
Étude à l'aide d'une simulation informatique multi-agents visant à saisir les conséquences de la réforme des aéroports pour les territoires

Auteurs :

- Christopher JANKEE, Master 2 RIF (Recherche en Informatique Fondamentale) ;
- Michel CARRARD, Maître de conférences en sciences de gestion (CNU – 24 – Aménagement de l'espace-Urbanisme) ;
- Sébastien VEREL, Maître de conférences en informatique (CNU – 27 – Informatique) ;
- Éric RAMAT, Professeur en informatique (CNU – 27 – Informatique) ;

Résumé :

Depuis la réforme aéroportuaire de 2004 et 2005 en France, les aéroports sont en pleine mutation. À partir d'une modélisation et d'une simulation informatique multi-agents utilisant la théorie des jeux spatiaux et évolutionnaires, nous analysons les conséquences (à savoir la taille de marché et la part de gain pour les différents acteurs : compagnies aériennes, gestionnaires d'aéroports et par extension les territoires ; de la mise en place de stratégies concurrentielles ou coopératives pour les aéroports régionaux et décentralisés sont exclus les aéroports internationaux gérés par l'entreprise Aéroports de Paris (ADP). Nous avons pu établir à l'aide du modèle que la coopération entre aéroports de même catégorie (local, régional) est avantageuse pour les aéroports au niveau de la résilience. Cette dernière permet d'affronter plus aisément un marché en changement. Cependant, la résilience apporte moins de gain pour les aéroports coalisés.

Discipline :

Aménagement de l'Espace-Urbanisme, informatique.

Mots clés :

Réforme aéroportuaire, gouvernance aéroportuaire, théorie des jeux, modélisation, simulation informatique, jeux évolutionnaires, coévolution, jeux spatiaux, coalition, coopération, concurrence, territoire.

Correspondant :

Michel CARRARD
Territoires, Villes, Environnement & Sociétés (EA 4477)
Université du Littoral Côte d'Opale
21, quai de la Citadelle BP 5528
59383 Dunkerque Cedex
Tel : 03.28.23.71.46 – 03.28.23.71.00 – Fax : 03.28.23.71.10
Mail : michel.carrard@univ-littoral.fr

Sommaire

1	Introduction	2
2	Contexte.....	3
3	Problématique.....	5
3.1	État de l'art.....	5
4	Description du modèle SACAT.....	6
4.1	Modèle spatial	7
4.2	Aéroports	8
4.3	Compagnies aériennes	9
4.4	Négociation commerciale.....	9
4.5	Modèle évolutionnaire.....	10
4.6	Coalition	11
5	Résultats expérimentaux.....	15
5.1	Modèle spatial	16
5.2	Influence des classes de coût des compagnies aériennes	16
5.3	Effet de la disparition et des coalitions.....	18
5.4	Forme de coalition.....	21
6	Conclusion.....	22
7	Bibliographie	23

1 Introduction

A la fin des années 1990, la libéralisation du transport aérien en Europe a conduit l'ensemble des compagnies aériennes européennes traditionnelles à mettre en place, à l'instar de leurs homologues américaines quelques années plus tôt, de nouvelles stratégies pour se développer. Par ailleurs, des compagnies *low cost* sont apparues et sont devenues des acteurs importants du secteur. Ces changements ont eu un impact majeur sur le développement et sur la gouvernance des aéroports (Francis *et al.*, 2004). Si certains ont bénéficié de cette mutation, d'autres au contraire ont connu des difficultés (baisse importante du trafic, du nombre de dessertes, etc.).

C'est dans ce contexte que s'est inscrite la réforme des aéroports intervenue en 2004 et 2005 dont l'objectif est de faciliter leur adaptation à ce nouvel environnement. La réforme aéroportuaire s'est déroulée en deux étapes. La première étape a été initiée par la loi du 13 août 2004 relative aux libertés et responsabilités locales qui a décentralisé la gestion de 150 aéroports locaux aux collectivités ou à leurs groupements¹. La seconde étape, fixée par la loi du 20 avril 2005 relative aux Aéroports, a

¹ L'article 28 de la loi n° 2004-809 du 13 août 2004, JO du 17 août 2004 et décret n°2007-1615 du 15 novembre 2007 publié JO du 17 novembre 2007 et arrêté du 3 décembre 2007 publié au JO du 22 décembre 2007. 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.

transformé Aéroports de Paris (ADP) en société anonyme et permet aux aéroports régionaux exclus de la décentralisation d'être transférés à des sociétés aéroportuaires spécialement constituées². Au final, il est attendu de cette réforme de permettre un renouvellement des stratégies aéroportuaires, notamment pour les aéroports régionaux et locaux. En effet, comme l'a souligné la Cour des comptes, « *le bénéfice le plus attendu est celui qui pourra résulter des rapprochements et alliances entre gestionnaires d'aéroports, rendus possibles pour les sociétés aéroportuaires et pour les aéroports décentralisés* ».

