites) ont pour pente le prix relatif de l'input 1 et de l'input 2 : l'ensemble des points  $(x_1, x_2)$  d'une courbe isocoût est tel que la dépense  $P_1x_1 + P_2x_2$  est constante le long de la courbe. Parmi ces courbes, il en existe une seule qui est tangente à  $SS'$  (puisque l'isoquante est convexe) : c'est l'isocoût  $AA'$  de notre figure, tangente à  $SS'$  en  $Q'$ . Les courbes isocoûts en dessous de  $AA'$  correspondent à une dépense moindre mais ne permettent pas de

produire  $y^*$  puisqu'elles n'intersectent pas la zone hachurée. Les courbes isocoût situées au-dessus permettent de produire  $y^*$  mais à un coût plus élevé. L'isocoût AA' correspond au coût minimum pour produire  $y^*$ . Tout point de AA' génère le même coût : le coût de produire en Q' est le même qu'en R et est moindre que celui de Q. Il y a meilleure répartition des inputs en Q' qu'en Q car on produit autant,  $y^*$ , mais à moindre coût : c'est une allocation efficace ! Q' est alors le seul point optimal de produire  $y^*$  à prix donnés.

Ainsi, il y a efficacité technique si le point de production se trouve sur l'isoquant ( $M \equiv Q$ ) et il y a efficacité allocative si la combinaison d'inputs minimise le coût ( $Q \equiv Q'$ ).

## 4.2 Modélisation

Nous avons vu quels étaient les fondements théoriques de l'économie de la production. La démarche économétrique consiste à «coller» sur les données dont nous disposons un modèle fondé sur cette théorie. Deux étapes sont nécessaires avant de passer à l'estimation : le choix de la forme de la fonction  $C(\bar{P}, \bar{Y})$ <sup>6</sup> et la modélisation des deux types d'inefficacités.

### 4.2.1 Approximation de la fonction de coût

Ne connaissant pas la forme exacte de la fonction de coût du contrôle aérien, on se propose de l'approcher par une estimation locale type développement limité. C'est le rôle des formes dites flexibles qui sont des approximations au second ordre de fonctions deux fois différentiables<sup>7</sup>. Une forme flexible permet alors d'estimer la fonction de coût si elle en vérifie les propriétés de régularité définies auparavant.

Parmi les formes flexibles communément utilisées, nous choisissons la forme translogarithmique multi-produits dite Translog dont voici l'écriture générale :

$$\ln T = a_0 + \sum_{k=1}^K a_k \ln Z_k + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K a_{kl} \ln Z_k \ln Z_l$$

où T est la variable estimée et  $Z_k$  pour  $k = 1..K$  les K variables explicatives dont dépend T.

Le choix de Translog se justifie par :

- le bon compromis dans le nombre de paramètres permettant à la fois de garder une assez grande liberté (Par exemple, la fonction Cobb-Douglas, qui est un développement limité au premier ordre est plus rigide) tout en ayant peu de paramètres

6. Nous ne considérons ici que des techniques paramétriques.

7. Une approximation au premier ordre est couramment utilisée pour estimer une fonction de coût ou de production : c'est une forme dite Cobb-Douglas. Son écriture générale est :

$$T = A_0 \prod_{k=1}^K Z_k^{A_k}$$

où T est la variable estimée et  $Z_k$  pour  $k = 1..K$  les K variables explicatives dont dépend T.

à estimer (relativement à la liberté engendrée). Ainsi, pour une fonction à trois inputs et une variable de production quinze paramètres seulement sont nécessaires. Bien entendu, plus le nombre de paramètres à estimer augmente, plus on a besoin de données.

- la simplicité des calculs.

Ici, on estime le coût  $C$ , fonction des prix des inputs  $P_i$ ,  $i = 1..n$  et des quantités d'outputs  $Y_j$ ,  $j = 1..m$  d'où l'écriture Translog de la fonction de coût suivante :

$$\begin{aligned} \ln C = & a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \ln P_i + \sum_{k=1}^m a'_k \ln Y_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \ln P_i \ln P_j + \\ & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m a'_{kl} \ln Y_k \ln Y_l + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m a''_{ik} \ln P_i \ln Y_k \end{aligned} \quad (4.1)$$

où  $a_i, a'_k, a_{ij}, a'_{kl}, a''_{ik}$  sont les paramètres à estimer.

N'oublions pas que la fonction Translog est une approximation de la fonction de coût à condition qu'elle en vérifie les propriétés :

- elle est continue, les variables explicatives prix et quantités d'outputs étant strictement positives ici. Ses dérivées partielles secondes sont aussi continues et le théorème de Schwartz impose des conditions de symétrie :
  - $a_{ij} = a_{ji}$  pour tout  $i, j = 1..n$  ;
  - $a'_{kl} = a'_{lk}$  pour tout  $k, l = 1..m$  ;
- l'homogénéité linéaire par rapport aux prix conduit aux équations :
  - $\sum_{i=1}^n a_i = 1$  ;
  - $\sum_{j=1}^n a_{ij} = 0$ , pour tout  $i = 1..n$  ;
  - $\sum_{i=1}^n a''_{ik} = 0$ , pour tout  $k = 1..m$  ;
- la croissance par rapport aux prix est observée dans les données auxquelles nous nous intéresserons ;
- la concavité par rapport aux prix équivaut ici à ce que la matrice hessienne dont les éléments sont les coefficients  $a_{ij}$  soit semi-définie négative<sup>8</sup>, ce que nous vérifierons dans notre étude.

L'application de ces contraintes en les intégrant dans la fonction Translog en simplifie alors l'écriture et réduit le nombre de paramètres à estimer. La forme flexible Translog alors approximation de la fonction de coût devra être estimée à partir de l'observation des différentes entreprises ou organisations. Nous verrons ultérieurement quelle sera sa forme dans le cas particulier de notre application.

Enfin, remarquons que, lorsque tous les termes croisés  $a_{ij}$ ,  $a'_{kl}$  et  $a''_{ik}$  sont nuls, on obtient l'approximation linéaire : une forme de type Cobb-Douglas. Moins flexible, cette forme permet cependant d'estimer des résultats globaux intéressants pour l'analyse économique.

## 4.2.2 Modélisation de l'inefficacité

Les méthodes traditionnelles estiment une fonction moyenne à partir de l'observation des entreprises, supposant que chaque entreprise a réussi à produire de manière efficace.

8. On se référera à l'annexe A pour une démonstration de cette équivalence.

On suppose donc que l'écart entre l'observation et la prédiction est un aléa supposé exogène (indépendant de la volonté de l'entreprise) et pouvant être positif ou négatif.

Pour appréhender l'inefficacité économique, il convient donc de l'inclure dans la modélisation afin de pouvoir l'estimer sur les données. L'idée est de chercher à situer l'activité d'une entreprise par rapport à une frontière efficace plutôt que par rapport à une moyenne. Deux méthodes sont utilisées : la méthode DEA ou Data Envelopment Analysis et la méthode des frontières stochastiques<sup>9</sup>.

L'approche DEA postule qu'il n'y a pas d'aléa dans la production des entreprises, pas d'erreur de mesure. Il existe une frontière de production efficace pour toutes les entreprises du secteur. Celles qui sont sur cette frontière sont efficaces, les autres ne le sont pas. L'avantage de cette méthode est de ne pas nécessiter une paramétrisation de la technologie, l'inconvénient est de considérer qu'il n'y a pas d'erreurs de mesure ni de chocs exogènes dans la production. Tout écart de la courbe est obligatoirement la marque d'une inefficacité productive.

En revanche, la méthode des frontières stochastiques modélise à la fois l'inefficacité et les effets aléatoires. C'est la méthode que nous choisissons.

### Frontière stochastique

Comme nous l'avons vu, la frontière représente l'ensemble des observations les plus efficaces. On définit alors le degré d'inefficacité comme la distance de l'observation par rapport à cette frontière, soit la différence entre l'efficacité maximale et l'efficacité observée. Toutefois les observations empiriques peuvent dévier de la frontière en raison d'aléas exogènes et/ou d'erreurs de mesures. La méthode de frontière stochastique permet d'intégrer ces effets aléatoires en les prenant en compte dans le terme d'erreur. L'erreur définie comme la différence entre la valeur optimale et la valeur observée sera décomposée en deux termes :

- une composante d'inefficacité positive (puisque'elle augmente forcément le coût observé).
- une composante «d'erreur aléatoire» combinant les erreurs de mesure et les bruits statistiques supposés exogènes. En général, l'économètre suppose que cette composante est de moyenne nulle.

