



**HAL**  
open science

# Les conséquences de la réforme aéroportuaire pour les territoires : apports d'une simulation informatique multi-agents

Christopher Jankee, Michel Carrard, Sébastien Verel, Eric Ramat

## ► To cite this version:

Christopher Jankee, Michel Carrard, Sébastien Verel, Eric Ramat. Les conséquences de la réforme aéroportuaire pour les territoires : apports d'une simulation informatique multi-agents. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2020, pp.957. hal-02965863

**HAL Id: hal-02965863**

**<https://hal.science/hal-02965863>**

Submitted on 18 Apr 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



---

## Les conséquences de la réforme aéroportuaire pour les territoires : apports d'une simulation informatique multi-agents

*The consequences of the airport reform for the territories: contributions of a multi-agent computer simulation*

*Consecuencias de la reforma aeroportuaria en los territorios: contribución de una simulación informática multi-agente*

**Christopher Jankee, Michel Carrard, Sébastien Verel et Éric Ramat**

---



### Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergegeo/35537>

DOI : [10.4000/cybergegeo.35537](https://doi.org/10.4000/cybergegeo.35537)

ISSN : 1278-3366

### Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Bibliothèque de l'Université du Littoral Côte d'Opale



### Référence électronique

Christopher Jankee, Michel Carrard, Sébastien Verel et Éric Ramat, « Les conséquences de la réforme aéroportuaire pour les territoires : apports d'une simulation informatique multi-agents », *Cybergegeo: European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 957, mis en ligne le 12 octobre 2020, consulté le 18 avril 2023. URL : <http://journals.openedition.org/cybergegeo/35537> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergegeo.35537>

---

Ce document a été généré automatiquement le 16 février 2023.



Creative Commons - Attribution 4.0 International - CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

---

# Les conséquences de la réforme aéroportuaire pour les territoires : apports d'une simulation informatique multi-agents

*The consequences of the airport reform for the territories: contributions of a multi-agent computer simulation*

*Consecuencias de la reforma aeroportuaria en los territorios: contribución de una simulación informática multi-agente*

Christopher Jankee, Michel Carrard, Sébastien Verel et Éric Ramat

---

## Introduction

- 1 La libéralisation du ciel européen, à la fin des années 1980, a profondément modifié le transport aérien en France (Pavaux, 1995 ; Bresson, 1997 ; Varlet, 1997 ; Derosier, 1998 ; Molin, 1998 ; Zembri, 2000, 2005). La desserte aérienne du territoire national dans le cadre d'un service public est devenue l'exception face aux règles du libre marché (Dacharry, 1992 ; Dupéron, 2001). La concurrence entre les compagnies historiques, conjuguées au développement des compagnies à bas-coûts, a également transformé le rôle des aéroports (Griselin, Ormeaux, 1999 ; Starkie, 2002 ; Thompson, 2002). Face à la pression concurrentielle, les aéroports sont gérés désormais comme des entreprises (Delvové, 2007). Cette évolution est renforcée avec la privatisation de certains aéroports régionaux et la délégation au privé de la gestion de nombreux aéroports locaux. Cette concurrence aéroportuaire est d'autant plus forte que la France dispose d'un réseau d'aéroports particulièrement dense.
- 2 C'est dans ce contexte qu'est intervenue la réforme aéroportuaire de 2004 et 2005. Les collectivités territoriales ou leurs regroupements sont dorénavant en charge des 150 aéroports secondaires que compte la France. Les grands aéroports régionaux (à

l'exclusion de ceux gérés par le Groupe ADP (Aéroports de Paris)) sont gérés par des sociétés aéroportuares dont le capital peut à terme être vendu à des opérateurs privés (à l'instar de Toulouse, Bordeaux et Nice).

- 3 Face à ces changements, la Cour des comptes, dans son rapport de 2008, préconisait de profiter de la réforme des aéroports pour développer des synergies d'exploitation entre aéroports. Selon la Cour, « *le bénéfice le plus attendu [de la réforme aéroportuaire] est celui qui pourra résulter des rapprochements et alliances entre gestionnaires d'aéroports, rendus possibles pour les sociétés aéroportuares et pour les aéroports décentralisés* ».
- 4 Dans cette étude, la simulation informatique multi-agents sert à évaluer les stratégies aéroportuares (coopération ou concurrence) les plus aptes à la survie des aéroports. Dans cette optique, l'outil informatique permet de repérer, au fil des cycles de négociations entre compagnies aériennes et aéroports, l'évolution des proportions des différentes catégories d'agents au sein de la population initiale. Ce faisant, notre contribution vise à tester les recommandations de la Cour des comptes concernant les stratégies aéroportuares à mettre en place par les collectivités territoriales. Ce travail s'inscrit à la suite de l'étude prospective portant sur les conséquences de la réforme aéroportuaire (Carrard, 2013).

## Contexte général

- 5 Le secteur du transport aérien a connu de profondes mutations en trois décennies, qui ont fortement impacté les compagnies aériennes, les aéroports et les territoires. Nous allons rappeler les principaux éléments de cette évolution, éléments qui constituent la trame de notre simulation informatique.

### La libéralisation du transport aérien et le développement des compagnies *low cost*

- 6 La libéralisation du transport aérien en Europe (1987-1997) a profondément transformé ce secteur d'activité. Au niveau européen, la création d'un vaste marché du transport aérien a fortement dynamisé l'offre de mobilité aérienne. Sur la période 2005-2015, cela a représenté en France plus de 30 millions de passagers supplémentaires, soit une croissance du trafic de 240%<sup>1</sup>.
- 7 Cette explosion du trafic européen a été portée par les compagnies *low cost*. Ces compagnies ont été à l'origine de l'augmentation de 70% du nombre de vols ou de sièges intra-européens entre 1995 et 2012 (Dobruszkes, 2014). Plusieurs facteurs expliquent cette croissance. Alors que les transporteurs traditionnels privilégient la stratégie de réseau en étoile – ou *hub and spokes* – à partir duquel ils développent des liaisons moyen et long-courriers entre métropoles européennes, les compagnies à bas-coûts ont opté pour la desserte d'aéroports secondaires. Profitant d'un pouvoir de négociation beaucoup plus favorable, elles organisent des rotations rapides et à moindre coût de leurs flottes. Le développement concomitant d'Internet a facilité la relation directe entre compagnies et passagers en évitant les coûts des intermédiaires. Certaines compagnies *middle cost*<sup>2</sup> ont fait le choix de développer des liaisons à partir d'aéroports importants pour capter une clientèle à plus haute contribution, concurrençant les transporteurs traditionnels qui peinent à être aussi compétitifs.

- 8 Ainsi, cette croissance du trafic a largement bénéficié, dans un premier temps, aux aéroports locaux, tels que Carcassonne ou Bergerac, puis dans un second temps, aux grandes plateformes régionales (Nice, Nantes, Bordeaux, etc.). Les compagnies *low cost* détiennent désormais 20 % de parts démarché du trafic domestique métropolitain et 48 % de parts de marché du trafic européen. Si la part de ce trafic est moins importante comparée à d'autres pays européens<sup>3</sup>, il représente tout de même une composante essentielle de l'activité de nombreux aéroports français.

## Les effets de la concurrence sur les aéroports

- 9 Avec la libéralisation du transport aérien, la concurrence entre les compagnies historiques conjuguées au développement des compagnies à bas coûts a conduit à une nouvelle répartition du pouvoir des forces en présence et a transformé le rôle des aéroports. Les aéroports et surtout les aéroports secondaires sont devenus un élément dans la chaîne de valeur des compagnies (Barrett, 2005). Ils sont intégrés dans les stratégies des compagnies, bas coûts notamment, en vue d'augmenter leur rentabilité. Les aéroports sont également en concurrence les uns les autres pour attirer à la fois les compagnies aériennes et les passagers (Oum *et al.*, 1993 ; Dormoy, 1997 ; Moller, 2001). Dans cette perspective, de nombreux aéroports locaux doivent se vendre<sup>4</sup> auprès des compagnies *low cost* afin d'assurer les dessertes aériennes nécessaires au développement économique des territoires.
- 10 En ce qui concerne la concurrence sur les passagers, la stratégie développée par les aéroports consiste à étendre leur zone de chalandise pour en capter le plus grand nombre. Il s'agit principalement d'une concurrence entre zones d'influence d'aéroports proches. La concurrence sur les passagers peut également se faire sur le trafic de correspondance pour les aéroports qui servent de hubs (internationaux et régionaux). Concernant la concurrence entre aéroports et compagnies, les stratégies sont multiples et visent à améliorer la qualité des services, réduire les coûts de touché<sup>5</sup>, prospecter de nouveaux besoins et de nouvelles opportunités de dessertes afin de faire venir de nouveaux transporteurs.
- 11 Il ressort de ces évolutions que la répartition spatiale de l'activité aéroportuaire consécutive à la libéralisation du transport aérien tend naturellement à se concentrer sur un nombre restreint d'aéroports (Carrard, 2016). Une bonne approximation de cette répartition peut être donnée par la loi des 20/80 de Pareto, à savoir 80% du transport aérien transite par 20% des aéroports. En France, plus que dans les autres pays européens, on observe cette répartition entre ADP et les grands aéroports régionaux, puis entre ces aéroports et les aéroports locaux (décentralisés). La logique de marché à l'œuvre dans le secteur aérien renforce cette organisation spatiale de l'activité aéroportuaire. Elle favorise les principaux aéroports, ceux qui sont adossés à des métropoles dynamiques.

## Les enjeux de la réforme aéroportuaire

- 12 L'objectif de la réforme aéroportuaire était d'adapter le cadre juridique à ce nouvel environnement. Elle s'est déroulée en deux étapes<sup>6</sup>. La première a été initiée par la loi du 13 août 2004 relative aux libertés et responsabilités locales. Cette loi a décentralisé la gestion de 150 aéroports locaux aux collectivités ou à leurs groupements<sup>7</sup>. La seconde

étape fixée par la loi du 20 avril 2005 relative aux aéroports, a transformé Aéroports de Paris (ADP) en société anonyme et permet aux aéroports régionaux exclus de la décentralisation d'être transférés à des sociétés aéroportuares spécialement constituées<sup>8</sup>.

- 13 La loi du 13 août 2004 a transféré aux collectivités territoriales ou à leurs groupements la propriété, la compétence ainsi que l'ensemble des droits et obligations afin d'assurer le bon fonctionnement des aérodromes qui se trouvent dans leur ressort géographique. Le transfert de propriété du patrimoine de l'État porte sur les terrains, les ouvrages et installations y prenant place ainsi que les biens meubles affectés spécifiquement à l'aéroport. Le transfert de compétences concerne la définition de la stratégie de développement de l'aéroport, la détermination du régime d'exploitation et, le cas échéant, le choix d'un exploitant. Ces compétences portent également sur l'organisation du financement, ce qui couvre la tarification des services aéroportuares.
- 14 Au terme de cette décentralisation, dix-neuf aéroports ont été transférés aux régions, vingt-neuf aux départements, soixante et un à des groupements de communes et quarante et un à des communes<sup>9</sup>.
- 15 L'article 7 de la loi de 2005 portant sur les aéroports régionaux exclus de la décentralisation prévoit que chaque Chambres de commerce et d'industrie (CCI) concessionnaire d'un aéroport régional puisse créer une société aéroportuaire permettant une adaptation de leur mode de gestion. Un transfert de concession s'accompagne d'un allongement de sa durée (40 ans au maximum). Cette mesure doit accroître la visibilité des concessionnaires pour amortir la dette existante et réaliser les investissements nécessaires. Un nouveau cahier des charges a également été adopté par décret en 2007<sup>10</sup>. Depuis juin 2014 et la création de la société Aéroport Marseille Provence, ce processus de transfert de concessions à des sociétés aéroportuares est arrivé à son terme en France métropolitaine.
- 16 Si l'État s'était engagé à ce qu'un actionariat public soit maintenu jusqu'en 2013<sup>11</sup>, le capital des sociétés aéroportuares peut être dorénavant ouvert aux investisseurs privés. Après l'aéroport de Toulouse-Blagnac, les députés ont adopté en février 2015 l'article 49 de la loi Macron sur la privatisation des sociétés de gestion des aéroports de Nice et de Lyon.