Le but de cet article est d'analyser, à partir d'une simulation informatique multi-agents, les enjeux de la coopération pour les aéroports régionaux et locaux - un des objectifs de la réforme - par rapport aux compagnies aériennes (sont exclus les aéroports gérés par ADP). Nous rappellerons dans un premier temps, les principales caractéristiques du contexte aéroportuaire en France. Cela nous permettra de préciser notre problématique et de présenter un état de l'art des différents éléments relatif au modèle SACAT (Simulation Aéroports Compagnie Aérienne et Territoire). Après avoir discuté ce qui caractérise le modèle, nous exposerons les différents sous-modèles constituant le modèle SACAT. Par la suite, nous décrirons les résultats de simulation. Dans une dernière partie, nous discuterons des résultats, des perspectives et nous concluons.

Le modèle SACAT (Simulation Aéroports Compagnie Aérienne et Territoire) résulte d'une réflexion prospective concernant les enjeux de la réforme aéroportuaire sur les aéroports régionaux et locaux et sur leurs relations avec les compagnies aériennes (classiques et low cost).

2 Contexte

Depuis le début des années 1990, l'Europe connaît une libéralisation du transport aérien (Xavier & Michel, 2011) modifiant les équilibres établis. Avant la libéralisation, l'état soutenait activement le développement des aéroports et des compagnies aériennes garantissant ainsi une logique d'aménagement du territoire pour notamment désenclaver des régions. Les conséquences de la libéralisation du transport aérien en Europe favorisent une forte concurrence entre compagnies aériennes. Les compagnies aériennes traditionnelles, high cost et middle cost, adoptent de nouvelles stratégies ; et les compagnies low cost sont devenues des acteurs importants (Laplace, et al., 2010). Ces changements ont eu un impact majeur sur les aéroports. Si certains ont bénéficié de cette mutation, d'autres ont connu des difficultés.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la réforme des aéroports intervenue entre 2004 et 2005 en France dont l'objectif est de faciliter leur adaptation à cet environnement (Carrard, 2013). Elle s'est déroulée en deux étapes. D'abord la loi du 13 août 2004 relative aux libertés et responsabilités locales qui a décentralisé la gestion de 150 aéroports locaux aux collectivités, puis la loi du 20 avril 2005 relative aux aéroports, qui permet aux aéroports régionaux exclus de la décentralisation d'être transférés à des sociétés aéroportuaires, les Aéroports de Paris (ADP) sont transformés en société anonyme. Au final, cette réforme doit permettre un renouvellement des stratégies pour les aéroports régionaux et locaux.

² L'article 7 de la loi du 20 avril 2005 relative aux aéroports.

Les collectivités territoriales, qui disposent désormais de nouvelles compétences en matière aéroportuaire, vont faire face à plusieurs difficultés : un trafic souvent insuffisant pour assurer la rentabilité des infrastructures, le choix des dessertes imposées par les compagnies aériennes, les exigences financières des compagnies *low cost*. La question se pose alors de savoir quelles politiques aéroportuaires adopter par les collectivités territoriales.

Quant à cette nouvelle situation, la Cour des comptes en 2008 préconisait de 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 aéroportuaires et pour les aéroports décentralisés ». Cependant, la mise en place de stratégies de coopération aéroportuaire ne va pas de soi et soulève de nombreuses questions (Marcou, 2011).

En matière d'aménagement du territoire, les interactions entre acteurs sont déterminantes dans la compréhension de l'utilisation du territoire. La simulation, notamment sous la forme des modèles basés agents, est bien adaptée à l'analyse des phénomènes d'émergence. Le modèle SACAT issu de la théorie des jeux de type spatial et évolutionnaire sur un simulateur vise à saisir de façon dynamique les enjeux et les problèmes soulevés par la coopération aéroportuaire (objectif de la réforme) pour les aéroports régionaux et décentralisés (sont exclus les aéroports internationaux gérés par Aéroports de Paris – ADP –).

Les aéroports ont deux objectifs à satisfaire contrairement aux compagnies aériennes. Ces deux objectifs sont les suivants :

Un objectif de gain,

Un objectif d'aménagement du territoire. Pour y répondre, nous réalisons des coalitions

Pour les aéroports régionaux, nous avons défini deux sous-populations : les aéroports régionaux et les aéroports locaux. Les aéroports régionaux ont une zone de chalandise et une capacité d'accueil plus grande par rapport aux aéroports locaux.

Compagnies aériennes

Objectif de gain

Pour déterminer la zone d'influence des aéroports, nous avons choisi d'utiliser le diagramme de Voronoï qui est largement utilisé dans la littérature pour faire des études de marché [MACDO].