La méthode des frontières stochastiques sera donc utilisée dans notre estimation de fonction de coût. Le modèle est défini comme suit :

$$\ln C(\bar{P}, \bar{Y}) = \ln C^*(\bar{P}, \bar{Y}) + u + v \quad (4.2)$$

où  $C$  est le coût total observé,  $C^*$  le coût optimal pour produire  $\bar{Y}$  étant donné le niveau de prix (en général, on prend comme fonction les approximations dont on a parlé précédemment),  $u$  le terme d'erreur relatif aux effets d'inefficacité et  $v$  un terme d'erreur capturant les effets aléatoires. Nous verrons dans la section 4.2.4 comment ces différentes grandeurs sont estimées.

Cette spécification permet donc de mesurer l'inefficacité dans son ensemble et c'est la modélisation la plus utilisée dans la littérature empirique. Cependant, elle ne permet en aucun cas de déterminer l'origine de l'inefficacité. En effet, comme nous l'avons vu en section 4.1, la théorie économique distingue deux principales causes d'inefficacité :

---

9. Voir Greene [11] et Guarda [14].

l'une technique, l'autre allocative. Voyons comment les introduire dans notre modèle économétrique.

### 4.2.3 Décomposition de l'inefficacité

Le terme d'erreur relatif aux inefficacités se décompose en deux éléments capturant l'inefficacité technique pour un et allocative pour l'autre. En supposant ces deux termes additifs, la frontière de coût s'écrit :

$$\ln C = \ln C^* + u_t + u_a + v \quad (4.3)$$

où  $C$  est le coût total observé,  $C^*$  le coût minimum,  $u_t$  le terme d'erreur relatif à l'inefficacité technique,  $u_a$  le terme d'erreur relatif à l'inefficacité allocative et  $v$  le terme d'erreur capturant les effets aléatoires.

Cependant, il est très difficile (voire arbitraire) de pouvoir distinguer dans l'inefficacité globale celle qui provient de l'inefficacité allocative et celle qui provient de l'inefficacité technique avec pour seule référence l'équation (4.3). Pour remédier à cela, l'inefficacité allocative est reliée à l'écart observé entre la part optimale théorique d'un input et sa part observée (voir Kumbhakar (1991, 1997), [18], [19]). Pour chaque input, la fonction de part de coût relative au prix  $P_i$  sera estimée comme suit :

$$S_i = S_i^* + w_i \quad (4.4)$$

où, pour l'input  $i$ ,  $S_i$  est la part de coût observé,  $S_i^*$  la part théorique d'une entreprise produisant la même quantité  $\bar{Y}$  au coût optimal  $\ln C^*$ . Si l'écart  $w_i$  entre ses deux parts est positif, l'input  $i$  est trop utilisé, si  $w_i$  est négatif il est trop peu utilisé et si  $w_i = 0$ , il l'est de façon optimale.

Reste à relier les erreurs d'allocation  $w_i$  au terme d'inefficacité allocative de la fonction de coût  $u_a$  :

$$u_a = g(\bar{W}) \quad (4.5)$$

où  $\bar{W}$  est le vecteur des  $(n-1)$  erreurs  $w_i$ <sup>10</sup>.  $g$  est telle que plus la part du coût s'éloigne de l'optimal, plus l'allocation est inefficace ( $g(0) = 0$ ). Plusieurs formes pour  $g$  ont été utilisées dans la littérature (voir Schmidt [38], Schmidt et Lovell [39], Khumbakar [19] pour les plus utilisées). La discussion sur le choix de  $g$  est assez technique.  $g$  peut être *ad-hoc* ou reliée aux paramètres de la fonction de coût. C'est cette approche que nous adopterons (voir Kumbhakar (1991,1997)). La forme de  $g$  est spécifiée dans l'annexe B<sup>11</sup>.

Pour l'application au contrôle aérien en route, nous verrons ultérieurement que l'estimation de la frontière de coût en particulier avec la décomposition de l'inefficacité fournit des résultats peu cohérents avec la théorie économique (concavité par rapport aux prix). Vu nos contraintes de données, nous préférons donc estimer d'une part le modèle avec inefficacité globale et d'autre part le modèle avec inefficacité décomposée et d'en analyser les résultats respectifs. Avant de passer à l'application empirique, il convient de préciser quelles sont les techniques que nous avons utilisées pour estimer la fonction de coût et les inefficacités.

10.  $n$  inputs auront chacun une fonction de part de coût et toutes seront liées par leur somme (égale à 1).  $(n-1)$  erreurs de part de coût seulement sont indépendantes (somme égale à 0). Une est donc ôtée du vecteur  $\bar{W}$ .

11. En particulier,  $g$  dépend des coefficients relatifs aux inputs de prix  $P_i$  de l'équation 4.1.

## 4.2.4 Méthodes d'estimation de la frontière de coût

Le but de cette section est de montrer comment nous estimons les paramètres de notre modèle : ces paramètres sont les coefficients de la fonction de coût et ceux correspondant au termes d'inefficacité et d'erreurs. Pour plus de facilité dans les notations nous supposons que la fonction de coût optimal  $\ln C^*$  peut s'écrire sous une forme linéaire du type  $Z\beta$ , où  $\beta$  est un vecteur  $k \times 1$  de paramètres à estimer et  $Z$  un vecteur ligne de variables explicatives. Par exemple, pour la fonction Translog à 1 input ( $X$ ) et 1 output ( $Y$ ) :

$$\ln C^* = \alpha + \alpha_Y \ln Y + \frac{1}{2} \alpha_{YY} \ln^2 Y + \alpha_X \ln X + \frac{1}{2} \alpha_{XX} \ln^2 X + \alpha_{XY} \ln X \ln Y$$

Dans ce cas,  $k = 6$ , et on a :

$$\beta = [\alpha, \alpha_Y, \alpha_{YY}, \alpha_X, \alpha_{XX}, \alpha_{XY}]'$$

$$\text{et } Z = [1, \ln Y, \frac{1}{2} \ln^2 Y, \ln X, \frac{1}{2} \ln^2 X, \ln X \ln Y].$$

Le but de l'exercice est d'estimer  $\beta$  ainsi que les termes d'inefficacité. Nous allons voir que nous pouvons estimer le premier sans faire d'hypothèse sur la forme de l'inefficacité mais qu'une spécification plus détaillée est nécessaire pour estimer l'inefficacité.

### Estimation par moindres carrés

Considérons en premier l'estimation d'une fonction de coût avec inefficacité globale du type (4.2) :

$$\ln C(\bar{P}, \bar{Y}) = Z\beta + u + v \quad (4.6)$$

Nous noterons  $\tilde{C}$  le vecteur  $N \times 1$  composé des  $N$  observations  $\ln C_1, \dots, \ln C_N$  de coûts,  $\tilde{Z}$  la matrice  $N \times k$  composé des  $N$  observations des  $k$  variables explicatives  $Z_1, \dots, Z_N$ <sup>12</sup>.

Le vecteur de paramètre  $\beta$  peut être estimé par moindres carrés ordinaires (MCO) :

$$\hat{\beta} = (\tilde{Z}' \tilde{Z})^{-1} \tilde{Z}' \tilde{C} \quad (4.7)$$

L'avantage de l'estimateur des MCO est que l'on n'a pas besoin de faire des hypothèses a priori sur la distribution de  $u$  et  $v$ . L'estimation de  $\beta$  donc de la fonction de coût optimal est convergente, sans biais (excepté pour la constante) et robuste. En outre, cette technique s'accommode du fait de disposer de peu d'observations.

Le fait que la constante soit mal estimée provient du fait que dans une régression par MCO le terme d'erreur est supposé être d'espérance nulle. Or, ici, le terme d'erreur est la somme de l'aléa  $v$  d'espérance nulle et de l'inefficacité  $u$  toujours positive ou nulle (donc d'espérance positive). Tout se passe comme si on avait estimé la régression :

$$\ln C(\bar{P}, \bar{Y}) = \underbrace{Z\beta + E(u)}_{Z\beta'} + \underbrace{u - E(u) + v}_{\text{Erreur globale } q} \quad (4.8)$$

Il faudra donc rectifier la valeur de la constante estimée en y retranchant  $E(u)$ . Une fois estimée la fonction de coût minimal, nous pouvons calculer la différence entre le coût observé et le coût prévu. Cette différence pour chaque observation représente la valeur

12. On rappelle que  $Z_i$  est un vecteur ligne de dimension  $k$ .

de  $u + v$  (notée  $q$ ). Nous ne pouvons à ce stade distinguer la composante d'inefficacité de la composante d'aléa. Il faut donc obligatoirement faire des hypothèses paramétriques supplémentaires afin d'estimer le terme d'inefficacité. En général, on suppose que  $v$  suit une loi normale de variance  $\sigma_v^2$  et que  $u$  suit une loi normale tronquée à zéro de variance  $\sigma_u^2$ . Nous adopterons cette démarche<sup>13</sup>.