## L'évolution du cadre réglementaire européen

- 17 Au niveau européen, les nouvelles lignes directrices de 2014 imposent de nouvelles contraintes aux aéroports<sup>12</sup>. L'objectif de la Commission est la disparition complète des aides publiques au fonctionnement à partir de 2024. Les aéroports devront alors être en mesure de couvrir la totalité de leurs coûts d'exploitation. Jusqu'à cette date, les aides au fonctionnement sont encadrées : 50 % du déficit d'exploitation pour les aéroports accueillant moins de 3 millions de passagers par an et 80 % pour les aéroports accueillant jusqu'à 700 000 passagers par an. Concernant les aides aux investissements, la règle autorise une aide publique dégressive pour les aéroports dont le trafic est inférieur à 5 millions de passagers (jusqu'à 25 % pour les aéroports de 3 à 5 millions de passagers par an, jusqu'à 50 % pour un trafic de 1 à 3 millions de passagers par an, jusqu'à 75 % pour un trafic inférieur à 1 million de passagers par an).
- 18 La variable clé pour réussir ce challenge, notamment celui de la suppression des aides publiques au fonctionnement à horizon de 10 ans, est l'amélioration très forte du

couple productivité/performance des aéroports concernés par ces seuils. Par extension, l'amélioration de la productivité dans un contexte de concurrence généralisée entre les plateformes européennes et non européennes est un enjeu qui concerne tous les aéroports, même ceux dont le trafic est supérieur à 3 millions de passagers par an. Une seconde interrogation tout aussi importante porte sur ce qu'il adviendra des aéroports qui ne parviendront pas à accroître leurs performances.

- 19 Face à ces changements, la Cour des comptes, dans son rapport (2008), préconise de profiter de la réforme des aéroports pour développer des synergies d'exploitation entre aéroports. En effet, selon la Cours « *le bénéfice le plus attendu [de la réforme aéroportuaire] est celui qui pourra résulter des rapprochements et alliances entre gestionnaires d'aéroports, rendus possibles pour les sociétés aéroportuaires et pour les aéroports décentralisés* ». C'est dans cette perspective que nous allons maintenant présenter la méthodologie retenue pour notre travail.

## La méthodologie : la simulation informatique multi-agents

- 20 La simulation informatique multi-agents est une approche méthodologique qui connaît un succès croissant auprès des chercheurs en sciences sociales pour simuler la dynamique des phénomènes sociaux. Cela s'explique par le fait qu'elle constitue une méthode de recherche puissante et originale. À la suite de Cartier et Forgues (2006), de Varennes (2011), de Manzo (2014), de Livet *et al.* (2014), il est possible de lister les principaux avantages de cette méthode. Tout d'abord, la simulation impose un effort de formalisation pour construire un modèle à partir duquel le chercheur va interpréter le phénomène étudié. Si le modèle est nécessairement une représentation simplifiée de la réalité, il permet grâce à la simulation de produire des données qui peuvent être ensuite comparées à des données empiriques. Le second avantage tient au fait que la simulation permet d'approcher les conditions de l'expérimentation. Ce point est particulièrement important pour les sciences sociales. Enfin, la simulation présente l'avantage d'être une aide à la découverte, notamment de phénomènes émergents, lorsqu'elle porte sur des phénomènes sociaux qui sont complexes par nature. Globalement, cette démarche favorise l'interdisciplinarité (psychologie/économie, sociologie/géographie, etc.) tout en évitant le biais qui consiste à réduire une discipline scientifique à une autre.
- 21 En matière d'aménagement de l'espace où les interactions entre acteurs sont déterminantes, la simulation, notamment sous la forme des modèles basés agents, est bien adaptée à l'analyse des phénomènes d'émergence (Sanders, 2001). Le géographe suédois Thorsten Hägerstrand (1965) a été le premier à concevoir une simulation pour étudier la diffusion de deux innovations agricoles en Suède. Un peu plus tard, dans sa réflexion sur la ségrégation raciale des villes américaines, Thomas Schelling (1978) a utilisé une simulation en montrant que l'agrégation de micro-comportements spontanés et non coordonnés conduit à la formation de ghettos urbains. Le modèle utilisé, dénommé le solitaire de Schelling, a été souvent répliqué (Bruch, Mare, 2006 ; Clark, Fossett, 2008) et est à l'origine d'une riche controverse pour déterminer si, en l'absence de toute coordination entre les acteurs, un ordre non désiré peut émerger spontanément à partir d'un désordre initial (Pancs, Vriend, 2007 ; Forsé, Parodi, 2010).

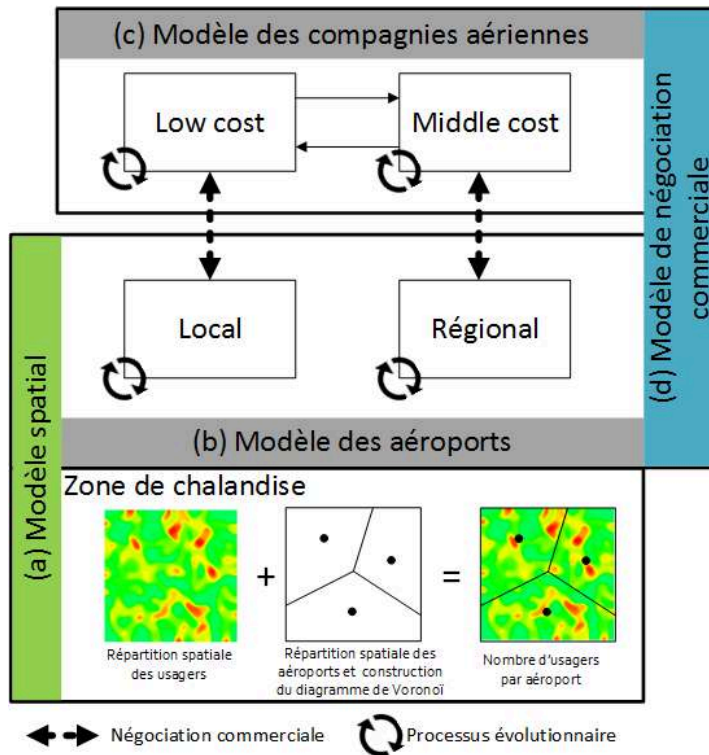
- 22 Au tournant des années 2000, le recours à la simulation informatique sur des problématiques d'aménagement se multiplie. Sans viser l'exhaustivité, on peut rappeler les travaux de Nils Ferrand, dans lesquels il développe une simulation multi-agents pour traiter la question de la décision publique et de la négociation des acteurs (Ferrand, 1997). Audard (2006) et Antoni et Vuidel (2010) utilisent des modèles multi-agents pour aborder la question des mobilités urbaines. Leroux et Berro (2010) ont simulé, par partir d'un modèle d'ultimatum issu de la théorie des jeux, une négociation entre acteurs publics et privés au sein d'un cluster. Cette approche a ainsi permis d'analyser de façon dynamique les stratégies de négociation des acteurs en fonction de l'incertitude de leur environnement.
- 23 En implémentant un modèle issu de la théorie des jeux sur un simulateur, notre projet vise à saisir de façon dynamique les conséquences de la réforme aéroportuaire pour les territoires. Ce travail s'inscrit à la suite de nos analyses prospectives (Carrard, 2013, 2016).

## Description du modèle SACAT

- 24 Le modèle SACAT (Simulation Aéroports Compagnie Aérienne et Territoire) modélise la négociation commerciale entre aéroports et compagnies aériennes sur la base du partage des gains générés par l'ouverture d'une ligne aérienne. Sans viser à reproduire la réalité du maillage aéroportuaire français, il intègre les caractéristiques propres à ces deux catégories d'agents et de la relation de négociation qu'ils entretiennent<sup>13</sup>.
- 25 Les compagnies aériennes, mobiles par nature, imposent leurs conditions aux aéroports. En outre, les aéroports sont en situation de concurrence les uns par rapport aux autres pour attirer ces compagnies. Aussi, nous étudions les effets des stratégies de coopération permettant la constitution d'alliances aéroportuaires sur la relation entre aéroports et compagnies aériennes.
- 26 Le modèle SACAT est composé de quatre sous-modèles décrivant l'organisation de l'environnement spatial, les deux catégories d'agents (aéroports, compagnies aériennes), l'adaptation de ces agents au fur et à mesure des négociations et les interactions entre les deux.
- 27 Le schéma en figure 1 présente l'ensemble des éléments du modèle. Le sous-modèle spatial (a) simule la répartition sur le territoire des plateformes aéroportuaires et de leurs zones de chalandise. Le sous-modèle des aéroports (b) et le sous-modèle des compagnies aériennes (c) décrivent les propriétés et les interactions de ces deux catégories d'agents. De plus, ces deux sous-modèles intègrent un processus évolutionnaire portant sur la part des gains des agents. Le sous-modèle de négociation commerciale (d) simule les interactions entre aéroports et compagnies aériennes.



Figure 1: Schéma du modèle SACAT composé de quatre modèles : (a) le modèle spatial, (b) le modèle de négociation commerciale, (c) le modèle des compagnies aériennes et (d) le modèle des aéroports



Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

28 Plusieurs éléments sont pris en compte par ce modèle :

- La taille de la zone de chalandise d'un aéroport, qui a un impact sur les négociations. Plus la zone de chalandise est grande, plus l'aéroport est attractif et plus son pouvoir de négociation est important.
- À chaque unité de temps, un volume de contrats à négocier est annoncé par les compagnies aériennes<sup>14</sup>. Les aéroports peuvent accepter plusieurs contrats en fonction de leur capacité d'accueil. Un contrat, lorsqu'il est conclu, débouche sur l'ouverture d'une ligne aérienne. Tous les contrats sont négociés à chaque période.
- Lors de la négociation, si les gains demandés par chaque partie sont plus élevés que le gain total généré par l'ouverture de la ligne, la négociation échoue.
- Si le volume des contrats excède le nombre de contrats acceptables par l'ensemble des aéroports alors certains contrats ne seront pas négociés mais pourront l'être à la période suivante.
- La répartition des gains est soumise à un processus évolutif. Lors de chaque négociation, la répartition change en fonction des meilleurs contrats précédemment réussis par l'ensemble des agents.