Questions :

Plus précisément, la modélisation et l'étude de la simulation informatique visent à répondre aux questions suivantes : (i) Une coopération entre aéroports permet-elle un plus grand pouvoir de négociation et une meilleure rentabilité économique face à des compagnies aériennes de type *low*, *middle* et *high cost* ? (ii) Comment peuvent évoluer les politiques de négociation commerciale des aéroports et des compagnies aériennes dans un contexte de coopération entre aéroports ? (iii) Quelles conditions permettent l'émergence d'une coopération entre aéroports ?

3 Problématique

Le modèle vise à l'étude des rapports d'offre et de demande entre les aéroports et les compagnies aériennes et à l'étude de coopérations possibles entre aéroports. Chaque aéroport négocie avec les compagnies aériennes pour obtenir l'ouverture ou le maintien de lignes aériennes et ainsi assurer la rentabilité de l'aéroport. Les compagnies aériennes ont la possibilité d'imposer leurs conditions aux aéroports au détriment de ceux-ci par leur mise en concurrence. Pour renforcer le pouvoir de négociation des aéroports face aux compagnies, les aéroports peuvent coopérer en formant des coalitions ce qui aurait pour but de réduire la concurrence. Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier cette stratégie de coopération entre aéroports.

Plus précisément, la modélisation et l'étude de la simulation informatique visent à répondre aux questions suivantes : (i) Une coopération entre aéroports permet-elle un plus grand pouvoir de négociation et une meilleure rentabilité économique face à des compagnies aériennes de type low, middle et high cost ? (ii) Comment peuvent évoluer les politiques de négociation commerciale des aéroports et des compagnies aériennes dans un contexte de coopération entre aéroports ? (iii) Quelles conditions permettent l'émergence d'une coopération entre aéroports ? Ces questions guident la conception du modèle proposé et les simplifications de la réalité sous-jacentes. Ce travail complète une enquête de terrain. Avec ces données terrain incluant le comportement des acteurs du marché, celle-ci pourra apporter des éléments qui pourront enrichir et affiner le modèle proposé.

3.1 État de l'art

Les premiers travaux utilisant la théorie des jeux pour étudier la situation aéroportuaire ont été réalisés par Carrard [2013]. Dans ces travaux, le rapport entre compagnies aériennes et aéroports est modélisé par un jeu à deux joueurs en situation d'adversité connu sous le nom de « diviser le dollar » (BINMORE, 1999). Le partage de gain entre un aéroport et une compagnie aérienne se décide en définissant une fonction d'utilité qui dépend de la part de gain demandée, i.e. la stratégie propre du joueur, et qui prend en compte deux facteurs : le pouvoir des acteurs et le risque que ces derniers soient prêts à prendre. A l'équilibre de Nash du jeu, le partage du gain s'effectue proportionnellement au produit de ces facteurs de chaque joueur. La part de gain obtenue reflète alors la force de négociation du joueur par rapport à son adversaire.

Le partage entre acteurs de gains générés collectivement a pu être étudié à l'aide de la théorie des jeux dans d'autres situations économiques. Leroux et Berro (Leroux & Berro, 2010) ont étudié le partage de gain entre acteurs privés et acteur public au sein d'un cluster d'entreprises en utilisant une approche évolutionnaire de la théorie des jeux. Les auteurs justifient l'utilisation d'une approche évolutionnaire par le fait que l'approche évolutionnaire « s'émancipe donc de la fiction de l'agent représentatif en substituant la notion de rationalité située à la notion de rationalité limitée ». En effet, dans une approche évolutionnaire, il existe une population d'acteurs hétérogènes et soumis à la variabilité. De plus, la dynamique d'évolution et d'adaptation s'effectue par l'interaction entre acteurs (rationalité située). Le jeu évolutionnaire utilisé par Leroux et Berro est basé sur le jeu sous ultimatum de type partage de gains (Ellingsen, 1997). Les joueurs se rencontrent deux à deux. La stratégie d'un joueur correspond à une part de gain demandée. Si les parts demandées sont compatibles, le gain obtenu par chacun respecte la part demandée, sinon aucun gain n'est obtenu. Le modèle est adapté aux clusters d'entreprises en distinguant deux types d'acteurs : privé, joueur obstiné qui demande la même part et public, joueur sophistiqué qui demande la part complémentaire de l'autre joueur. Les auteurs étudient à travers la simulation du modèle l'adaptation mutuelle des acteurs au sein d'un cluster.