Il nous reste donc deux paramètres à estimer :  $\sigma_v$  et  $\sigma_u$ . Pour cela, on utilisera les moments d'ordres 2 et 3 des résidus  $q$  de la régression. Un calcul, que nous ne détaillerons pas ici (voir [20]) donne :

$$E(q^2) = \frac{\pi - 2}{\pi} \sigma_u^2 + \sigma_v^2 \quad (4.9)$$

$$E(q^3) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left( \frac{4}{\pi} - 1 \right) \sigma_u^3 \quad (4.10)$$

Connaissant un estimateur de ces moments (par  $\frac{1}{N} \sum q^2$  et  $\frac{1}{N} \sum q^3$ ), nous pouvons estimer  $\sigma_v$  et  $\sigma_u$  grâce à ce système. Il faut noter à ce stade que rien n'assure, en pratique, de trouver un moment d'ordre 3 positif. Dans ce cas, en appliquant l'équation (4.10), on trouverait un  $\sigma_u$  négatif ! L'usage est d'admettre alors que  $\sigma_u = 0$  (toutes les entreprises sont efficaces). Ce cas ne se retrouvera pas dans l'application empirique.

Une fois  $\sigma_u$  estimé, le terme d'inefficacité sera estimé à partir de la connaissance de  $q$  (voir annexe E pour une présentation de la formule).

On peut améliorer l'estimation en associant à l'équation (4.6), les équations concernant les parts de coûts :  $S_i = S_i^* + w_i = \Gamma_i \beta + w_i$ . La part optimale  $S_i^*$  est également une fonction des paramètres de la fonction de coût (voir l'équation (??) page ?? pour le calcul explicite dans le cadre de l'application empirique). Cela améliore l'estimation mais la rend plus difficile. La difficulté provient du fait qu'en général, les erreurs  $w_i$  associées à chaque part sont corrélées entre elles et avec l'erreur  $v$  de l'équation (4.6). Les moindres carrés ordinaires sont certes toujours convergents mais ils ne sont plus efficaces, et la formule habituelle pour calculer les écarts-types des estimateurs est fautive. On utilisera donc la méthode des moindres carrés quasi-généralisés (MCQG) pour estimer le système composé de l'équation (4.6) et des équations de parts de coûts (on n'en utilisera que  $n-1$  étant donné que la somme des parts est égale à un).

Les méthodes que nous avons exposées ci-dessus ne permettent pas d'estimer une double inefficacité allocative/technique. La raison en est qu'il existe un lien entre les erreurs de parts de coûts et le terme d'inefficacité. Il est très difficile de prendre en compte ce lien dans ce mécanisme d'estimation : nous estimerons alors le système par maximum de vraisemblance.

## Estimation par maximum de vraisemblance

Pour estimer la frontière de coût relative aux équations 4.3 et 4.4, nous allons utiliser la méthode du maximum de vraisemblance à partir de notre ensemble d'observations dit échantillon. Intuitivement, la méthode du maximum de vraisemblance consiste à choisir pour estimation la valeur la plus vraisemblable soit celle qui possède la plus forte probabilité de provoquer l'apparition des valeurs réellement observées dans l'échantillon.

---

13. Le fait de spécifier d'autres formes pour  $u$  donne en général des résultats similaires (voir Kumbhakar [20] pour plus de détails).

À partir de la distribution du paramètre à estimer, on définit la fonction de vraisemblance comme le produit des fonctions de densité de chaque observation ; maximiser cette fonction équivaut à maximiser son logarithme dit log-vraisemblance de l'échantillon alors plus facile à manier.

Ici, nous supposons connues les distributions des termes d'erreur aux paramètres de variance près ; les distributions seront précisées dans le chapitre suivant consacré à la mise en œuvre de l'estimation pour le contrôle aérien. Des calculs mathématiques permettent alors de connaître la fonction densité de probabilité jointe donc la fonction de vraisemblance globale dépendant de tous les termes d'erreur (voir annexe E).

La log-vraisemblance de l'échantillon pourra donc s'exprimer en fonction des termes d'erreur, alors remplacés par les différences «coûts observés moins coûts estimés» et «parts de coût observées moins parts de coût estimées» grâce à la fonction Translog (ou Cobb-Douglas). Ainsi, à partir des données de l'échantillon, la méthode du maximum de vraisemblance révélera les estimations des coefficients  $a_i$ ,  $a'_k$ ,  $a_{ij}$ ,  $a'_{kl}$ ,  $a''_{ik}$  de l'équation 4.1 et des variances des termes d'erreur.

La méthode du maximum de vraisemblance (MV) est théoriquement la plus efficace mais, en pratique, elle manque de robustesse dans le cas où le nombre d'observations est petit. Face à un échantillon de 50 données (ou 30 données avec retard), nous sommes confrontés à la difficulté d'estimer correctement par maximum de vraisemblance une fonction de coût de type Translog. Nous verrons que nous serons alors obligés de nous restreindre à des fonctions de type Cobb-Douglas pour obtenir des résultats cohérents.



# Partie confidentielle

Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons malheureusement pas publier les résultats sur le web .



# Conclusion et perspectives

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire est le résultat de cinq mois de stage au LEEA. Il avait pour objectif de se placer dans le débat européen actuel sur la comparaison des centres en route. Notre volonté était de nous fonder sur la théorie économique au risque de ne pouvoir conclure sur certains points, par exemple, faute de données.

Nous avons vu qu'il était possible d'estimer dans une même étape les notions de productivité et d'efficacité économique. Cela se fait au moyen de l'estimation d'une fonction de coût, fonction que nous avons estimée de façon paramétrique (formes Cobb-Douglas et Translog). Le calcul des principales grandeurs économiques qui peuvent être faits à partir de cette estimation l'ont été. Ils ont été présentés dans le chapitre 6.

Ainsi, nous avons déterminé l'existence de rendements d'échelle et de densité croissants, caractérisant le fait qu'une augmentation de la production diminue le coût moyen (ces résultats confirment d'ailleurs ceux obtenus dans Rondé-Oustau [36]). Nous avons également mis en lumière la présence de progrès techniques car le coût optimal diminue au cours du temps. Puis, les coûts moyens optimaux et marginaux ont été observés, confirmant la croissance des rendements. Nous avons ensuite caractérisé l'inefficacité relative des centres ainsi que son origine, allocative ou technique ; homogènes techniquement, les centres se distinguent par l'allocation plus ou moins efficace de leurs ressources, en particulier par rapport à l'input travail. Enfin, nous avons constaté une augmentation globale dans le temps du niveau de production à inputs fixés, augmentation significative de la productivité des centres. Nos estimations nous ont donc permis de caractériser la structure productive du contrôle en route français sur les périodes étudiées.

En revanche, en ce qui concerne l'estimation de la fonction Translog, nous ne pouvons être que déçus. Hormis l'échantillon total, il est quasiment impossible de tirer quelques résultats intéressants du sous-échantillon 1995-2000. L'intégration de la variable de retard aboutit à des résultats trop vagues pour être utilisés. De plus, les propriétés de concavité et de positivité de la relation erreur dans les parts/ inefficacité allocative ne sont pas vérifiées. Pourtant, cela devra être la modélisation de base de toute étude de ce type au niveau européen : la fonction Translog a une telle richesse (que n'a pas la forme Cobb-Douglas) qu'elle permet d'étudier des effets beaucoup plus fins. Par exemple, elle nous permettrait de calculer empiriquement l'impact d'une réduction des retards en terme de coût. La principale raison de notre échec sur ce point reste, à notre avis, la taille de l'échantillon.