29 Notre simulation informatique vise à répondre aux questions suivantes :

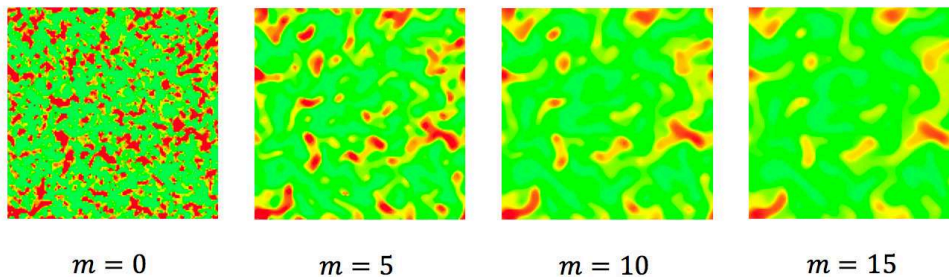
1. La coopération entre aéroports améliore-t-elle leur pouvoir de négociation face à des compagnies de type *low* et *middle cost* et garantit-elle une meilleure rentabilité économique ?
2. Comment peuvent évoluer les négociations commerciales entre aéroports et compagnies aériennes dans un contexte de coopération entre aéroports ?
3. Quelles conditions favorisent la coopération entre aéroports ?

- 30 Ces questions guident la conception du modèle proposé et les simplifications de la réalité sous-jacentes. Dans ce qui suit, nous décrivons les sous-modèles du modèle SACAT. Puis dans la section suivante, nous étudions les résultats expérimentaux au regard des questions posées.

### Modèle spatial : la zone de chalandise des aéroports

- 31 Le modèle spatial établit la répartition et le nombre d'usagers des aéroports. L'espace est discrétisé par une grille régulière à 2 dimensions et chaque cellule contient  $n$  usagers. Leur répartition spatiale suit la répartition de la population du territoire. Cela signifie qu'elle n'est pas uniformément répartie et présente différentes concentrations de densité selon les catégories : haute, moyenne et basse qui respectivement correspondent sur la figure 2 aux couleurs rouges, jaunes et vertes. Nous proposons un algorithme de répartition (cf. figure 2) pour un aperçu visuel en fonction du nombre de lissages) se déroulant en deux étapes. Lors de la première étape, chaque cellule sera initialisée aléatoirement par une valeur entre 0 et  $max\_usager$ . La valeur  $max\_usager$  représente le nombre d'usagers maximum que peut accueillir une cellule. La seconde étape, qui consiste à réaliser un lissage, part du principe que chaque cellule est égale à la médiane de ses voisines avec un voisinage de Moore d'ordre 1 (huit cellules adjacentes à la cellule centrale). Le lissage est répété  $m$  fois suivant le résultat désiré.

Figure 2 : Densité d'usagers suivant le nombre de lissages effectués.

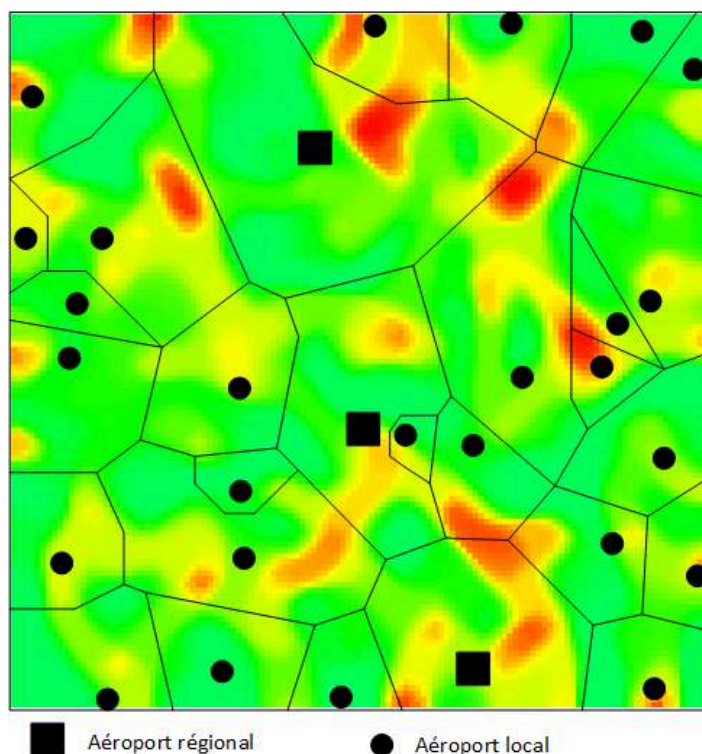


Le rouge, jaune, vert correspondant respectivement à une densité haute, moyenne et basse.

Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

- 32 Le diagramme de Voronoï génère une structure du territoire organisée autour d'un aéroport et de sa zone de chalandise. Les aéroports dans ce diagramme sont représentés par des points. Leur répartition dans l'espace est aléatoire avec une contrainte de distance minimale deux à deux déterminées a priori (la frontière entre deux aéroports est équidistante). Dans cet espace, chaque aéroport dispose d'une zone de chalandise composée des cellules les plus proches déterminant par là-même le nombre total d'usagers potentiels.

Figure 3 : Aéroports, zones de chalandise et densité de population



Zone verte : faible densité, jaune : moyenne densité, rouge : forte densité.

Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

## Aéroports

- 33 Les aéroports sont des agents non mobiles disposant d'infrastructures servant au traitement des passagers relevant de leur zone de chalandise. Nous distinguons deux catégories d'aéroport : les régionaux et les locaux. Les régionaux sont situés principalement à proximité de zones à forte densité de population et disposent d'un nombre d'usagers potentiels important. Ils représentent 9% du total de la population des aéroports<sup>15</sup>. Les autres aéroports font partie de la catégorie des locaux. Cette distinction permet de déterminer le nombre de contrats<sup>16</sup> maximum pouvant être réalisé pour un aéroport. Les régionaux, disposant d'une plus grande capacité d'accueil, peuvent réaliser un nombre de contrats plus élevé. À partir des données de l'UAF<sup>17</sup> (2016), nous avons fixé une proportion de 1 à 8, à savoir, 16 le nombre maximum de contrats pour les régionaux et de 2 contrats pour les aéroports locaux<sup>18</sup>. Enfin, un aéroport ayant une rentabilité insuffisante, sur une période de temps fixée préalablement (cf. tableau 7.1 en annexe), disparaît et cède sa zone de chalandise aux aéroports à proximité<sup>19</sup>.

## Compagnies aériennes

- 34 Les compagnies aériennes, agents mobiles, proposent des contrats auprès des aéroports de leur choix pour ouvrir des lignes commerciales. Nous distinguons deux catégories de compagnies : les *low cost* et les *middle cost* (Beigbeder, 2007). Les compagnies *low cost* font

des propositions commerciales uniquement aux aéroports locaux tandis que les compagnies *middle cost* s'adressent aux aéroports régionaux (cf. figure 1 (b et c)). Les compagnies *low cost* et *middle cost* constituent deux populations distinctes.

- 35 Néanmoins, une compagnie *low cost* *a* peut devenir une compagnie *middle cost* et vice-versa selon la règle suivante : prendre au hasard une compagnie *middle cost* *b*. Si sa rentabilité est supérieure à celle de *a*, alors *a* adopte la stratégie *middle cost* selon une probabilité fixée (cf. tableau 7.1 en annexe), et inversement.

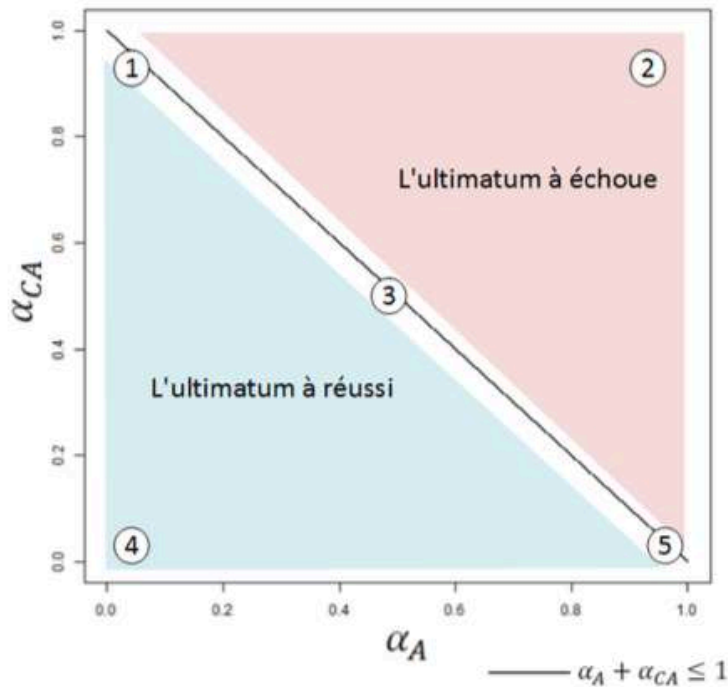
## Négociation commerciale

- 36 La négociation commerciale correspond à la recherche d'un accord entre les deux catégories d'agents pour la répartition des gains générés par la mise en service d'une déserte aérienne. Ayant l'avantage de la mobilité, la compagnie choisit l'aéroport qui lui procure le plus grand gain. La négociation commerciale est une variante du jeu de l'ultimatum<sup>20</sup> nommé jeu de l'ultimatum symétrique (Güth *et al.*, 1982).
- 37 Dans ce jeu, les deux joueurs proposent symétriquement, dans le sens où aucun n'influence le choix de l'autre, sa part désirée du gain. Dans le cas où la somme souhaitée des gains est supérieure à la valeur totale générée par l'ouverture de la ligne, les participants ne peuvent conclure la transaction (figure 4, point 2). Si la somme est strictement inférieure au gain total, le partage du gain est réalisé mais il n'est pas optimal (figure 4, point 4). Lorsque la somme souhaitée par les agents correspond au gain total, on se trouve en situation d'équilibre de Nash<sup>21</sup>. Il en ressort trois points remarquables en plus des deux précédemment cités : le premier en faveur à la compagnie aérienne (figure 4, point 1), le second en faveur de l'aéroport (figure 4, point 5) et le dernier qui traduit un rapport équilibré (figure 4, point 3).
- 38 La répartition du gain discuté lors de la négociation commerciale est la suivante :

$$\begin{array}{l} \text{Si } \alpha_A + \alpha_{CA} \leq 1 \\ \text{alors } \begin{cases} g_A = \alpha_A \cdot \mu u \cdot g_u \\ g_{CA} = \alpha_{CA} \cdot \mu u \cdot g_u \end{cases} \\ \text{sinon } \begin{cases} g_A = 0 \\ g_{CA} = 0 \end{cases} \end{array}$$

avec  $\alpha_A = \in [0;1]$  qui est la part demandée par l'aéroport et  $\alpha_{CA} = \in [0;1]$  qui est la part demandée par la compagnie aérienne lors de la négociation commerciale pour l'obtention d'un contrat. Et  $g_A \in \mathbb{R}$ ,  $g_{CA} \in \mathbb{R}$ ,  $\mu u \in \mathbb{N}$  le nombre d'usagers et  $G_u \in \mathbb{R}$  le gain unitaire.

Figure 4: Schématisation de la négociation entre aéroports et compagnies aériennes



Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

- 39 La règle du choix d'un aéroport par une compagnie *low cost* ou *middle cost* : une compagnie choisit aléatoirement un point du territoire et détermine les aéroports les plus proches en fonction du paramètre  $K$  (cf. tableau 7.1 en annexe) et des critères suivants: maximum d'usagers, non saturation et négociation aboutie.