Notre démarche s'inscrit à la lignée de ces travaux, nous étudions le partage de gain entre aéroports et compagnies aériennes, et ainsi le rapport de force de négociation, en utilisant une approche évolutionnaire de la théorie des jeux. Le modèle s'appuie sur une modélisation multi-agents (Ferber, 1995) et sur la théorie des jeux de type évolutionnaire (Smith & Price, 1973) (Nowak, 2006, chap. 4) et plus particulièrement les jeux spatiaux (Nowak, 2006, chap. 9) où les interactions entre joueurs prennent en compte la dimension spatiale. Les agents sont ici de deux types, les aéroports qui sont situés spatialement et fixes, et les compagnies aériennes qui sont mobiles pouvant négocier un partage de gain avec n'importe quel aéroport. Au sein de chaque population d'aéroports et de compagnies aériennes, les agents-joueurs ayant les plus grands gains sont sélectionnés pour la reproduction. Chaque agent est également soumis à une variation aléatoire de son comportement équivalent à une mutation. Les populations d'aéroports et de compagnies aériennes co-évoluent [Ajouter : Juillé & Pollack, 1998, Coevolving the Ideal Trainer: Application to the Discovery of Cellular Automata Rules], évolution parallèle de deux espèces qui vivent en interdépendance étroite. De plus, le processus évolutionnaire des aéroports prend en compte la dimension spatiale.

L'objectif de cet article est de compléter ces travaux initié dans (Carrard, 2013) à l'aide de la théorie des jeux évolutionnaires et en introduisant des possibilités de coalition entre aéroports. Relativement à ces travaux, les composantes essentielles permettant une interprétation sont : la répartition spatiale des usagers, la répartition spatiale des aéroports, la catégorie des aéroports (régional et local), la catégorie des compagnies aériennes et le type de coalition.

Un des facteurs expliquant le rapport de force de négociation entre aéroports et compagnies aériennes est la répartition spatiale des usagers. L'attractivité et la rentabilité d'un aéroport dépend du nombre de passagers potentiels. Dans le modèle SACAT, chaque aéroport a donc une zone de chalandise caractérisant la clientèle potentielle en fonction des éléments comme les voies de circulation, ou la concurrence (Lendrevie & Lévy, 2012). Le diagramme de Voronoï est mis en œuvre pour estimer la zone de couverture d'une infrastructure proposant un service ; il est notamment utilisé par la chaîne de restauration Macdonald pour l'implantation de nouveaux établissements de restauration (Skiena, 2008, p. 576 Chap.17 section 4). Le découpage des zones de chalandise par le diagramme de Voronoï permet une distribution équitable des ressources (la clientèle potentielle) et une redistribution de celle-ci lorsqu'un ou plusieurs aéroports viennent à fermer.

Ce travail se propose également d'étudier l'effet de coalitions d'aéroports sur le rapport de force de négociation avec les compagnies aériennes. Le modèle de coalition proposé constitue un élément notable du modèle SACAT ; peu discuté en théorie des jeux par rapport aux jeux non coopératifs tels que le dilemme du prisonnier. Le modèle de coalition vise à répondre à deux éléments (Ray, 2007): parmi un ensemble des agents comment se coalisent-ils et comment les gains sont partagés au sein de la coalition. La coalition permet à un ensemble d'aéroports proches géographiquement de se former selon un jeu sous ultimatum symétrique : un aéroport participe à une coalition lorsque le degré de coopération des autres aéroports est suffisant. Dans ce processus, chaque aéroport est caractérisé par un degré de coopération qui peut dépendre de caractéristiques telles que son pouvoir, sa prise de risque, etc. Ces deux derniers éléments sont à rapprocher de (Carrard, 2013).

4 Description du modèle SACAT

Cette section décrit le modèle SACAT qui modélise le système aéroportuaire du point de la négociation commerciale entre aéroports et compagnies aériennes en prenant plusieurs facteurs explicatifs principaux. Ainsi, le modèle SACAT est composé de quatre sous-modèles décrivant l'environnement spatial, les agents (aéroports, compagnies aériennes), l'adaptation des agents, et les

interactions entre les agents. Le schéma synthétique Figure 1 présente l'ensemble des éléments du modèle. Le sous-modèle spatial (c) vise à décrire la répartition sur le territoire de la demande du service aéroportuaire et l'infrastructure répondant à ce dernier en y définissant des zones de chalandise. Le sous-modèle des aéroports (b) et le sous-modèle des compagnies aériennes (a) décrivent les propriétés de ces derniers ainsi que les interactions entre les agents d'une même population. De plus, les populations sont soumises à un processus évolutionnaire. Le sous-modèle de négociation commerciale décrit les interactions marchant entre les aéroports et les compagnies aériennes. Dans les sections suivantes, nous allons décrire les différentes parties du modèle.