Nous avons eu des problèmes de données. Comme nous l'avons dit, la série de données financières concernant le capital paraît assez hétérogène et certaines observations du début d'échantillon nous paraissent douteuses. La qualité des observations depuis 1996 nous semble meilleure. D'abord d'un point de vue opérationnel, le stockage des plans de vols européens nous permet d'espérer faire tous les traitements souhaités (notamment

le calcul d'autres grandeurs que le nombre d'avions contrôlés). Ensuite, le passage des CRNA en ordonnateur secondaire font que les budgets de chaque CRNA français sont homogènes par rapport au temps (les règles d'affectations comptables antérieures étant, selon la DNA elle-même, sujettes à caution). Nous ne pouvions cependant tronquer notre échantillon depuis 1996 au risque de le rendre trop petit.

Le choix de l'output (nombre de vols) a été fait compte-tenu de problèmes de disponibilité. Il y a un débat sur ce que l'on doit prendre comme mesure de la production d'un centre : nombre de kilomètres, nombre de vols, nombre de minutes ? Il va de soi que chacune de ces entités reflètent un aspect différent et complémentaire des autres. On pourrait les prendre toutes ; la mesure de la production serait alors un triplet (temps, kilomètres, vols). Cependant, l'ajout d'une variable ajoute 6 paramètres à estimer pour la fonction Translog !

La variable de qualité utilisée a été le nombre de minutes de retards. Ce n'est pas la meilleure à notre sens mais, toujours en raison de la disponibilité, nous avons pris celle là. Elle a un inconvénient majeur : son mode de calcul. En Europe, les retards pour un vol donné sont affectés au secteur traversé le plus pénalisant. Un secteur moyennement mauvais peut paraître excellent si tous ceux qui l'entourent sont plus mauvais que lui ! Cela aboutit forcément à des biais (qu'il est malheureusement impossible de redresser) et renforce la non coopération entre les centres. Une variable de qualité des flux en entrée/sortie de centre conviendrait mieux. Comme sa mesure n'existe pas encore, on n'a pu intégrer que les retards.

En guise de perspective, ce travail offre un champ important tant d'un point de vue méthodologique qu'empirique. D'abord il apparaît, au vue des articles scientifiques que nous avons lus, que peu de spécifications différentes ont été estimées. Par exemple, le terme d'inefficacité technique est souvent supposé suivre une normale tronquée ou une exponentielle qui sont des distributions concentrées vers 0. Peut-être que cette spécification influe sur les résultats. D'autres lois doivent être essayées pour estimer la robustesse des résultats (Greene [10] a proposé la loi Gamma). Si cela ne pose pas trop de problèmes calculatoires pour l'estimation par moindres carrés (il faut estimer autant de moments que de paramètres nécessaires), cela semble beaucoup plus difficile pour le maximum de vraisemblance (pour la loi gamma, Greene [13] utilise le maximum de vraisemblance simulé). Ensuite, on pourrait appliquer les résultats de la théorie économétrique sur les données de panel (il faut cependant plus d'observations et plus de CRNA).

D'un point de vue empirique, cette démarche devrait être connue et appliquée au niveau européen : il n'est pas normal que l'on parle d'efficacité relative de pays au moyen d'une régression statistique non fondée économiquement ! Cela dit, il est vrai que les données nécessaires pour ce type d'estimation sont beaucoup plus complètes que celles qui sont disponibles (pour faire quelque chose de rigoureux, il faut plus de moyen !).

Néanmoins, il semble que l'on se dirige vers un plus grand recueil de données économiques grâce à la pression de la PRC. À ce jour, nous ne disposons que des données pour l'année 2000 pour 16 pays européens. Plusieurs problèmes subsistent. D'abord, nous ne disposons pas des données de prix des matières premières (notamment fonctionnement puisque les autres pourraient être estimées). Ensuite, il apparaît que certaines définitions ne revêtent pas la même signification d'un pays à l'autre. Comment harmoniser des fournisseurs qui n'ont pas les mêmes règles de comptabilité (problème des services

comme le STNA ou CENA en France : comment intégrer les personnels et coûts de ces services dans le résultat fourni à l'Europe). Enfin, chaque pays brouille le message en renseignant les items selon sa compréhension de l'item en question : un comptabilisera tous les contrôleurs d'approches et de petits terrains dans le nombre de contrôleurs quand d'autres ne le feront pas. Certains refusent de renseigner le niveau de capital ! Il faudra un certain temps avant de disposer de données fiables mais c'est à ce prix qu'on aura des résultats pertinents !



# Glossaire

ANSP : Air Navigation Services Provider  
APW : Area Proximity Warning  
ATC : Air Traffic Control  
ATFM : Air Traffic Flow Management  
ATM : Air Traffic Management  
CASA : Computer Assisted Slot Allocation  
CAUTRA : Coordonnateur AUtomatique du Trafic Aérien  
CCR : Centre de Contrôle en Route  
CEAC : Conférence Européenne pour l'Aviation Civile  
CENA : Centre d'Études de la Navigation Aérienne  
CFMU : Central Flow Management Unit  
CRCO : Central Route Charges Office  
CRNA : Centre Régional de la Navigation Aérienne  
DFS : Deutsche Flugsicherung  
DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile  
EATMP : European Air Traffic Management Programme  
EEC : EUROCONTROL Experimental Centre  
EOBT : Estimated Off-Block Time  
FAA : Federal Aviation Administration  
FIR : Flight Information Region  
FL : Flight Level  
FMP : Flow Management Position  
FUA : Flexible Use of Airspace  
IFR : Instrument Flight Rules  
KPI : Key Performance Indicator  
LEEAA : Laboratoire d'Économie et d'Économétrie de l'Aérien  
MCQG : Moindres Carrés Quasi-Généralisés  
MCO : Moindres Carrés Ordinaires  
MSAW : Minimum Safe Altitude Warning  
MV : Maximum de Vraisemblance  
NATS : National Air Traffic Services  
NM : Nautic Miles, 1 NM = 1,852 km  
OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale  
PRC : Performance Review Commission  
PRR : Performance Review Report  
RVSM : Reduced Vertical Separation Minimum  
SCTA : Service du Contrôle du Trafic Aérien  
STAN : Système de Traitement des Archives

STAR : Système de Traitement National des Archives  
STCA : Short Term Conflict Alert  
STNA : Service Technique de la Navigation Aérienne  
TACT : CFMU Tactical Computer System  
TCAS : Traffic alerte and Collision Avoidance System  
TFP : Total Factor Productivity  
TMA : Terminal Management Area  
TWR : Tour de contrôle d'aérodrome  
UIR : Upper Information Region  
VFR : Visual Flight Rules



# Annexe A

## Concavité de la forme Translog

Pour la forme Translog, la concavité est satisfaite si la matrice A dont les termes génériques sont  $a_{ij}$ <sup>14</sup> est semi-définie négative, quant les parts de coût des inputs sont strictement positives.

### Démonstration:

Nous savons (section 4.2.1) que la dérivée partielle de la fonction de coût par rapport au logarithme du prix d'un input représente la part du coût de cet input dans le coût total. Les dérivées partielles de cette part de coût s'écrivent donc :

$$\frac{\partial^2 \ln C}{\partial \ln P_j \partial \ln P_i} = \frac{\partial^2 C}{\partial P_j \partial P_i} \frac{P_j P_i}{C} - \frac{\partial C}{\partial P_j} \frac{P_j P_i}{C^2} \frac{\partial C}{\partial P_i} \quad j \neq i$$

$$\frac{\partial^2 \ln C}{(\partial \ln P_j)^2} = \frac{\left( \frac{\partial^2 C}{(\partial P_j)^2} P_j^2 + \frac{\partial C}{\partial P_j} \right) C - \left( \frac{\partial C}{\partial P_j} P_j \right)^2}{C^2} = \frac{P_j \frac{\partial C}{\partial P_j}}{C} + \frac{P_j^2 \frac{\partial^2 C}{(\partial P_j)^2}}{C} - \frac{\left( \frac{\partial C}{\partial P_j} P_j \right)^2}{C^2}$$

ce qui revient à écrire l'expression suivante :

$$\frac{\partial^2 \ln C}{\partial \ln P_j \partial \ln P_i} = \delta_{ji} \frac{P_j}{C} \frac{\partial C}{\partial P_j} - \frac{P_j P_i \frac{\partial C}{\partial P_j} \frac{\partial C}{\partial P_i}}{C^2} + \frac{P_j P_i \frac{\partial^2 C}{\partial P_j \partial P_i}}{C}$$

où  $\delta_{ji} = 1$  si  $j = i$   
et  $\delta_{ji} = 0$  sinon.