## Modèle évolutionnaire

- 40 Chaque agent possède deux caractéristiques qui décrivent l'évolution de son pouvoir de négociation au sein de sa catégorie : la variable  $\tau$  et  $\alpha$ . Ces deux variables constituent le génome d'un agent. La variable discrète  $\tau$  définit le type de la catégorie (aéroport local, aéroport régional, compagnie *low cost*, compagnie *middle cost*). La variable  $\alpha$  traduit le pouvoir de négociation et définit la stratégie utilisée lors de la négociation commerciale, variable continue exprimée entre 0 et 1.
- 41 Les stratégies des différentes catégories d'agents sont déterminées par l'algorithme évolutionnaire (figure 12 en annexe). L'algorithme se décompose en trois étapes :
1. À partir d'une population parente, il y a sélection de deux agents par tournoi avec remise sur la base des meilleurs gains. Pour tenir compte de leur spécificité, le tirage de deux aéroports s'effectue suivant la méthode des  $k$  plus proches avec  $k$  le nombre d'aéroports. Il y a répétition du processus de tirage au sort autant de fois que nécessaire pour obtenir une population génitrice de taille équivalente à la population parente. La population agissant comme une mémoire, cela permet d'explorer une grande variété de stratégies au temps, avec propagation des meilleures stratégies au temps  $t + 1$ .

2. À partir de la population génitrice, il y a mutation du génome au niveau du gène en ajoutant un nombre réel aléatoire compris entre  $-\epsilon$ ,  $+\epsilon$ , dans le but d'explorer de nouvelles stratégies à l'origine d'une population d'enfants.
3. Cette dernière remplace la population initiale ; la spatialisation est prise en compte dans le processus évolutif.

## Processus de coalition des aéroports

- 42 La coalition entre aéroports est réalisée dans le but d'améliorer leurs chances de survie grâce aux partages des ressources (capacité d'accueil, capacité financière, zone de chalandise, etc.) et à la mutualisation des coûts.
- 43 Notre algorithme de coalition à  $n$  joueurs (figure 14 en annexe) se déroule en trois étapes :
- 44 1. Sélection des aéroports qui participent à la négociation pour former une coalition (figure 13 en annexe). La sélection se réalise en respectant les contraintes spatiales : à partir d'un pivot, tous les aéroports sont sélectionnés dans un rayon préétabli. Pour former une coalition, aucun aéroport ne doit déjà appartenir à une autre coalition.
- 45 2. Négociation entre aéroports de la coalition en cours de formation. Nous avons introduit une notion de degré de coopération  $C_i \in [0;1]$  pour le participant  $i$ . À partir de  $C_i$ , nous pouvons déduire le degré de coopération extrinsèque  $C_i$  et le degré de coopération global  $C_g$ .  $C_i$  décrit le degré de coopération au sein de la coalition sans le participant  $i$ , ce dernier évaluant les dispositions à la coopération des autres membres. Nous pouvons décrire  $C_i$  comme suit :

$$C_i = \sqrt{\prod_{n \in N - \{i\}} C_n}^{\#N-1}$$

avec  $N$  l'ensemble des participants et  $\#N$  le nombre de participants.

- 46  $C_g$  évalue le degré de coopération de l'ensemble de la coalition. Il permet de déterminer le partage des gains entre les aéroports de la coalition. Nous pouvons le décrire comme :

$$C_g = \sqrt{\prod_{n \in N} C_n}^{\#N}$$

- 47 Pour rendre compte de la motivation de chaque participant à collaborer et à faire des concessions pour la coalition, nous définissons le seuil d'acceptabilité  $S_i$  pour un participant  $i$ . Il est défini comme le seuil minimal d'acceptabilité du degré de coopération extrinsèque pour le participant  $i$ . La négociation proprement dite se déroule selon l'algorithme suivant :

Figure 5 : Algorithme de négociation au sein d'une coalition d'aéroports

```

Repeat
  If #N < 2 then
    La négociation a échoué et se termine.
  End if
  Pour chaque participant i calculer  $C_i$ 
  Pour chaque participant i vérifier que  $S_i < C_i$  si ce n'est pas
  vérifier le participant se retire de la négociation.
Until Chaque participant est son seuil satisfait

```

Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

- 48 3. La dernière étape correspond au partage des gains entre chaque participant à la coalition. Ce partage résulte de la négociation commerciale entre une compagnie aérienne et la coalition. Le paramètre  $\alpha$  utilisé alors par la coalition est celui de l'aéroport possédant le pouvoir de négociation le plus élevé. Quand un aéroport gagne un contrat à travers une négociation commerciale, c'est l'ensemble des aéroports formant la coalition qui le gagne. Cela correspond à une mutualisation de la capacité maximale de chaque aéroport. Il y a trois types de coalition : coalition entre aéroports locaux (L-L), coalition entre aéroports (R-R), coalition entre aéroports locaux et régionaux (L-R).

## Résultats expérimentaux

- 49 Dans cette section, nous étudions les résultats issus du modèle SACAT. Nous présentons l'impact des deux catégories de compagnies sur le pouvoir de négociation des agents lorsqu'il n'y a pas de disparition d'aéroport ni de formation de coalition et que le marché est fixe (le nombre de contrats ne change pas). Puis nous comparons l'effet des coalitions lorsque les aéroports peuvent disparaître.
- 50 Le modèle SACAT est construit autour de 18 paramètres. Le tableau 1 (en annexe) présente l'ensemble des paramètres et leurs valeurs. L'ordre de grandeur de ces valeurs a été déterminé en fonction du contexte aéroportuaire français lorsque cela est possible : nombre d'aéroports, proportion des catégories d'aéroports, proportion de contrats maximum par catégorie d'aéroports, densité d'usagers. De plus, un plan factoriel des paramètres les plus pertinents du modèle, tel que le nombre de contrats et les différents types de coalition, a été étudié. Le nombre de simulations réalisées a été de 30 et les simulations se déroulent à temps synchrone.
- 51 Pour analyser les données issues des simulations du modèle SACAT, nous avons utilisé l'outil de traitement statistique R<sup>22</sup> et l'outil de tracer de courbe gnuplot<sup>23</sup>. Les simulations ont été réalisées à l'aide de Netlogo<sup>24</sup>.

## Modèle spatial

- 52 L'objectif du modèle spatial est de reproduire la répartition d'un système aéroportuaire et d'un ensemble d'usagers sur un territoire. Ce système de 200 aéroports est composé d'une proportion de 9 % d'aéroports régionaux et de 91% de locaux. Cette répartition est réaliste au regard du paysage aéroportuaire français (UAF, 2016). Du point de vue de la répartition de la population, nous obtenons une distribution dans laquelle coexistent

des zones de forte densité (cellule ayant plus de 50 % d'usager maximum) et des zones de faible densité (moins de 50 % d'usager maximum). Cela explique la dynamique des simulations observées.

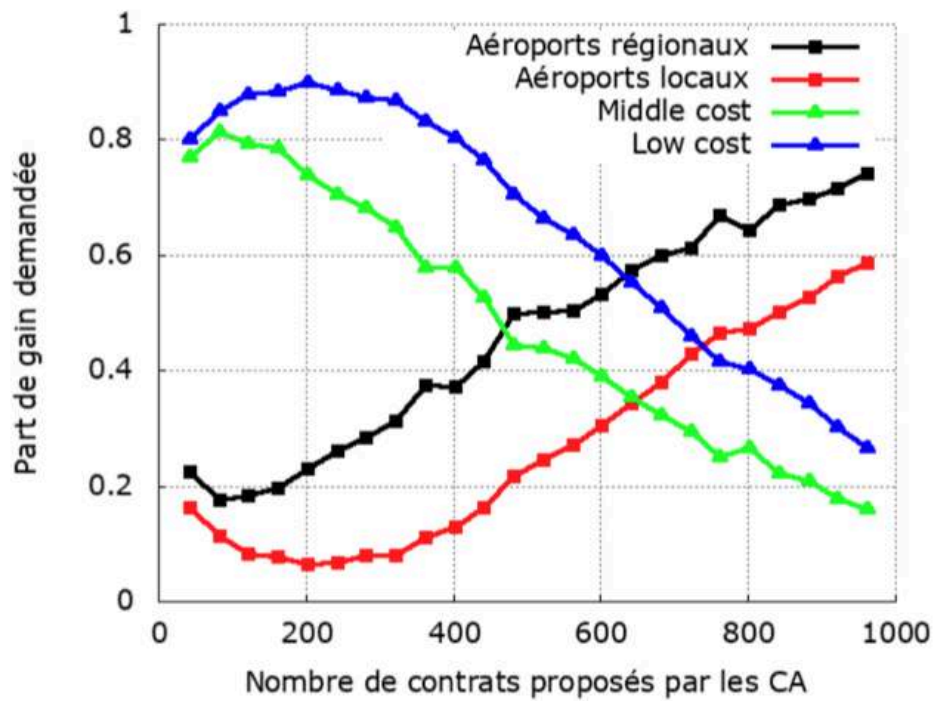
- 53 Après simulation, on observe que 17 % du territoire est constitué de zones de forte densité et 83 % de faible densité. La répartition des usagers n'est donc pas uniforme. Nous observons également qu'en moyenne 74 % des usagers du territoire relèvent de la zone de chalandise d'un aéroport local et 26 % sont dans une zone de chalandise d'un aéroport régional. En moyenne, un aéroport local dispose de 3,3 fois moins d'usagers qu'un aéroport régional. Ces proportions nous permettent de discuter des effets de taille sur la constitution de coalitions d'aéroports.

## L'impact des catégories de compagnies aériennes

- 54 L'influence des deux catégories de compagnies aériennes, *low cost* et *middle cost*, sur le pouvoir de négociation de l'ensemble des agents est une des questions centrales de notre étude. Le pouvoir de négociation d'un agent correspond à la part de gain demandée (notée  $\alpha$ ). Le nombre total de contrats est constitué de la somme des contrats *middle cost* et *low cost*. La proportion des contrats *middle cost* et *low cost* change au cours des générations en fonction de la demande des usagers.
- 55 La figure 6 rend compte de la part de gain demandée par les agents en fonction du nombre de contrats. La part de gain des aéroports augmente en proportion du nombre de contrats tandis que celle des compagnies diminue. Cela correspond à ce que l'on peut observer dans la réalité, à savoir que plus l'activité d'un aéroport est importante et plus son pouvoir de négociation, vis-à-vis des compagnies, est élevé. À l'exception d'un faible nombre de contrats (de 1 à 200), les parts de gain demandées varient de manière identique entre *low cost* et *middle cost* et entre aéroports régionaux et locaux. Nous avons deux équilibres de Nash (cf. figure 4, point 3) : un pour aéroports régionaux/*middle cost* et un pour aéroports locaux/*low cost* qui respectivement correspondent sur la figure à 462 contrats et à 742 contrats.
- 56 Quand les aéroports régionaux sont sous utilisés (nombre de contrats inférieur à 200), leurs pouvoirs de négociation et celui des locaux sont très proches. Lorsque leur activité croît (nombre de contrats supérieur à 200), le pouvoir de négociation des aéroports augmente en proportion, si bien que les compagnies n'ayant pas de contrat peuvent changer de catégorie d'aéroports pour en obtenir. Cette évolution, si elle se poursuit, est bénéfique aux aéroports locaux.