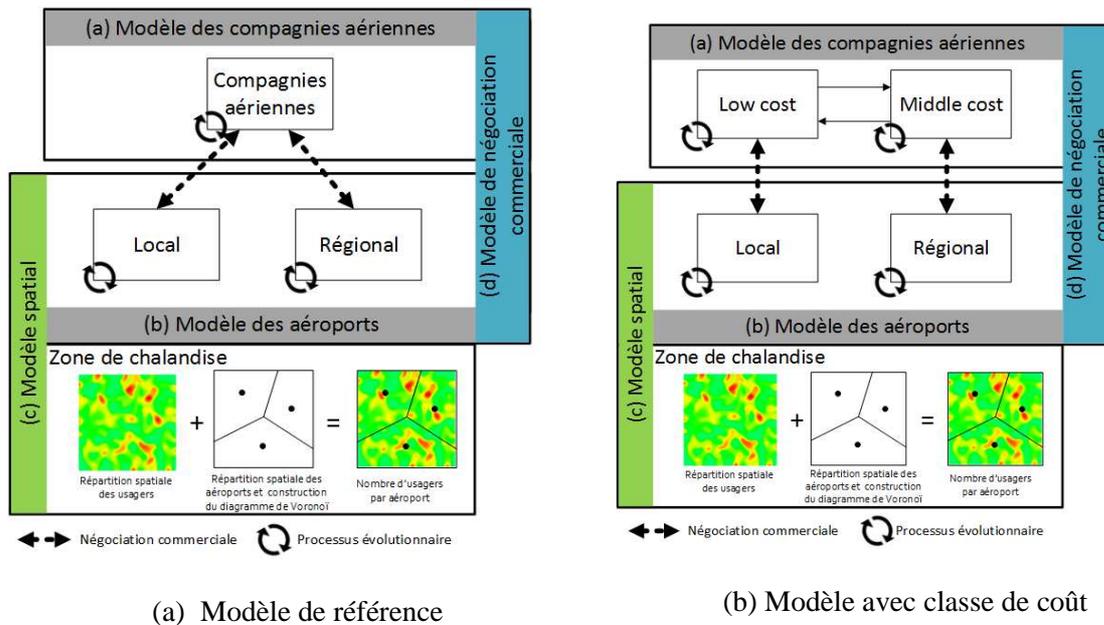


Figure 1: Respectivement de gauche à droit le modèle de référence et modèle avec classe de coût.

4.1 Modèle spatial

Le modèle spatial établit la répartition et le quota d'utilisateur des aéroports. L'espace est discrétisé par une grille régulière à 2 dimensions ; chaque cellule contient n usagers. La répartition des usagers est à l'image de la répartition d'une population sur un territoire. Cela signifie qu'elle est non uniforme et présente différentes concentrations de densité telles que haute, moyenne et basse densité qui respectivement correspondent sur la Figure 2 aux couleurs rouges, jaunes et vertes. Nous proposons l'algorithme de répartition Figure 2 se déroulant en deux étapes. Lors de la première étape, chaque cellule sera initialisée aléatoirement à la valeur 0 ou max_usager . La valeur max_usager représente le nombre d'usagers maximum que peut accueillir une cellule. La seconde étape, réaliser un lissage, chaque cellule sera égale à la médiane de ses voisins ; nous considérons le voisinage de Moore d'ordre 1. Le lissage est répété m fois suivant le résultat désiré.

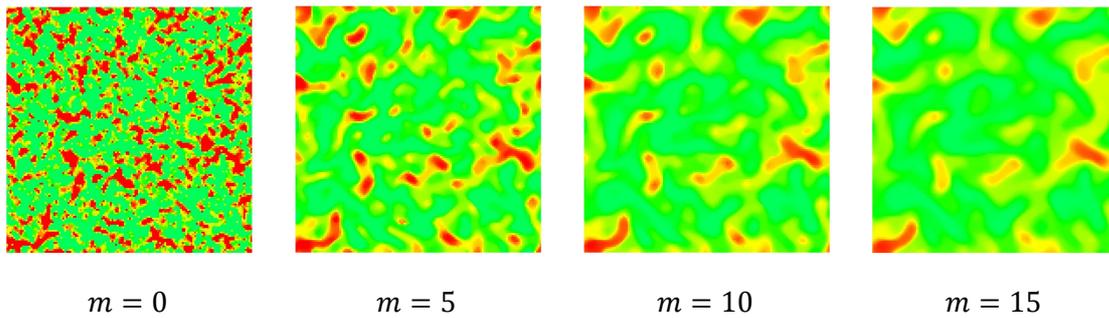


Figure 2 : Densité d'utilisateur suivant le nombre de lissages m effectués. Le rouge, jaune, vert correspondant respectivement à haute, moyenne et basse densité.