Nous savons que  $S_j = \frac{P_j X_j}{C}$  et que par le lemme de Shephard  $\frac{\partial C}{\partial P_j} = X_j$ . Définissons par  $S$  le vecteur des parts de coûts et par  $\hat{S}$  la matrice diagonale ( $n \times n$ ) (où n est le nombre d'observations) qui a le vecteur S sur sa diagonale principale. Définissons aussi par  $\hat{P}$  la matrice diagonale ( $n \times n$ ) qui a le vecteur de prix sur sa principale diagonale et par  $\nabla C_{PP}^2$  la matrice des dérivées partielles secondes du coût par rapport aux prix. L'expression ci-dessus s'écrit alors :

$$\hat{P} \nabla C_{PP}^2 \hat{P} / C = A - \hat{S} + S S^T$$

---

14.

$$a_{ij} = \frac{\partial^2 \ln C}{\partial \ln P_j \partial \ln P_i}.$$

où  $A$  est la matrice hessienne de la forme Translog par rapport au prix des inputs de terme général  $a_{ij}$ , puisque

$$\frac{\partial^2 \ln C}{\partial \ln P_j \partial \ln P_i} = a_{ij}$$

Ainsi, en supposant que  $C$  est strictement positif, la matrice  $\nabla C_{PP}^2$  sera semi-définie négative si et seulement si  $A - \hat{S} + SS^T$  est une matrice semi-définie négative. Il peut être montré que la matrice  $-\left[\hat{S} - SS^T\right]$  est semi-définie négative si le vecteur  $S$  est non négatif (ce qui est en général vérifié). Ainsi, si la matrice  $A$  est semi-définie négative,  $\nabla C_{PP}^2$  le sera aussi.

# Annexe B

## Lien entre l'inefficacité allocative et les parts de coût

Lors de la décomposition de l'inefficacité, nous estimons les équations :

$$\begin{aligned}\ln C &= \ln C^* + u_t + u_a + v \\ S_i &= S_i^* + w_i\end{aligned}$$

où  $C$  est le coût total observé,  $C^*$  le coût minimum estimé,  $S_i$  est la part de coût observé et  $S_i^*$  la part de coût estimée relatives au prix  $P_i$ ,  $u_t$  le terme d'erreur relatif à l'inefficacité technique,  $u_a$  le terme d'erreur relatif à l'inefficacité allocative,  $v$  le terme d'erreur capturant les effets aléatoires et  $w_i$  le terme d'erreur, pour tout  $i = 1..n$ , lié à l'inefficacité allocative.

Est proposée en général une modélisation du lien entre l'inefficacité allocative et le prix des inputs, via les équations de part de coût :

$$u_a = g(\overline{W})$$

où  $\overline{W}$  est le vecteur des  $(n-1)$  erreurs  $w_i$ <sup>15</sup>,  $g$  une fonction qui dépend notamment des coefficients relatifs aux inputs de prix  $P_i$ . Schmidt et Lovell (1979, [39]), ainsi que Kumbhakar (1997, [19]) proposent l'expression suivante :

$$u_a = \ln G + \sum_{i=1}^{n-1} \xi_i S_i^*$$

où  $G$  et les  $\xi_i$  pour tout  $i = 1..n - 1$  sont définis par :

$$\begin{aligned}G &= \sum_{i=1}^{n-1} \frac{S_i^* + \eta_i}{\exp \xi_i} \\ \eta_i &= \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} \xi_j \\ w_i &= \frac{S_i^* (1 - G \exp \xi_i) + \eta_i}{G \exp \xi_i}\end{aligned}$$

---

15.  $n$  inputs auront chacun une fonction de part de coût et toutes seront liées par leur somme, donc  $(n-1)$  erreurs de part de coût sont indépendantes et constituent le vecteur  $\overline{W}$ .

Ces équations sont interdépendantes non-linéaires d'où l'impossibilité d'utiliser cette modélisation avec la forme Translog. En revanche, pour la forme Cobb-Douglas, les  $\eta_i$  sont nuls et il est donc plus aisé de modéliser le lien. Ainsi, dans notre application où trois inputs sont pris en compte donc deux parts de coût ( $S_F$  et  $S_K$ ), nous avons :

$$\begin{aligned}\exp \xi_F &= \frac{S_F^*}{S_F} \frac{1 - S_F - S_K}{1 - S_F^* - S_K^*} \\ \exp \xi_K &= \frac{S_K^*}{S_K} \frac{1 - S_F - S_K}{1 - S_F^* - S_K^*} \\ G &= \frac{1 - S_F^* - S_K^*}{1 - S_F - S_K}\end{aligned}$$

et finalement l'inefficacité allocative :

$$u_a = \ln G + \xi_F S_F^* + \xi_K S_K^*$$

Pour la forme Translog, une alternative est envisagée par Kumbhakar (1991, [18]) :

$$u_a = \bar{W}' K \bar{W}$$

où  $\bar{W}$  est le vecteur des  $(n-1)$  erreurs  $w_i$  et  $K$  une matrice  $(n-1) \times (n-1)$  définie positive<sup>16</sup> qui ne dépend que des coefficients des « produits croisés entre les prix » notés  $a_{ij}$  dans l'équation (4.1). Plus précisément, les coefficients de  $K$  sont déterminés par :

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} k_{lj} &= 0 \text{ quand } l \neq i \\ \text{et } \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} k_{lj} &= -\frac{1}{2} \text{ quand } l = i\end{aligned}$$

Ainsi, dans notre application où trois inputs sont pris en compte donc deux parts de coût ( $S_F$  et  $S_K$ ), nous avons :

$$\begin{aligned}K &= \beta \begin{bmatrix} 1 & -\frac{a_{FK}}{a_{KK}} \\ -\frac{a_{FK}}{a_{KK}} & \frac{a_{FF}}{a_{KK}} \end{bmatrix} \\ \text{avec } \beta &= \frac{1}{2(a_{FK}^2 - a_{FF} a_{KK})}\end{aligned}$$

Il s'agira alors de vérifier que les valeurs propres de  $K$  sont bien positives ou nulles.

---

16. La positivité de  $K$  vient du fait que par définition même, plus la part du coût s'éloigne de l'optimal, plus l'allocation est inefficace.

# Annexe C

## Prix du fonctionnement

Voici les 20 postes de dépenses de fonctionnement fournies par la DNA :

- 1- Carburants
- 2- Autres fluides
- 3- Habillement
- 4- Biens mobiliers
- 5- Matériel de bureau
- 6- Electricité
- 7- Télécommunications et lignes spécialisées
- 8- Prestations et fournitures informatiques
- 9- Maintenance informatique
- 10-Autres services extérieurs
- 11-Immobilier
- 12-Garage
- 13-Frais de mission
- 14-Formation
- 15-Documentation
- 16-Relations publiques
- 17-Impôts et taxes
- 18-Frais de transport hors mission
- 19-Charges exceptionnelles
- 20-Prestations diverses

Cette répartition n'étant disponible que pour les années 1995 à 1999, nous avons utilisé les parts des coûts de 1995 pour les années 1991 à 1994 et les parts de 1999 pour 2000. Ainsi, nous avons pu employer la même méthode d'agrégation pour les 10 années de notre étude.

Nous avons alors regroupé ces 20 postes en 12 catégories dont les prix, relatifs à l'année 1995, sont fournis par les documents INSEE de la comptabilité nationale relative à la consommation intermédiaire par branche<sup>17</sup>.

Ces 12 catégories INSEE sont :

FC1-Habillement, cuir (3)

FC2-Edition, imprimerie, reproduction (15)

ED- Industrie automobile (12)

FF3-Industries du bois et du papier (4+5)

FG1-Production de combustibles et de carburants (1+2)

FG2-Eau, gaz, électricité (6)

EK- Transports (18)

FM2-Location immobilière (11)

EN- Services aux entreprises (8+9+10+14+19+20)

FN1-Postes et télécommunications (7)

FP1-Hôtels et restaurants (13+16)

La catégorie impôts et taxes (17) n'appartenant pas aux données dont on dispose, nous supposons que son prix n'a pas varié depuis 1991 : le rapport des prix relatifs aux impôts et taxes est donc de 1.