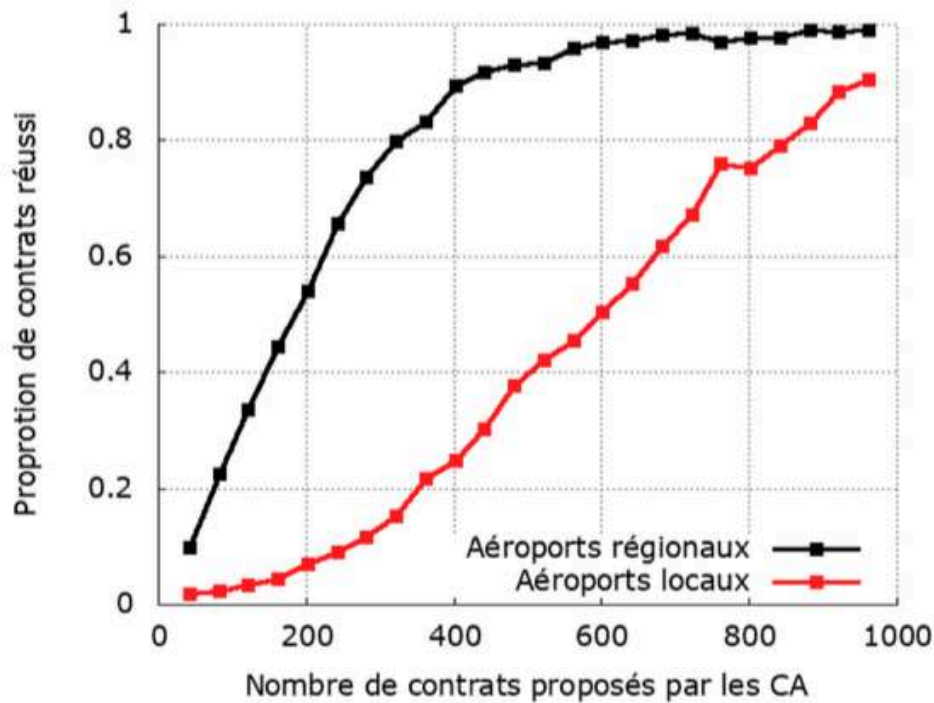
Figure 6 : Partage des gains en fonction du nombre de contrats



Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

- 57 À partir de 400 contrats réalisés, les aéroports régionaux atteignent le point de saturation. En conséquence, les aéroports locaux deviennent encore plus attractifs pour les compagnies. Cette situation est illustrée par la figure 7, qui rend compte de la proportion de contrats réussis pour l'ensemble des acteurs.

Figure 7 : Proportion de contrats acceptés en moyenne pour les aéroports locaux et régionaux

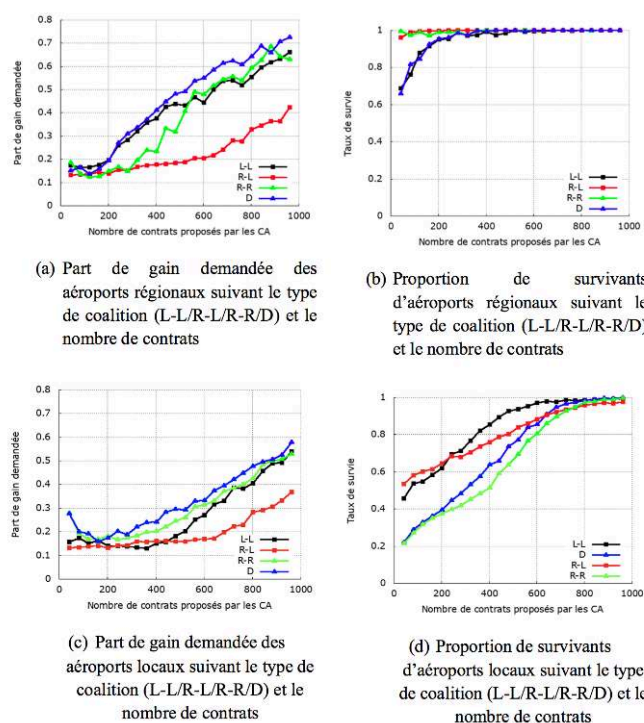


Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

### Effet de la disparition des aéroports et des coalitions

- 58 Nous partons du principe que les aéroports non rentables, i.e. les aéroports n'ayant pas obtenu de contrat durant 100 générations, ferment et disparaissent<sup>25</sup>. La figure 8 représente le nombre de contrats en abscisse et la part du gain obtenu en coordonnée. Chaque point de la courbe est la moyenne calculée pour un ensemble de 30 simulations. La valeur retenue est celle obtenue à la convergence, c'est-à-dire ici au bout de 4000 générations.

Figure 8 : Moyenne de la part de gain et de la proportion d'aéroports survivants



La courbe D correspond à la situation sans coalition et concurrence maximale avec fermetures d'aéroports non rentables. Les courbes L-L, R-R, R-L correspondent respectivement à des situations de coalitions constituées uniquement d'aéroports locaux, d'aéroports régionaux et de coalitions mixtes avec fermetures d'aéroports non rentables.

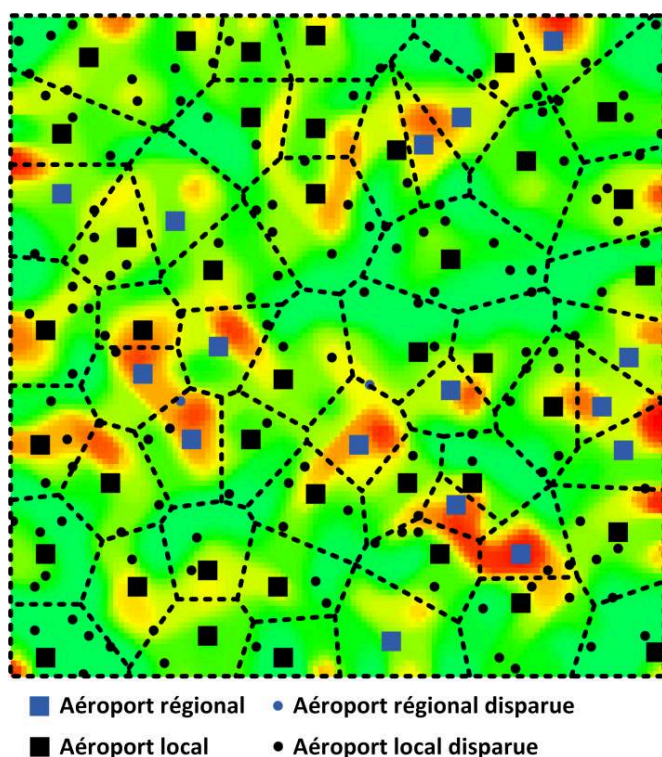
Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

- 59 Au-dessus de 200 contrats, la part de gain est supérieure pour les aéroports régionaux et locaux lorsqu'il n'y a aucune coalition. Notons que l'association entre R-R et L-L n'améliore pas significativement leur part de gain. Par contre, la coalition mixte R-L est très désavantageuse. Globalement, les aéroports régionaux prélèvent une part de gain plus élevée que les aéroports locaux, notamment, lorsque la taille du marché est élevée : pour 200 contrats et sans coalition, la part demandée pour les aéroports régionaux et locaux est de 0,2. Pour 700 contrats, la part demandée est de 0,4 pour les aéroports locaux et de 0,5 pour les aéroports régionaux.
- 60 Si leurs bénéfices en termes de gains sont limités, les coalitions permettent une meilleure survie des aéroports lorsque le marché est petit. Cet aspect est très important pour les aéroports locaux, car pour une taille de marché de 100 contrats, le taux de survie sans coalition est seulement de 30 %, alors qu'avec coalition le taux est de 55 %. Cette différence est très prononcée jusqu'à 600 contrats. En ce qui concerne les coalitions entre aéroports régionaux, elles présentent une utilité que pour une taille de marché très faible, de 0 à 200 contrats. La coalition mixte (R-L) a aussi un effet positif sur la survie des aéroports.
- 61 La disparition des aéroports locaux est plus importante que celle des aéroports régionaux. Disposant de zones de chalandise plus petites, ils sont moins attractifs surtout lorsque les aéroports régionaux ne sont pas saturés. Deux facteurs peuvent cependant contribuer à l'attractivité des aéroports locaux : la part de gain demandée

est plus faible et la saturation progressive des aéroports régionaux obligeant les compagnies à se rabattre sur le marché *low cost*.

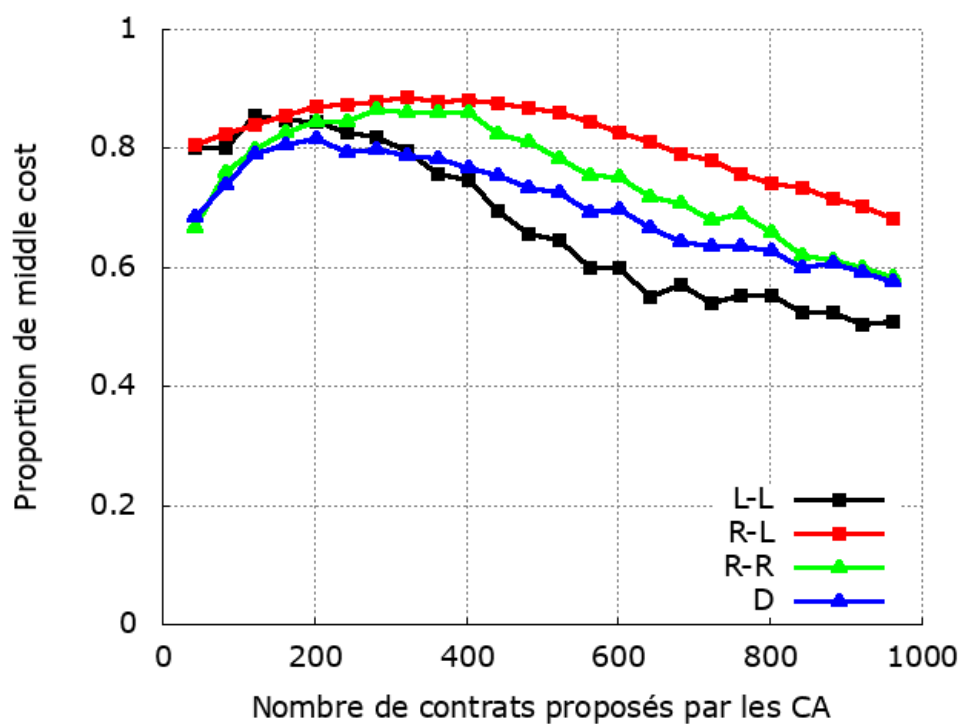
- 62 Les aéroports régionaux sont situés près de zones à haute densité (figure 9). En ce qui concerne les aéroports locaux, les survivants sont soit près d'une zone de la plus haute densité, soit ils couvrent une zone de chalandise suffisamment large pour leur permettre d'être suffisamment attractifs.
- 63 Avec un marché supérieur à 200 contrats, les coalitions R-R ou R-L augmentent les chances de survie des aéroports locaux. En revanche, ces coalitions n'augmentent pas le taux de survie des aéroports régionaux et tendent à faire baisser leur part de gain. Par conséquent, les coalitions mixtes seront refusées par les aéroports régionaux. Il est donc probable que seules les alliances L-L se réalisent.

Figure 9 : Fermeture d'aéroports



Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

- 64 Au niveau des compagnies aériennes, la figure 10 montre que les compagnies *middle cost* sont avantagées lors de coalitions mixtes, car ce type de coalition accroît à la fois les offres régionales et locales avec des capacités d'accueil plus importantes (mutualisation de la capacité maximum d'accueil de tous les aéroports de la coalition). Notons que plus le nombre de contrat est important, plus la part entre contrats *middle cost* et *low cost* est équilibrée. Ceci s'explique par la saturation progressive des aéroports régionaux<sup>26</sup>.