En plus de la répartition non uniforme des usagers, les aéroports sont répartis dans l'espace et se voient attribuer une zone de chalandise. La répartition dans l'espace des aéroports est aléatoire avec une contrainte de distance minimale deux à deux déterminés a priori. La zone de chalandise est construite à l'aide d'un diagramme de Voronoï. Les données du problème, pour la réalisation de ce dernier, sont un ensemble de points ; dans notre cas, ils représentent les aéroports. Le problème est décrit comme une décomposition de l'espace en régions de façon que chaque cellule appartenant à une région soit la plus proche d'un point. Chaque aéroport aura une zone de chalandise composée de toutes les cellules la plus proche d'elle donnant le nombre total d'usagers potentielle.

```

For each cellules do
  Initialiser nombre_usager à 0 ou max_usager aléatoirement.
End For
For i = 0 ; i < m ; i++ do
  Nombre_usager <- médiane du nombre_usager des cellules
  voisines
End for

```

Figure 3 : Algorithme générateur non uniforme de densité d'usagers

4.2 Aéroports

Les aéroports sont des agents ayant comme ressources un ensemble d'infrastructures non mobiles servant au traitement des passagers et une zone de chalandise. Nous distinguons deux catégories d'aéroport : les aéroports régionaux et les aéroports locaux. La catégorie est liée au nombre d'usagers sur la zone de chalandise. Les 9 %, proportions sont déduites du rapport d'activité 2012 de l'Union des Aéroports Français (Union des Aéroports Français, 2012), des aéroports ayant le plus d'usagers sur leurs zones de chalandise sont les régionaux ; les aéroports restants font partie de la catégorie des locaux. La distinction entre régionaux et locaux définit le nombre de contrats³ maximum pouvant être réalisé pour un aéroport. Les aéroports régionaux ont une plus grande capacité d'accueil au niveau de leurs infrastructures ; par conséquent, ils peuvent réaliser un nombre de contrats plus élevé par rapport aux aéroports locaux. Nous avons fixé un rapport de 16 contrats pour les régionaux pour 2 contrats pour les aéroports locaux l'unité est arbitraire, mais le rapport de ces valeurs est important. Ce rapport correspond à celui du nombre de mouvements, en million (Union des Aéroports Français, 2012) dans le contexte français en excluant les Aéroports de Paris.

³ Un contrat symbolise un ensemble de lignes aériennes entre deux acteurs se partageant les gains générés par ledit contrat.

Un aéroport n'ayant pas une rentabilité suffisante, en moyenne sur une période de temps significatif fixé préalablement, disparaîtra et cédera sa zone de chalandise aux aéroports alentour.

4.3 Compagnies aériennes

Les compagnies aériennes, agents mobiles, peuvent proposer un contrat à des aéroports de leur choix. Nous proposons deux types de classes de coût des compagnies aériennes. La première, correspondante au modèle A (cf. Figure 1(a)), à une classe de coût indifférencié. Cela signifie que les compagnies aériennes réalisent de façon indifférente une proposition commerciale à un aéroport régional ou local. La seconde, correspondant au modèle B (cf. Figure 1(b)), il y a deux classes de coût : les compagnies aériennes low cost et les compagnies aériennes middle cost qui respectivement font une proposition commerciale exclusivement aux aéroports régionaux et uniquement aux aéroports locaux. Les compagnies aériennes low cost et les compagnies aériennes middle cost sont considérées comme deux populations distinctes.

Néanmoins, une compagnie aérienne low cost a peut devenir une compagnie aérienne middle cost et vice-versa suivant la règle ``mercantile" : tirer une compagnie aérienne middle cost b au hasard et si la rentabilité de b est supérieure celle de a , alors a devient une compagnie aérienne middle cost.

4.4 Négociation commerciale

La négociation commerciale est une recherche d'un accord de contrat entre une compagnie aérienne et un aéroport pour la répartition des gains engendrés par la mise en service d'un ensemble de désertes ariennes. Pour réaliser une négociation commerciale, l'offre et la demande doivent se rencontrer. Ayant un agent mobile et un autre non mobile, c'est la compagnie arienne qui choisira l'aéroport qui lui sera le plus attractive financièrement. La négociation commerciale proprement dite est réalisée par une variante du jeu de l'ultimatum proposé par (Güth, et al., 1982) nommé « jeu de l'ultimatum symétrique ».

Le jeu de l'ultimatum 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. Le joueur B peut accepter ou refuser l'offre. 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 de l'argent.

Le jeu de l'ultimatum symétrique diffère dans la proposition du partage. Ici, les deux joueurs proposent symétriquement, dans le sens où aucun des deux joueurs n'influence le choix, la part désirée. Dans le cas où la somme des parts est supérieure à un, les participants sont en positionnement conflictuel Figure 4(2), il y a échec de l'ultimatum. Si la somme est strictement inférieure à un, les participants n'ont aucun rapport de force Figure 4(4), le partage est effectué, mais le partage des ressources financières n'est pas optimal. Lorsque la somme des parts est égale à un, il y a un équilibre de Nash ; cela signifie que le choix réalisé par les participants étant stable du fait qu'aucun ne peut changer seul sa stratégie sans affaiblir sa position personnelle. Il en ressort trois points remarquables en plus des deux précédemment cités : en faveur à la compagnie aérienne Figure 4(1), en faveur pour l'aéroport Figure 4(5), un rapport d'équité Figure 4(3).