Pour chaque catégorie  $i$ , nous connaissons la part des dépenses et le prix relatif. Pour l'année  $t$  et pour chaque CRNA, nous allons donc calculer l'indice de Tornqvist comme suit :

$$P_F = \prod_{i=1}^{12} \left( \frac{p_t^i}{p_{1991}^i} \right)^{\frac{1}{2}(s_t^i + s_{1991}^i)}$$

où  $s_t^i$  est la part de la catégorie  $i$  dans la consommation intermédiaire totale et  $p_t^i$  le prix du bien  $i$  selon l'INSEE.

---

17. Les données des dépenses relatives aux Administrations Publiques n'étant pas disponibles pour la période étudiée.

# Annexe D

## Fonction de coût Translog

On considère une fonction de coût à trois prix :  $P_K, P_L, P_F$  et deux outputs  $Y$  et  $R$  plus le temps  $t$ .

$$\begin{aligned} \ln C = & a_0 + a_K \ln P_K + a_L \ln P_L + a_F \ln P_F + a_Y \ln Y + a_R \ln R + a_t t + t + \\ & \frac{1}{2} a_{KK} (\ln P_K)^2 + \frac{1}{2} a_{LL} (\ln P_L)^2 + \frac{1}{2} a_{FF} (\ln P_F)^2 + \frac{1}{2} a_{YY} (\ln Y)^2 + \frac{1}{2} a_{RR} (\ln R)^2 + \\ & \frac{1}{2} a_{tt} t^2 + \frac{1}{2} a_{KL} \ln P_K \ln P_L + \frac{1}{2} a_{LK} \ln P_L \ln P_K + \frac{1}{2} a_{KF} \ln P_K \ln P_F + \frac{1}{2} a_{FK} \ln P_F \ln P_K + \\ & \frac{1}{2} a_{FL} \ln P_F \ln P_L + \frac{1}{2} a_{LF} \ln P_L \ln P_F + \frac{1}{2} a_{YR} \ln Y \ln R + \frac{1}{2} a_{RY} \ln R \ln Y + \\ & \frac{1}{2} a_{Yt} (\ln Y) \times t + \frac{1}{2} a_{tY} t \times \ln Y + \frac{1}{2} a_{tR} t \times \ln R + \frac{1}{2} a_{Rt} (\ln R) \times t + a_{KY} \ln Y \ln P_K + \\ & a_{LY} \ln P_L \ln Y + a_{FY} \ln P_F \ln Y + a_{KR} \ln P_K \ln R + a_{LR} \ln P_L \ln R + \\ & a_{FR} \ln P_F \ln R + a_{Kt} t \times \ln P_K + a_{Lt} t \times \ln P_L + a_{Ft} t \times \ln P_F \end{aligned}$$

Mais nous savons que cette fonction doit respecter les contraintes de régularité d'une fonction de coût dont :

- la symétrie soit :
  - $a_{KL} = a_{LK}$ ,
  - $a_{KF} = a_{FK}$ ,
  - $a_{FL} = a_{LF}$  ;
  - $a_{YR} = a_{RY}$ ,
  - $a_{Yt} = a_{tY}$ ,
  - $a_{Rt} = a_{tR}$ .
- l'homogénéité linéaire par rapport aux prix qui implique :
  - $a_K + a_L + a_F = 1$  ;
  - $a_{KY} + a_{LY} + a_{FY} = 0$ ,
  - $a_{KR} + a_{LR} + a_{FR} = 0$ ,
  - $a_{Kt} + a_{Lt} + a_{Ft} = 0$  ;
  - $a_{KK} + a_{KL} + a_{KF} = 0$ ,
  - $a_{LL} + a_{LK} + a_{LF} = 0$ ,
  - $a_{FF} + a_{FK} + a_{FL} = 0$ .

Ainsi, la fonction translog s'écrit-elle :

$$\begin{aligned}
\ln C = & a_0 + \ln P_L + a_K \ln \frac{P_K}{P_L} + a_F \ln \frac{P_F}{P_L} + a_Y \ln Y + a_R \ln R + a_t t \times t + \\
& \frac{1}{2} a_{KK} (\ln P_K)^2 + \frac{1}{2} a_{LL} (\ln P_L)^2 + \frac{1}{2} a_{FF} (\ln P_F)^2 + \frac{1}{2} a_{YY} (\ln Y)^2 + \\
& \frac{1}{2} a_{RR} (\ln R)^2 + \frac{1}{2} a_{tt} t^2 + a_{KL} \ln P_K \ln P_L + a_{KF} \ln P_K \ln P_F + a_{LF} \ln P_L \ln P_F + \\
& a_{YR} \ln Y \ln R + a_{Yt} t \times \ln Y + a_{Rt} t \times \ln R + a_{KY} \ln Y \ln \frac{P_K}{P_L} + a_{FY} \ln Y \ln \frac{P_F}{P_L} + \\
& a_{KR} \ln R \ln \frac{P_K}{P_L} + a_{FR} \ln R \ln \frac{P_F}{P_L} + a_{Kt} t \times \ln \frac{P_K}{P_L} + a_{Ft} t \times \ln \frac{P_F}{P_L}
\end{aligned}$$

D'autre part les trois dernières équations associées à l'homogénéité linéaire conduisent notamment à l'égalité suivante :

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} a_{KK} (\ln P_K)^2 + \frac{1}{2} a_{LL} (\ln P_L)^2 + \frac{1}{2} a_{FF} (\ln P_F)^2 = \\
& \frac{1}{2} a_{KK} ((\ln P_K)^2 + (\ln P_L)^2) + \frac{1}{2} a_{FF} ((\ln P_F)^2 + (\ln P_L)^2) + a_{KF} (\ln P_L)^2 = \\
& \frac{1}{2} a_{KK} (\ln \frac{P_K}{P_L})^2 + a_{KK} \ln P_K \ln P_L + \frac{1}{2} a_{FF} (\ln \frac{P_F}{P_L})^2 + a_{FF} \ln P_F \ln P_L + a_{KF} (\ln P_L)^2
\end{aligned}$$

Donc,

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} a_{KK} (\ln P_K)^2 + \frac{1}{2} a_{LL} (\ln P_L)^2 + \frac{1}{2} a_{FF} (\ln P_F)^2 + \\
& a_{KL} P_K \ln P_L + a_{KF} \ln P_K \ln P_F + a_{LF} \ln P_L \ln P_F = \\
& \frac{1}{2} a_{KK} (\ln \frac{P_K}{P_L})^2 + (a_{KK} + a_{KL}) \ln P_K \ln P_L + \frac{1}{2} a_{FF} (\ln \frac{P_F}{P_L})^2 + \\
& (a_{FF} + a_{FL}) \ln P_F \ln P_L + a_{KF} ((\ln P_L)^2 + \ln P_K \ln P_F) = \\
& \frac{1}{2} a_{KK} (\ln \frac{P_K}{P_L})^2 + \frac{1}{2} a_{FF} (\ln \frac{P_F}{P_L})^2 + a_{KF} \ln(\frac{P_K}{P_L}) \ln(\frac{P_F}{P_L})
\end{aligned}$$

Finalement, nous obtenons :

$$\begin{aligned}
\ln C = & a_0 + \ln P_L + a_K \ln \frac{P_K}{P_L} + a_F \ln \frac{P_F}{P_L} + a_Y \ln Y + a_R \ln R + a_t t \times t + \frac{1}{2} a_{KK} (\ln \frac{P_K}{P_L})^2 + \\
& \frac{1}{2} a_{FF} (\ln \frac{P_F}{P_L})^2 + \frac{1}{2} a_{YY} (\ln Y)^2 + \frac{1}{2} a_{RR} (\ln R)^2 + \frac{1}{2} a_{tt} t^2 + a_{KF} \ln(\frac{P_K}{P_L}) \ln(\frac{P_F}{P_L}) + \\
& a_{YR} \ln Y \ln R + a_{Yt} t \times \ln Y + a_{Rt} t \times \ln R + a_{KY} \ln Y \ln \frac{P_K}{P_L} + \\
& a_{FY} \ln Y \ln \frac{P_F}{P_L} + a_{KR} \ln R \ln \frac{P_K}{P_L} + a_{FR} \ln R \ln \frac{P_F}{P_L} + a_{Kt} t \times \ln \frac{P_K}{P_L} + a_{Ft} t \times \ln \frac{P_F}{P_L}
\end{aligned}$$



# Annexe E

## Calculs de la log-vraisemblance et de l'inefficacité

**Inefficacité décomposée** Dans le cas où nous distinguons inefficacité technique et inefficacité allocative, nous allons estimer le système :

$$\begin{cases} \ln C &= \ln C^* + u_t + u_a + v \\ S_F &= S_F^* + w_F \\ S_K &= S_K^* + w_K \end{cases}$$

où  $C^*$ ,  $S_F^*$  et  $S_K^*$  sont estim es grâce aux équations données en ??, et les termes d'erreur ont, par hypothèse, les caractéristiques suivantes :

- $u_t$  est i.i.d. et suit une loi normale tronquée positive  $|\mathcal{N}(0, \sigma_t^2)|$  ;
- $u_a = g(\bar{W})$ <sup>18</sup> ;
- $\bar{W}$  est i.i.d. et suit une loi normale  $\mathcal{N}(0, \Sigma)$ <sup>19</sup> ;
- $v$  est i.i.d. et suit une loi normale  $\mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$  ;
- $u_t$ ,  $\bar{W}$  et  $v$  sont indépendants ;
- nous noterons  $\varepsilon = u_a + u_t + v$ .