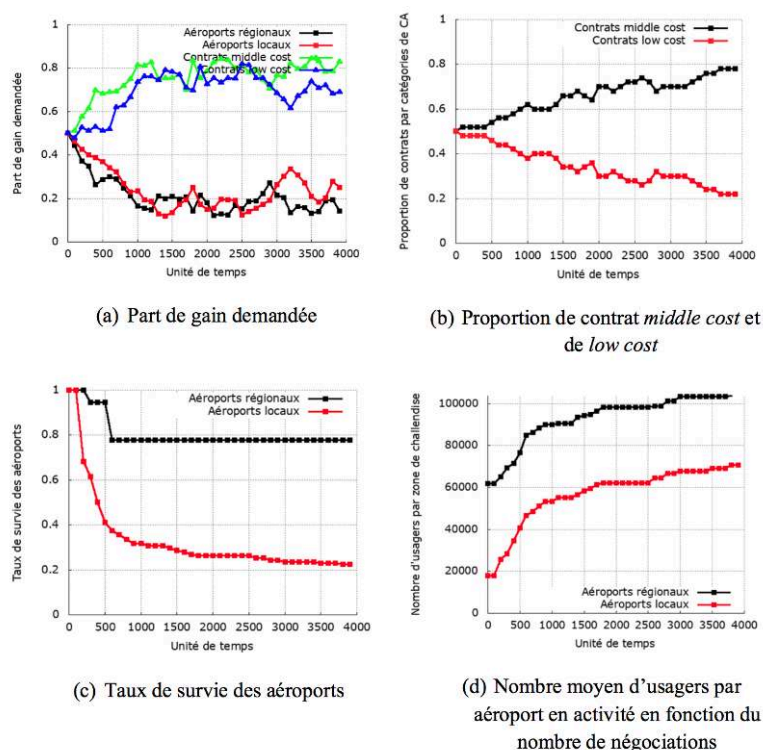
Figure 10 : Proportion de compagnies *middle cost* et proportion inverse de compagnies *low cost*

Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

## La convergence dynamique du modèle

- 65 Nous avons étudié l'évolution des négociations pour 50 contrats (figure 11). Au temps 0, la part de gain demandée et la proportion des contrats *middle cost* sont fixées arbitrairement à 50 %. La part de gain demandée converge alors en faveur des compagnies aériennes (figure 11(a)). Dans le même temps, la proportion des contrats *middle cost* passe de 50% à 80% lorsque la convergence est atteinte. Les contrats *middle cost* et les aéroports régionaux sont privilégiés (figure 11(b)).

Figure 11 : Évolution des paramètres par rapport au nombre de générations du modèle SACAT pour 50 contrats



Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

- 66 Ce phénomène entraîne une concentration des contrats majoritairement sur les aéroports régionaux et un faible nombre d'aéroports locaux (figure 11 (c)). En effet, le nombre d'aéroports régionaux qui poursuivent leur activité passe de 100 à 80 % en l'espace de 600 unités de temps alors que les aéroports locaux accusent une disparition plus forte, passant de 100 à 38 %. Parallèlement et toute chose égale par ailleurs, le nombre moyen d'usagers par zone de chalandise augmente pour les aéroports locaux et régionaux.
- 67 La disparition en grand nombre d'aéroports locaux favorise une redistribution des zones de chalandise aux aéroports les plus proches. Cela produit une concentration des aéroports locaux, ainsi qu'un renforcement des aéroports régionaux. Pour ces derniers, cela correspond à un élargissement de leurs zones de chalandise leur permettant de proposer des contrats encore plus avantageux.

## Conclusion

- 68 L'objectif de ce travail est de tester les recommandations formulées par la Cour des comptes (2008) concernant les stratégies de coopération aéroportuaire comme réponse à la situation concurrentielle des aéroports français. Pour ce faire, le modèle Simulation Aéroport Compagnie Aérienne et Territoire (SACAT) modélise les négociations entre aéroports et compagnies aériennes. Ce modèle prend en compte plusieurs facteurs : une distribution de population non homogène spatialement qui permet de définir les zones de chalandise des aéroports et ainsi leur force de négociation potentielle, la prise en compte des différentes catégories de compagnies aériennes qui segmentent le marché

de l'aérien, la taille et les capacités d'accueil des aéroports ainsi que les types de coalition entre aéroports (sujet principal de l'étude). La négociation commerciale se modélise à l'aide d'un jeu à ultimatum symétrique, ici utilisé dans un contexte particulier, où l'un des joueurs, un aéroport, est fixe spatialement et l'autre, une compagnie aérienne, est mobile. La constitution de coalitions s'effectue par un jeu original basé sur un degré de coopération et un seuil d'acceptabilité. L'aspect adaptatif des agents en fonction de leur environnement a permis de mettre en lumière leurs comportements dans différentes conditions de marché.

- 69 Ce modèle apporte des éléments de réflexion aux recommandations de la Cour des comptes concernant la coopération aéroportuaire. Les premiers résultats expérimentaux issus de simulations montrent que sans coalition entre aéroports, les compagnies aériennes *low cost* exercent une plus grande pression sur les aéroports locaux que sur les aéroports régionaux. Du fait de leur faible capacité de négociation avec les compagnies aériennes, les aéroports locaux subissent un partage des gains défavorable et ont tendance à fermer fréquemment faute de rentabilité suffisante. En outre, une augmentation du marché aéroportuaire sature d'abord les capacités d'accueil des aéroports régionaux, plus attractifs, avant de profiter aux aéroports locaux. Cependant, on s'aperçoit que l'introduction de coalition entre aéroports n'accroît pas leurs gains lors des négociations avec les compagnies aériennes mais au contraire, elle génère un gain moyen plus faible pour les aéroports qui ont choisi de se coaliser. Par contre, une coalition permet une meilleure répartition des gains entre aéroports coalisés ce qui diminue avant tout le taux de fermeture. En s'associant, les aéroports peuvent donc espérer une meilleure résilience face au marché. Cela étant, tous les types de coalition ne semblent pas pouvoir émerger. Les aéroports régionaux étant dominants, une association avec un aéroport local (sauf en situation de saturation) entraîne une perte de gain pour lui sans pour autant augmenter sa résilience. À l'inverse, les coalitions entre aéroports locaux semblent profitables en leur permettant d'accroître leur résilience.
- 70 Ces résultats soulignent les difficultés auxquelles risquent de se heurter la mise en œuvre de stratégies de coopération aéroportuaire. En outre, les évolutions récentes du régime de gestion des aéroports risquent de renforcer ces difficultés. En effet, le transfert de certains aéroports régionaux ainsi que la délégation de nombreux aéroports locaux au secteur privé peuvent aller à l'encontre de l'objectif affiché de la réforme. On voit mal comment des opérateurs privés pourraient accepter de développer des stratégies de coopération aéroportuaires dont la principale conséquence est de diminuer le gain moyen pour les aéroports. Cela étant, le modèle simplifie considérablement le jeu des acteurs qui est dans la réalité infiniment plus complexe. C'est probablement la principale limite de ce travail dont les résultats doivent nécessairement être interprétés avec prudence. Ainsi par exemple, nous avons considéré dans le modèle que les aéroports non rentables (absence de contrat durant 100 générations) ferment et disparaissent. Ce point mérite d'être fortement nuancé : d'une part, il est exceptionnel qu'un aéroport disparaisse comme le ferait une entreprise qui cesserait son activité (cf. notre note 18) et d'autre part, un aéroport non rentable peut présenter, en termes de désenclavement, une réelle utilité sociale pour le territoire qu'il dessert (CGET, 2017), et cela même si la mutualisation se révèle improbable.

71 Les simplifications qui ont servi à la construction de cette simulation multi-agents sont issues d'un échange interdisciplinaire entre aménagement du territoire et informatique. Initialement, la question de recherche émane de l'aménagement (Carrard, 2013, 2016). À la suite de quoi, un dialogue s'est engagé entre les deux disciplines suivant un processus itératif mêlant le domaine de l'aménagement et celui des systèmes complexes : d'une part, traduction de la question initiale dans le champ de la formalisation informatique, puis reformulation dans le champ de l'aménagement du territoire, etc. Ce dialogue a permis de déterminer les variables les plus caractéristiques et explicatives du modèle compte tenu des contraintes imposées par l'outil informatique. Au-delà de cette contribution, des perspectives futures de ce travail pluridisciplinaire existent. Elles s'organisent dans deux domaines : celle de la modélisation informatique et celui de l'aménagement du territoire. Concernant la modélisation de l'environnement aéroportuaire par la théorie des jeux, il serait pertinent d'étudier l'influence de la spatialisation des agents dans le modèle de coévolution du jeu à ultimatum symétrique. Cela permettrait de nouvelles questions, par exemple : en quoi la répartition des aéroports sur le territoire a-t-elle un impact sur leurs rentabilités respectives ? Coté aménagement du territoire, l'utilisation de la technologie Système d'Information Géographique (GIS) permettrait une représentation plus fidèle des territoires, en tenant compte de la densité de population, des distances de transports terrestres, etc.

---

## BIBLIOGRAPHIE

Antoni J.P., Vuidel G., 2010, "MobiSim. Un modèle multi-agents et multiscalair pour simuler les mobilités urbaines", in : Antoni J.P. (dir.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Collection Méthodes et approches, p.50-77.

Audard F., 2006, *Modélisation de la mobilité, la génération de trafic à l'échelle régionale*, Thèse de géographie, Université de Franche-Comté.

Barrett S.D., 2005, "Le rôle des aéroports dans la chaîne de transport", Table Ronde 126 : *Les aéroports : Des plaques tournantes multimodales*, ECMT.

Beigbeder C., 2007, *Le low cost : un levier pour le pouvoir d'achat*, Rapport pour le Secrétaire d'État chargé de la consommation et du Tourisme, 9 p URL : [https://www.economie.gouv.fr/files/finances/presse/dossiers\\_de\\_presse/lowcost071212/lowcost.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/finances/presse/dossiers_de_presse/lowcost071212/lowcost.pdf)

Bresson J., 1997, "Adaptation des acteurs à la nouvelle donne du transport aérien", *10ème Entretiens Jacques Cartier*, 1-36.

Bruch E., Mare D., 2006, "Neighborhood Choice and Neighborhood Change", *American Journal of Sociology*, Vol.112, No.3, 667-709.

Carrard M., 2013, "La réforme aéroportuaire et les relations stratégiques entre aéroports et compagnies aériennes : une analyse à l'aide de la théorie des jeux", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine (RERU)*, No.4, 765-792.