La répartition du gain demandée discutée par la négociation commerciale est la suivante :

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

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 $g_A \in \mathbb{R}$, $g_{CA} \in \mathbb{R}$, $mu \in \mathbb{N}$ le nombre d'usagers et $G_u \in \mathbb{R}$ le gain unitaire.

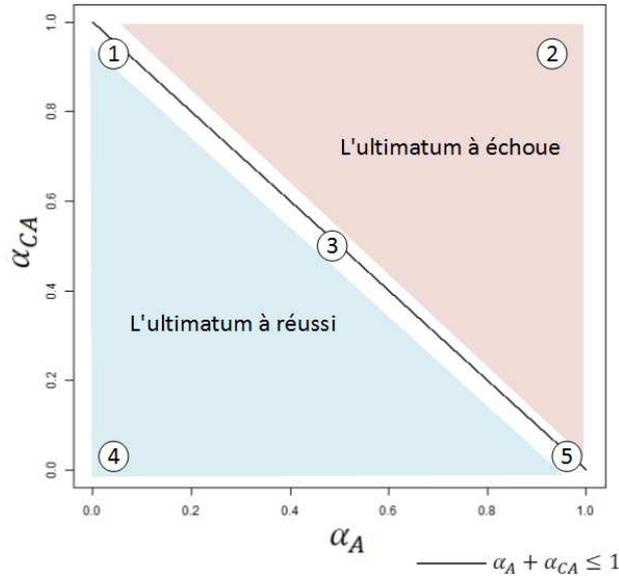


Figure 4 : Rapport de force entre les aéroports et les compagnies aériennes

Les compagnies aériennes étant mobile contrairement aux aéroports, permette aux compagnies aériennes de les mettre en concurrence, dans une zone donnée en examinant les k plus proche aéroport voisins, en considérant les exigences suivantes : celui-ci qui a le plus d'usagers, qui n'est pas en saturation et le jeu de l'ultimatum symétrique est stratifié.

4.5 Modèle évolutionnaire

Chaque agent possède deux caractéristiques décrivant la stratégie du joueur : la variable τ et α . Dans le domaine des algorithmes évolutionnaires, les deux variables sont appelées gène toutes deux forment le génome d'un agent. La variable discrète τ définit le type de la sous-population : un aéroport local, un aéroport régional, une compagnie aérienne low cost, une compagnie aérienne middle cost. La variable α définit la stratégie utilisée lors de la négociation commerciale, variable continue exprimée entre 0 et 1.

Les populations (l'ensemble des agents) sont soumises à l'algorithme évolutionnaire (Figure 5). Ce dernier ne fait aucune hypothèse psychologique. Il n'y a donc aucune orientation sur le choix des stratégies à adopter par les agents tout en s'ajustant au marché ; la seule information utilisée est le gain des agents. L'algorithme se décompose en trois étapes. (i) À partir d'une population parente, il y a sélection des agents en favorisant ceux de meilleurs gains. Pour ce faire, dans ce travail, nous utilisons une sélection par tournoi consistant à un tirage au sort avec remise de deux agents ; celui qui a le meilleur gain est sélectionné. Dans le domaine des algorithmes évolutionnaires, le gain est souvent

appelé fitness, et la fonction de gain, fonction d'évaluation. Il y a réitération du processus de tirage au sort autant de fois qui est nécessaire pour obtenir une population génitrice de taille équivalente la population parente. La population agissant comme une mémoire explorant une grande variété de stratégies au temps t , il y a propagation des meilleures stratégies au temps $t+1$. (ii) À partir de la population génitrice, il y a mutation de son génome en niveau du gène α en ajoutant un nombre réel aléatoire compris entre $- \epsilon$, $+ \epsilon$, dans le but d'explorer une plus grande variété de stratégies qui engendre une population d'enfant. (iii) Cette dernière remplace la population initiale ; la spatialisation est prise en compte dans le processus évolutionnaire.