On calcule alors la fonction densité de probabilité jointe (voir Kumbhakar [18]) :

$$h(\varepsilon, \bar{W}) = f(\bar{W})g(\varepsilon|\bar{W})$$

où  $f(\bar{W})$  est la densité marginale de  $\bar{W}$  et  $g(\varepsilon|\bar{W})$  la densité conditionnelle de  $\varepsilon$  sachant  $\bar{W}$ . Or, pour  $\varepsilon$  seul  $u_a$  dépend de  $\bar{W}$ . D'où :

$$h(\varepsilon, \bar{W}) = f(\bar{W})k(u_t + v)$$

À partir de Kumbhakar et Lovell [20] nous obtenons ensuite pour une observation la log-vraisemblance du système (??) égale au logarithme de la densité de probabilité

18. L'annexe B fournit l'expression de cette fonction.

19. La matrice de covariance des erreurs de parts de c ot est :

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_f & \sigma_{fk} \\ \sigma_{fk} & \sigma_k \end{bmatrix}$$

jointe<sup>20</sup> :

$$L = \text{const.} - 1/2 \ln |\Sigma| - \frac{1}{2} \overline{W}' \Sigma^{-1} \overline{W} - \ln \sigma - \frac{(u_t + v)^2}{2\sigma^2} + \ln \Phi \left( (u_t + v) \frac{\lambda}{\sigma} \right)$$

où *const* est un terme constant,  $\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_v^2}$ ,  $\lambda = \frac{\sigma_t}{\sigma_v}$  et  $\Phi$  est la fonction de distribution de la loi normale centrée réduite.

L'espérance conditionnelle du terme d'inefficacité technique peut aussi être calculé pour chaque observation et plus particulièrement l'espérance de son exponentielle utilisée comme indicateur économique :

$$E(\exp u_t | \varepsilon) = \frac{\Phi(\sigma_e + \frac{\mu}{\sigma_e})}{\Phi(\frac{\mu}{\sigma_e})} \exp(\mu + \frac{\sigma_e^2}{2})$$

où  $\sigma_e = \frac{\sigma_t \sigma_v}{\sigma}$ ,  $\mu = (\varepsilon - u_a) \frac{\lambda}{1 + \lambda^2}$  et  $\Phi$  est la fonction de distribution de la loi normale centrée réduite.

Or nous savons que les erreurs s'expriment en fonction des valeurs observées et valeurs approchées et ceci pour les  $N$  observations. Nous avons

$$\overline{W} = \begin{bmatrix} S_F - S_F^* \\ S_K - S_K^* \end{bmatrix}$$

et  $u_t + v = \varepsilon - u_a = \ln C - \ln C^* - g(\overline{W})$ .

Ainsi, la log-vraisemblance pour une observation, à une constante près, s'écrit :

$$L = -\frac{1}{2} \ln |\Sigma| - \frac{1}{2} \overline{W}' \Sigma^{-1} \overline{W} - \ln \sigma - \frac{(\ln C - \ln C^* - g(\overline{W}))^2}{2\sigma^2} + \ln \Phi \left( (\ln C - \ln C^* - g(\overline{W})) \frac{\lambda}{\sigma} \right)$$

où  $\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_v^2}$ ,  $\lambda = \frac{\sigma_t}{\sigma_v}$  et  $\Phi$  est la fonction de distribution de la loi normale centrée réduite.

**Inefficacité globale** Dans le cas où nous considérons l'inefficacité dans son ensemble, nous allons estimer les équations :

$$\begin{aligned} \ln C &= \ln C^* + u + v \\ S_F &= S_F^* + w_F \\ S_K &= S_K^* + w_K \end{aligned}$$

où  $C^*$ ,  $S_F^*$  et  $S_K^*$  sont le coût et les parts optimaux,  $u$  le terme d'inefficacité globale,  $v$  le terme d'erreur relatif aux aléas et  $w_F$  et  $w_K$  les erreurs de parts de coût. Pour calculer l'inefficacité globale (voir le chapitre ??), nous spécifions les caractéristiques des termes d'erreur  $u$  et  $v$  comme suit :

- $u$  est i.i.d. et suit une loi normale tronquée positive  $|\mathcal{N}(0, \sigma_u^2)|$  ;

---

20. Dans un souci de simplification d'écriture, s'agissant ici d'un problème de maximisation, la valeur des termes constants alors sans influence dans notre estimation n'est pas précisée.

- $v$  est i.i.d. et suit une loi normale  $\mathcal{N}(0, \sigma_v^2)$  ;
- $u$  et  $v$  sont indépendants.

L'espérance conditionnelle de l'exponentielle du terme d'inefficacité globale peut aussi être calculée pour chaque observation (voir Kumbhakar et Lovell [20]) :

$$E(\exp u | (u + v)) = \frac{\Phi(\sigma_e + \frac{\mu}{\sigma_e})}{\Phi(\frac{\mu}{\sigma_e})} \exp(\mu + \frac{\sigma_e^2}{2})$$

où  $\sigma_e = \frac{\sigma_u \sigma_v}{\sigma}$ ,  $\mu = (u + v) \frac{\lambda}{1 + \lambda^2}$  et  $\Phi$  est la fonction de distribution de la loi normale centrée réduite.



# Annexe F

## Mesures de la productivité

Une fonction transformation d'une structure générale de production peut être écrite :

$$F(\ln Y_1, \dots, \ln Y_m, \ln X_1, \dots, \ln X_n, t) = 1$$

où les  $Y_i$  ( $i = 1 \dots m$ ) désignent les outputs, les  $X_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) désignent les inputs, et  $t$  le temps. La différenciation totale de cette fonction donne :

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial F}{\partial \ln Y_i} d \ln Y_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \ln X_i} d \ln X_i + \frac{\partial F}{\partial t} dt = 0$$

On peut alors définir l'augmentation de productivité de deux façons (Caves, Christensen, Swanson (1981), voir [36]) :

- comme le taux auquel tous les niveaux d'outputs peuvent s'accroître dans le temps, les niveaux d'inputs étant fixés, c'est-à-dire tels que  $\frac{d \ln Y_i}{dt} = \frac{d \ln Y_j}{dt}$  et  $d \ln X = 0$ . Ce taux peut alors s'écrire en terme de dérivées partielles de la fonction de transformation :

$$PGY = - \frac{\frac{\partial F}{\partial t}}{\sum_{i=1}^m \frac{\partial F}{\partial \ln Y_i}}$$

- comme le taux auquel tous les niveaux d'inputs peuvent décroître dans le temps, les niveaux d'outputs étant fixés, c'est-à-dire tels que  $-\frac{d \ln X_i}{dt} = -\frac{d \ln X_j}{dt}$  avec  $d \ln Y = 0$ . En terme de dérivées partielles de la fonction de transformation cette augmentation de productivité peut s'écrire :

$$PGX = - \frac{\frac{\partial F}{\partial t}}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \ln X_i}}$$

En définissant les rendements d'échelle comme l'augmentation proportionnelle de tous les outputs due à une augmentation proportionnelle de tous les inputs, la variable temps étant fixée, nous pouvons écrire ces rendements d'échelle de la façon suivante :

$$RE = - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \ln X_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{\partial F}{\partial \ln Y_i}}$$

Les deux calculs de productivité (PGY et PGX) sont donc liés par le niveau de rendement d'échelle puisque  $PGY = RE \cdot PGX$ . Ainsi, les deux définitions de l'augmentation de productivité sont équivalentes si  $RE = 1$ , c'est-à-dire si les rendements d'échelle sont

constants.