- Carrard M., 2016, "L'arrivée des opérateurs privés dans le réseau des aéroports français : éléments pour une réflexion prospective", *Flux*, No.106, 58-80.
- Carrard M. *et al.*, 2017, "Rapport sur le maillage aéroportuaire français", Commissariat Général à l'Égalité des Territoires, Conseil supérieur de l'aviation civile, [en ligne]. URL : <http://www.cget.gouv.fr/sites/cget.gouv.fr/files/atoms/files/rapport-maillage-aeroportuaire-francais-2017.pdf>
- Cartier M., Forgues B., 2006, "Intérêt de la simulation pour les sciences de gestion", *Revue française de gestion*, No.6, No.165, 125-137.
- Clark W.A., Fossett M., 2008, "Understanding the Social Context of the Schelling Segregation Model", *PNAS*, Vol.105, No.11, 4109-4114.
- Cour des comptes, 2008, *Les aéroports français face aux mutations de transport aérien*, Rapport public thématique, Paris : Cour des comptes.
- Dacharry M., 1992, "Transport aérien français et Marché Commun", *Hommes et Terres du Nord*, No. 1, 34-39.
- Delvolvé P., 2007, Rapport de synthèse, In Auby J.P., Lombard M. (dir), *L'avenir des aéroports : entre décentralisation et concurrence*, Paris, 111-134.
- Derosier B., 1998, *Le transport aérien à l'heure européenne*, Rapport d'information No.737, Paris, Assemblée Nationale.
- Dobruszkes F., 2014, "Geographies of Air Transport", In: R. Goetz A., Budd L., *The Geographies of European Air Transport*, Chapter 10, 168-186.
- Dormoy F., 1997, *La concurrence entre aéroports, quelques exemples en Europe*, 10ème Entretiens Jacques Cartier, 8-9 décembre 1997, Lyon
- Dupéron O., 2001, *Le transport aérien, aménagement du territoire et service public*, L'Harmattan, Paris, 264 p.
- Ferrand N., 1997, *Modèles Multi-Agents pour l'Aide à la Décision et la Négociation en Aménagement du Territoire*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Forsé M., Parodi M., 2010. "Low levels of ethnic intolerance do not create large ghettos. A discussion about an interpretation of Schelling's model", *L'Année sociologique*, Vol.60, No.2, 445-473.
- Griselin M., Ormaux S., 1999, "Le réseau hub and spokes, une nouvelle donne pour les régions en marge des grands flux aériens : l'exemple de la Franche-Comté et de la Bourgogne", *Revue Géographique de l'Est*, Vol.39, No.4. URL : <http://journals.openedition.org/rge/4325>
- Güth W., Schmittberger R., Schwarze B., 1982, "An experimental analysis of ultimatum bargaining", *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol.3, No.4, 367-388.
- Hägerstrand T., 1965, "A Montecarlo Approach to Diffusion", *Archives européennes de sociologie*, Vol.6, No.1, 43-67.
- Leroux I., Berro A., 2010. "Négociation public/privé et coévolution stratégique dans un biocluster", *M@n@gement*, Vol.13, No.1, 38-69. URL : <https://www.cairn.info/revue-management-2010-1-page-38.htm>
- Livet P., Phan D., Sanders L., 2014, "Diversité et complémentarité des modèles multi-agents en sciences sociales", *Revue française de sociologie*, Vol.55, No.4, 689-729. URL : <https://www.cairn->

int.info/abstract-E\_RFS\_554\_0689--diversity-and-complementarity-of-agent.htm?contenu=article

Manzo G., 2014, "Potentialités et limites de la simulation multi-agents : une introduction", *Revue française de sociologie*, Vol.55, No.4, 653-688. URL : <https://www.cairn.info/revue-francaise-de-sociologie-2014-4-page-653.htm>

Molin B., 1998, "Éléments pour une prospective du transport aérien européen", Rapport final, Programme 1996-2000, 7<sup>ème</sup> Groupe de Prospective Réseaux de Transport et Desserte du Territoire *La Documentation Française*, Paris, pour la DATAR. URL : <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/984001720.pdf>

Moller S., 2001, *L'aéroport et ses clients : compagnies aériennes et passagers*, Mémoire pour le DESS Transport Aérien, IFURTA.

Nowak M.A., Page K.M., Sigmund K., 2000, "Fairness Versus Reason in the Ultimatum Game", *Science*, Vol.289, No.5485, 1773-1775. URL : <https://science.sciencemag.org/content/289/5485/1773.full>

Oum T.H., Zhang A., Zhang Y., 1993, "Inter-Firm Rivalry and Firm-Specific Price Elasticities in Deregulated Airline Markets", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.27, No.2, 171-192.

Pancs R., Vriend J.N., 2007, "Schelling's spatial proximity model of segregation revisited", *Journal of Public Economics*, Vol.91, No.1-2, 1-24. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0047272706001228>

Pavaux J., 1995, "Les leçons de la déréglementation", in Pavaux J., (dir.) *Le Transport aérien à l'horizon 2020. Éléments de réflexion prospective*, ITA, 75-103.

Sanders L. (dir), 2001, *Modèles en analyse spatiale*, Hermes-Lavoisier, Paris.

Schelling T.C., 1978, *Micromotives and Macrobehavior*, Norton, 252 p.

Starkie D., 2002, "Airport regulation and competition", *Journal of Air Transport Management*, Vol.8, p.63-72.

Thompson I., 2002, "Air Transport Liberalization and the Development of Third Level Airports in France", *Journal of Transport Geography*, Vol.10, No.4, 273-285.

Varenne F., 2011, *Modéliser le social. Méthodes fondatrices et évolutions récentes*, Paris, Dunod.

Varlet J., 1997, "La déréglementation du transport aérien et ses conséquences sur les réseaux et sur les aéroports", *Annales de géographie*, Vol.106, No.593, 205-217.

Zembri P., 2000, "Les premiers effets spatiaux des recompositions de réseaux aériens en France : des effets d'aubaine fragiles mais une réelle ouverture de nombreuses régions françaises", *Flux*, No.41, 28-40.

Zembri P., 2005, "Structure des réseaux de transport et déréglementation", *Flux*, No.62, 21-

## ANNEXES

### Listes des paramètres du modèle SACAT

Tableau 1 : Paramètres du modèle

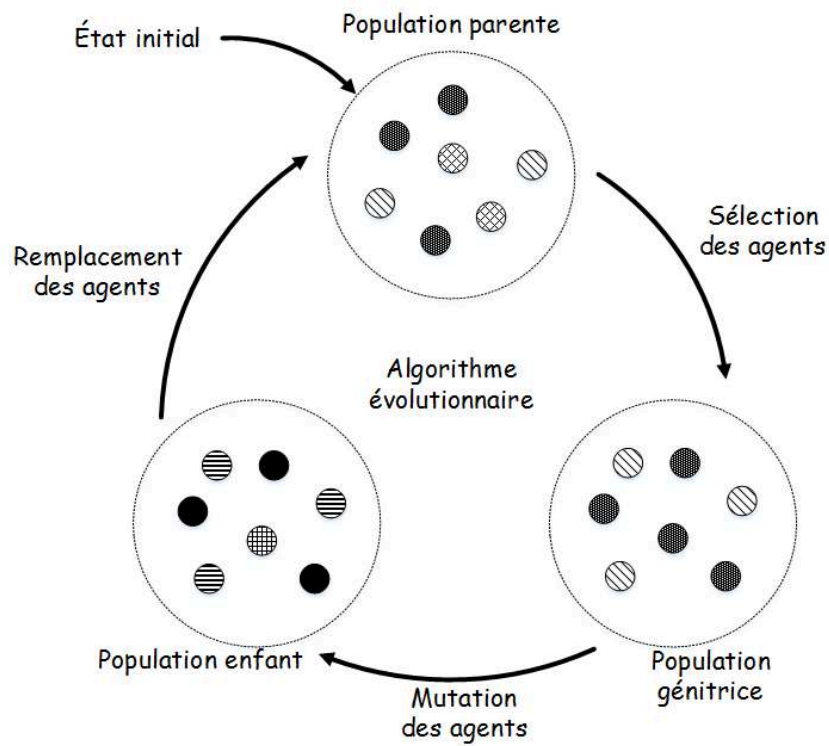
Nom du paramètre	Intervalle	Interprétation	Valeur(s)
<b>Paramètres spatiaux</b>			
<i>dimension_grille</i>	$\mathbb{N}$	Dimension de la grille	120×120
<i>max_usager</i>	$\mathbb{N}$	Nombre d'unité d'utilisateur par cellule	1000
<i>m</i>	$\mathbb{N}$	Nombre d'itérations pour le lissage	10
<i>nombre_aeroport</i>	$\mathbb{N}$	Nombre d'aéroports	200
<i>distance_eloignement</i>	$\mathbb{N}$	Distance d'éloignement minimale entre deux aéroports	3
<b>Paramètres de négociation commerciale</b>			
<i>nombre_contrat</i>	$\mathbb{N}$	Nombre de contrats	[0;1000]
<i>nombre_prospection</i>	$\mathbb{N}$	Distance maximum dans laquelle les compagnies aériennes cherchent des aéroports	12
<i>k_plus_proche_AG_A</i>	$\mathbb{N}$	Sélection des k-plus-proche aéroports voisins pour participer au tournoi de la sélection $\alpha$	4
<i>epsilon_A</i>	$\mathbb{R}$	Vitesse de mutation des aéroports	0.001
<i>epsilon_CA</i>	$\mathbb{R}$	Vitesse de mutation des compagnies aériennes	0.001
<i>taille_de_tournoi</i>	$\mathbb{N}$	Nombre d'agents dans le tournoi	2
<i>taux_changement_classe</i>	[0;1]	Taux de changement de classe de coût pour les compagnies aériennes	0.0005
<b>Paramètres jeux de coalition aéroportuaire</b>			
<i>k_plus_proche_AG_coalition</i>	$\mathbb{N}$	k-plus-proche aéroports qui sont susceptibles de réaliser une coalition	3
<i>seuil</i>	[0;1]	Seuil minimal d'acceptabilité du degré de coopération extrinsèque pour un agent.	0.01
<b>Limite de la capacité aéroportuaire</b>			
<i>fenetre_temps</i>	$\mathbb{N}$	Fenêtre de temps dans lequel un aéroport n'a pas obtenu de contrat disparaît	100
<i>max_contrat_A</i>	$\mathbb{N}$	Nombre de contrats maximal que peut réaliser un aéroport	16,2

min_rentabilite_A	$\mathbb{R}$	Seuil minimal de rentabilité d'un aéroport entraînant la disparition (fermeture)	1
-------------------	--------------	--	---

Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

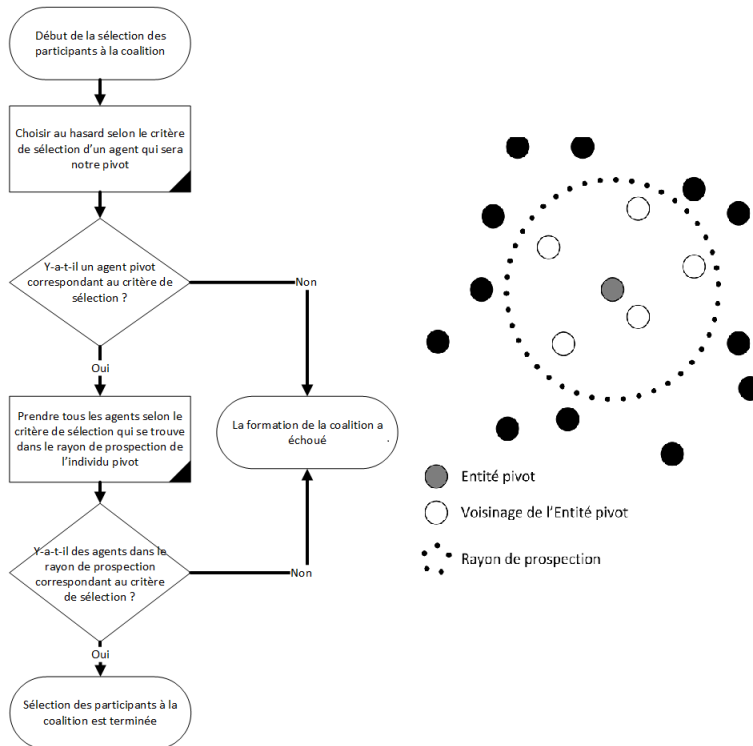
## Figures

Figure 12 : Schéma d'un algorithme évolutionnaire



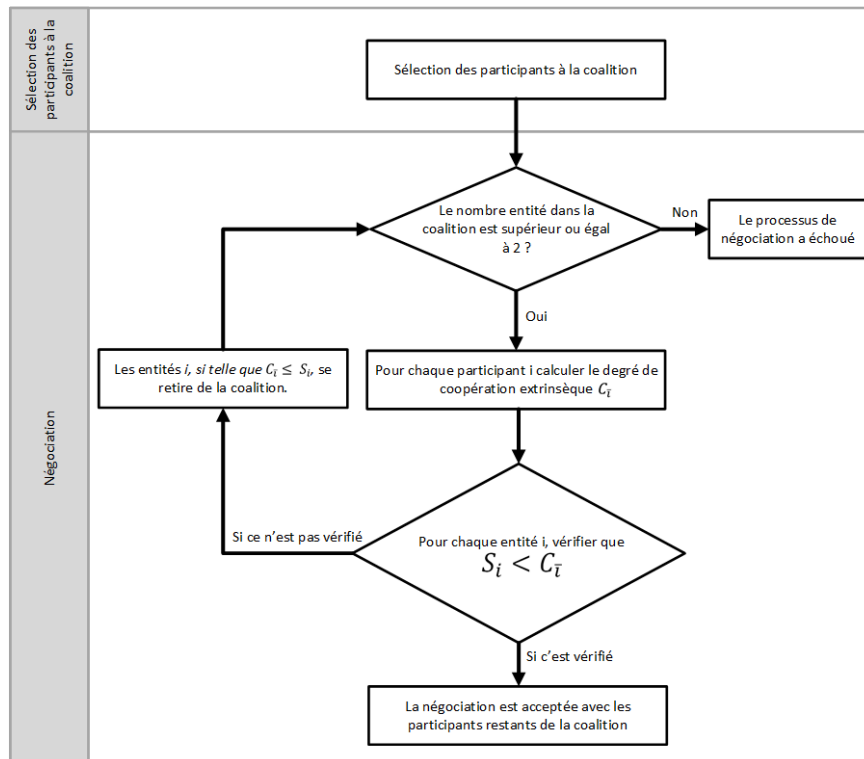
Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

Figure 13 : Sélection des participants à la coalition



Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

Figure 14 : Algorithme de négociation d'une coalition d'aéroports



Christopher JANKEE, Michel CARRARD, Sébastien VEREL et Éric RAMAT, 31 août 2018.

## NOTES

1. « Rapport sur le maillage aéroportuaire français », CGET, janvier-février 2017. <http://www.cget.gouv.fr/sites/cget.gouv.fr/files/atoms/files/rapport-maillage-aeroportuaire-francais-2017.pdf>
2. Pour la distinction entre compagnies *low cost* et *middle cost*, voir Beigbeder 2007.
3. En comparaison, le trafic à bas coût représente en Allemagne 42% du marché intérieur et 43% du marché européen, en Espagne 64% du marché intérieur et 52% du marché européen, au Royaume-Uni 54% du marché et 57% du marché intérieur européen (Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), 2014).
4. Cette situation vient du fait que les compagnies ont un pouvoir d'oligopole face à des aéroports locaux qui sont relativement isolés. Ainsi par exemple, la compagnie Ryanair publie régulièrement une liste des aéroports où elle pourrait s'implanter de manière à faire monter les enchères pour obtenir les meilleures conditions.
5. Les coûts de touché se composent de quatre types de redevances et de taxes : les redevances légales obligatoires, les redevances accessoires, les frais d'assistance et pour prestations annexes et enfin, les taxes.
6. Le législateur a distingué trois catégories d'aéroports en fonction du nombre de passagers qu'ils reçoivent : ceux présentant un intérêt international (ADP), ceux présentant un intérêt national (les grands aéroports régionaux) et ceux présentant un intérêt local.
7. L'article 28 de la loi n° 2004-809 du 13 août 2004, le journal officiel du 17 août 2004 et décret n°2007-1615 du 15 novembre 2007 publié dans le journal officiel du 17 novembre 2007 et arrêté du 3 décembre 2007 publié au journal officiel du 22 décembre 2007.
8. L'article 7 de la loi du 20 avril 2005 relative aux aéroports.
9. Pour un état des lieux détaillé du paysage aéroportuaire depuis la décentralisation, voir Mamontoff, 2011.
10. Le décret n°2007-244 du 23 février 2007.
11. L'État détenant 60% du capital, les CCI au moins 25% et les collectivités locales au plus 15%.
12. Ces nouvelles lignes publiées le 4 avril 2014 redéfinissent le cadre juridique de l'attribution des différentes catégories d'aides d'État (aides à l'investissement et au fonctionnement) aux aéroports. Elles remplacent les lignes directrices de 1994 et de 2005.
13. Ce travail ne vise pas à reproduire la réalité. Il offre une représentation nécessairement simplifiée à partir d'une modélisation à l'aide de la théorie des jeux. Celle-ci vise à tester les recommandations de la Cour des comptes à partir d'un jeu évolutif implémenté sur un système multi-agents.
14. Nous entendons par contrat, une proposition de création d'une desserte aérienne émanant d'une compagnie aérienne en direction des aéroports. Ces derniers sont libres de l'accepter ou de la refuser.
15. Ces chiffres sont proportionnels à la répartition des deux catégories d'aéroports dans le cas français.
16. Nous entendons par contrat, une proposition d'ouverture d'une ligne d'une compagnie aérienne en direction d'un aéroport. Un contrat ne peut aboutir que si les deux agents parviennent à s'entendre sur le partage des gains. Dans le cas contraire, le contrat est abandonné.
17. UAF : Union des Aéroports Français
18. Ces pourcentages correspondent au rapport entre mouvements des aéroports régionaux et locaux français en excluant les Aéroports de Paris (Union des Aéroports Français, 2016).
19. Dans la réalité, les aéroports ne ferment pas nécessairement mais peuvent être déclassés : l'infrastructure ne génère plus d'activité commerciale régulière et peut être dédiée à la

formation aéronautique, au transport médical d'urgence, au parachutisme, à l'aviation privée, etc.

20. Le jeu de l'ultimatum (Nowak *et al.*, 2000) se joue à deux, le joueur A (déterminé aléatoirement au début du jeu) possède une somme d'argent à partager avec le joueur B. Le joueur A propose au joueur B un partage qu'il peut accepter ou refuser. Dans le cas où le joueur B accepte, les deux joueurs reçoivent la part d'argent, dans l'autre cas, aucun des participants ne reçoit d'argent.

21. Le choix des agents est optimal et stable du fait qu'aucun n'a intérêt à changer sa stratégie sans réduire son gain.

22. <http://www.r-project.org/>

23. <http://www.gnuplot.info/>

24. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

25. Voir la note 18.

26. La courbe rouge qui représente la situation liée aux coalitions mixtes doit être lue de la façon suivante : à 400 contrats proposés, 88% revient à la catégorie *middle cost* et 12% au *low cost*. À 950 contrats, 70% est affecté à la catégorie *middle cost* et 30% à celle des *low cost*.

## RÉSUMÉS

Depuis la réforme aéroportuaire de 2004 et 2005 en France, le marché du transport aérien est en pleine mutation. Les compagnies aériennes *low cost* sont devenues des acteurs déterminants qui concurrencent les compagnies traditionnelles. De leur côté, les collectivités territoriales, qui gèrent désormais les aéroports décentralisés, doivent adopter les meilleures stratégies pour développer et/ou pérenniser leurs infrastructures. À partir d'une simulation informatique multi-agents utilisant la théorie des jeux spatiaux et évolutionnaires, nous analysons les effets pour les différents acteurs (gestionnaires d'aéroports, compagnies aériennes et par extension les territoires) de la mise en place de stratégies coopératives (objectif de la réforme aéroportuaire) pour les aéroports régionaux et décentralisés. S'il ressort de cette simulation que la coopération entre aéroports régionaux et locaux est peu probable, elle souligne que la coopération entre aéroports de même catégorie (local/local, régional/régional) accroît leur résilience. Dans cette perspective, les collectivités territoriales pourraient avoir intérêt à promouvoir ce type de stratégies. La simulation montre cependant que la contrepartie de la coopération est de générer un gain moyen plus faible pour les aéroports qui ont choisi de se coaliser. Aussi, le transfert récent de certains aéroports régionaux ainsi que la délégation de nombreux aéroports locaux au secteur privé pourraient aller à l'encontre de l'objectif affiché de la réforme.

Since the 2004 and 2005 airport reforms in France, the air transport market has been undergoing major changes. *Low cost* airlines have become key players in competition with traditional airlines. For their part, local authorities, which now manage decentralized airports, must adopt the best strategies to develop and/or sustain their infrastructures. Based on a multi-agent computer simulation using the theory of spatial and evolutionary games, we analyze the effects for the different actors (airport managers, airlines and by extension the territories) of the implementation of cooperative strategies (main objective of the airport reform) for regional and decentralized airports. While this simulation shows that cooperation between regional and local airports is unlikely, it underlines that cooperation between airports of the same category (local/local, regional/regional) increases their resilience. In this perspective, it could be in the interest

of local authorities to promote this type of strategy. The simulation shows, however, that the counterpart of cooperation is a lower average gain for the airports that have chosen to coalesce. Also, the recent transfer of some regional airports as well as the delegation of many local airports to the private sector could go against the stated objective of the reform.

Desde la reforma aeroportuaria desarrollada en Francia en 2004 y 2005, el mercado del transporte aéreo está en plena mutación. Las compañías aéreas de *low cost*, se han transformado en potentes competidores de las aerolíneas tradicionales. Por su parte, las autoridades locales, que gestionan los aeropuertos descentralizados, deben adoptar mejores estrategias para desarrollar y/o mantener sus infraestructuras. A partir de una simulación informática multi-agente, utilizando la teoría de juegos espaciales y evolutivos, analizamos para los diferentes actores (gestores de aeropuertos, compañías aéreas y por extensión los territorios) los efectos de la implementación de estrategias cooperativas (objetivo de la reforma aeroportuaria) en aeropuertos regionales y descentralizados. Los resultados de esta simulación expresan que la cooperación entre aeropuertos regionales y locales es poco probable, pero destaca que la colaboración entre aeropuertos de la misma categoría (local / local, regional / regional) aumenta su resiliencia. En tal perspectiva, las autoridades locales podrían interesarse en impulsar este tipo de estrategias. Sin embargo, se aprecia en el proceso de simulación que los aeropuertos que han optado por tales alianzas presentan menores ganancias promedio respecto a los que no optan por esta estrategia. Además, la reciente transferencia de algunos aeropuertos regionales, así como delegar una cantidad importante de aeropuertos locales al sector privado, podrían ir en contra del objetivo declarado en la reforma.

## INDEX

**Palabras claves :** modelización multi-agente, modelización espacial, competencia, territorio

**Keywords :** multi-agent modeling, spatial modeling, competition, territory

**Mots-clés :** modélisation multi-agents, modélisation spatiale, concurrence, territoire

## AUTEURS

### CHRISTOPHER JANKEE

Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale (LISIC), France

### MICHEL CARRARD

Laboratoire Territoires, Villes, Environnement & Société, EA 447, France

michel.carrard@univ-littoral.fr

### SÉBASTIEN VEREL

Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale (LISIC), France

### ÉRIC RAMAT

Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale (LISIC), France