Si la firme minimise ses coûts en fonction de ses inputs, la fonction de coût total s'écrit :

$$\ln C = G(\ln Y_1, \dots, \ln Y_m, \ln P_1, \dots, \ln P_n, t)$$

Ainsi,  $C = \sum_{i=1}^n P_i X_i$  et le programme de la firme est alors :

$$\text{Min } C \text{ sous la contrainte } F(\ln Y_1, \dots, \ln Y_m, \ln X_1, \dots, \ln X_n, t) = 1$$

et les conditions de premier ordre sont :

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln Y_i} - \lambda \frac{\partial F}{\partial \ln Y_i} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_i} - \lambda \left( \frac{\partial F}{\partial \ln X_i} \frac{\partial \ln X_i}{\partial \ln P_i} \right) = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n$$

$$\frac{\partial \ln C}{\partial t} - \lambda \frac{\partial F}{\partial t} = 0$$

D'où

$$\lambda = \frac{-1}{\sum_{i=1}^q \frac{\partial F}{\partial \ln X_i}}$$

et

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln Y_i} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial \ln Y_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \ln X_i}}$$

$$\frac{\partial \ln C}{\partial t} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial t}}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \ln X_i}}$$

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln Z_i} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial \ln Z_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial \ln X_i}}$$

Ainsi, les rendements d'échelle peuvent se calculer grâce à la fonction de coût total de la manière suivante :

$$RE = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\partial \ln C}{\partial \ln Y_i}}$$

et les calculs de productivité sont :

$$PGY = - \frac{\frac{\partial \ln C}{\partial t}}{\sum_{i=1}^m \frac{\partial \ln C}{\partial \ln Y_i}}$$

$$PGX = - \frac{\partial \ln C}{\partial t}$$

# Bibliographie

- [1] Christian BONTEMPS. De l'utilisation de l'économétrie : exemple sur le «cost-benchmarking». CENA note NT00-891, octobre 2000.
- [2] Christian BONTEMPS. Commentaires sur l'étude ITA portant sur les coûts des délais ATC. CENA note NT01.942, novembre 2001.
- [3] Christian BONTEMPS. Comparaison d'indices de performance de la navigation aérienne. CENA note NT01-941, octobre 2001.
- [4] Christian BONTEMPS and Jean-Marc POMERET. Performance de la navigation aérienne. CENA note NT00-657, mars 2000.
- [5] Christian BONTEMPS and Marianne RAFFARIN. Mesures de productivité appliquées au contrôle aérien. CENA note NT00-656, mars 2000.
- [6] Ronald BRAEUTIGAM Andrew DAUGHETY and Mark TURNQUIST. A firm specific analysis of economies of density in the US Railroad industry. *The Journal of Industrial Economics*, Vol 33, 1984.
- [7] Tribune Desfossés. Taxes : les petites compagnies tirent le signal d'alarme, janvier 1994.
- [8] EEC EUROCONTROL. *Progress towards cost-benchmarking of the European ATM system*. EUROCONTROL, juin 2000. No.07/00.
- [9] EEC EUROCONTROL. *Progress towards cost-benchmarking of the European ATM system, update*. EUROCONTROL, juillet 2001. No.17/01.
- [10] William GREENE. A gamma distributed stochastic frontier model. *Journal of Econometrics*, Vol 46:pp 141–164, 1990.
- [11] William GREENE. *Handbook of Applied Econometrics*, chapter Frontier Production Function. North-Holland, 1997.
- [12] William GREENE. *Econometric analysis*. Prentice Hall, 4ème édition, 2000.
- [13] William GREENE. Simulated likelihood estimation of the normal-gamma stochastic frontier function. New York University, septembre 2000.
- [14] Paolo GUARDIA and Abdelaziz ROUABAH. *Efficacité et performance des banques en Europe : une analyse «stochastic frontier» sur des données en panel*. Cellule de Recherche en Economie Appliquée, Luxembourg, 1999.
- [15] ITA Institut du Transport Aérien. *Cost of air transport delay in Europe*. ITA, novembre 2000.
- [16] Subal KUMBHAKAR. On the estimation of technical and allocative inefficiency using stochastic frontier function: the case of US class 1 railroads. *International Economic Review*, Vol 29:pp 727–743, 1988.
- [17] Subal KUMBHAKAR. Production frontiers, panel data, and time-varying technical efficiency. *Journal of Econometrics*, Vol 46:pp 201–211, 1990.

- [18] Subal KUMBHAKAR. The measurement and decomposition of cost-inefficiency: the translog cost system. *Oxford Economic Papers*, Vol 43:pp 667–683, 1991.
- [19] Subal KUMBHAKAR. Modeling allocative inefficiency in a translog cost function and cost share equations: an exact relationship. *Journal of Econometrics*, Vol 76:pp 351–356, 1997.
- [20] Subal KUMBHAKAR and Knox LOVELL. *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge University Press, mai 2000.
- [21] Jean-François LEGRAND. Commission des affaires économiques sur le projet de loi relatif à l'organisation de certains services au transport aérien. Technical Report 53, Sénat français, 1998-1999.
- [22] Nathalie LENOIR. *Une approche économique de la congestion aérienne*. Thèse de doctorat, Université des Sciences Sociales de Toulouse, 1995.
- [23] Georges MAIGNAN. *Le contrôle de la circulation aérienne*. Que sais-je?, Presses Universitaires de France, 1991.
- [24] Michel MAMAN. *Scénarios de limitation de trafic à Toulouse Blagnac : modélisation et optimisation*. Mémoire de DEA, Université des Sciences Sociales de Toulouse, septembre 2001.
- [25] Tae OUM and Chunyan YU. *Winning airlines - Productivity and cost competitiveness of the world's major airlines*, volume Vol 6 of *Transportation Research, Economics and Policy*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [26] PRC Performance Review Commission. *Performance Review Report PRR1*. EUROCONTROL, juin 1999.
- [27] PRC Performance Review Commission. *The PRC's european ATM performance measurement system*. EUROCONTROL, mai 1999.
- [28] PRC Performance Review Commission. *Special Performance Review Report on Delays PRR2*. EUROCONTROL, novembre 1999.
- [29] PRC Performance Review Commission. *Performance Review Report PRR3*. EUROCONTROL, mai 2000.
- [30] PRC Performance Review Commission. *Performance Review Report PRR4*. EUROCONTROL, avril 2001.
- [31] PRC Performance Review Commission. *Specification for information disclosure*. EUROCONTROL, avril 2002.
- [32] PRC Performance Review Commission. *Performance Review Report PRR5*. EUROCONTROL, mai 2002.
- [33] PRU Performance Review Unit. *Cost-effectiveness and productivity KPIs*. PRU, octobre 2001.
- [34] Marianne RAFFARIN. *Les mesures de productivité : application au contrôle aérien*. Mémoire de DEA, Université Paris I - Panthéon - Sorbonne, 1999.
- [35] Guillaume ROGER. *Le reroutage comme remède à la congestion: le cas de la France*. Mémoire de Fin d'Etudes, Ecole Nationale de l'Aviation Civile, 2000.
- [36] Isabelle RONDE-OUSTEAU. *Coût et productivité de la navigation aérienne en France*. Thèse de doctorat, Université des Sciences Sociales de Toulouse, 2001.
- [37] Sophie SALVAT. *Calculs et comparaisons des indices de performance sur la navigation aérienne*. Rapport de stage, Centre d'Etudes de la Navigation Aérienne, 2001.



- [38] Peter SCHMIDT. *An error structure for system of translog cost and share equations*. Department of Economics, Michigan State University, 1984.
- [39] Peter SCHMIDT and Knox LOVELL. Estimating technical and allocative inefficiency relative to stochastic production and cost frontiers. *Journal of Econometrics*, Vol 9:pp 343–366, 1979.
- [40] Hal VARIAN. *Microeconomic Analysis*. Norton and Company, 3ème édition, 1992.
- [41] André XECH. *Cours de Circulation Aérienne*. ENAC - Cours pour Elèves Ingénieur, 2002.
- [42] Karim ZBIDI. *Modélisation et prévision à court terme de la demande du contrôle aérien*. Mémoire de DEA, Université des Sciences Sociales de Toulouse, juin 2000.
- [43] Arnold ZELLNER. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests of aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association*, Vol 57:pp 500–509, 1962.