[Dans le cas spatial : préciser la sélection et aussi le remplacement avec élitisme]

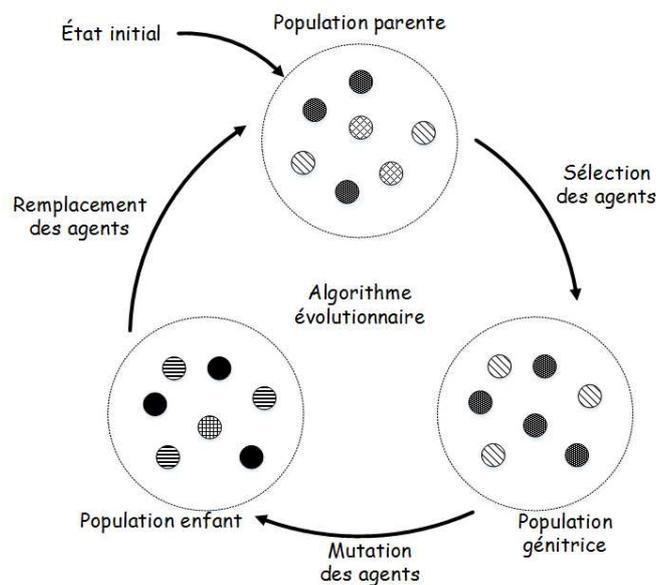


Figure 5 : Schéma d'un algorithme évolutionnaire

4.6 Coalition

La coalition est réalisée dans l'ambition de partager un objectif commun ; dans le cas aéroportuaire, la survie se partage les ressources c'est-à-dire les gains, les coûts et les infrastructures. Trois éléments relatifs à une coalition peuvent être décrits : (i) quels sont les agents susceptibles de se coaliser au sein d'une population. (ii) Quels sont les mécanismes régissant la formation d'une coalition. (iii) Et comment les agents au sein d'une coalition se répartissent-ils les ressources. Notons qu'il existe une grande variabilité de façon de répartir les ressources au sein d'une coalition ; c'est pourquoi nous considérons une coalition comme un ensemble d'aéroports agrégés représentant une seule entité. Quand un aéroport gagne un contrat à travers une négociation commerciale, c'est l'ensemble des aéroports formant la coalition qui le gagne.

Nous proposons un algorithme de coalition à n joueurs (Figure 9) se déroulant en trois étapes. Tout d'abord, il y a sélection des aéroports qui participeraient à la négociation pour en former une coalition entérinée (Figure 8). La sélection des agents se réalise en respectant les contraintes spatiales ; nous choisissons un pivot, i.e. un représentant, tous les agents dans un rayon préétabli seront

sélectionnés. Tous (le pivot et les agents voisins dans le rayon) sont sélectionnés suivant des critères définis comme « l'agent n'appartient pas déjà à une coalition entérinée ».

Ensuite, il y a la négociation entre les participants. Nous avons introduit une notion de degré de coopération d'un participant $C_i \in [0;1]$ pour le participant i . Il représente le degré du participant à la coopération pour un objectif commun. À partir du degré de coopération d'un participant C_i , nous pouvons déduire le degré de coopération extrinsèque $C_{\bar{i}}$ et le degré de coopération global C_g . $C_{\bar{i}}$ décrit le degré de coopération de la coalition sans le participant i ; ce dernier évaluant l'envie de coopération des autres participants. Nous pouvons le décrire avec un principe multiplicatif et par la moyenne géométrique, car les agents se coalisant auront envie de coopérer avec d'autres qui ont la même envie d'attendre l'objectif commun :

$$C_{\bar{i}} = \sqrt[\#N-1]{\prod_{n \in N - \{i\}} C_n}$$

avec N l'ensemble de participants et $\#N$ le nombre de participants. C_g évaluant le degré de coopération de l'ensemble de la coalition ; il peut être confronté aux types de traitement de conflits proposé par Hodgson (Hodgson, 1994) en 1994 (Figure 7). Puisqu'un faible degré de coopération globale donne lieu à un évitement des participants pour réaliser une coalition ; contrairement à un degré de coopération globale élevé, les participants désirent collaborer pour attendre un objectif commun. Nous pouvons le décrire comme :

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

Notons que l'on peut en déduire la relation suivante :

$$C_g^{\#N} = C_i \cdot C_{\bar{i}}^{\#N-1}$$

Le dernier élément pour essayer de rendre compte de la motivation de chaque participant à collaborer et à faire des concessions pour la coalition est défini par le seuil 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 comme présentée en algorithme Figure 6.

```

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

```

Figure 6 : Algorithme de négociation d'une coalition

En dernière étape de l'algorithme de coalition est le partage des gains entre chaque participant à la coalition. Dans le cas aéroportuaire, le partage des gains est réalisé implicitement lors de la

négociation commerciale puisque cette dernière est réalisée entre une compagnie aérienne et la coalition. Cela se traduit par une mutualisation de la capacité maximale de chaque aéroport, et ainsi que de l'alpha. L'alpha utilisé est l'aéroport possédant le plus élevé alpha de la coalition.

Notons qu'il y a trois types de coalition dans le contexte aéroportuaire : coalition entre que des aéroports locaux, coalition entre que des aéroports régionaux, coalition des aéroports locaux avec des aéroports régionaux.

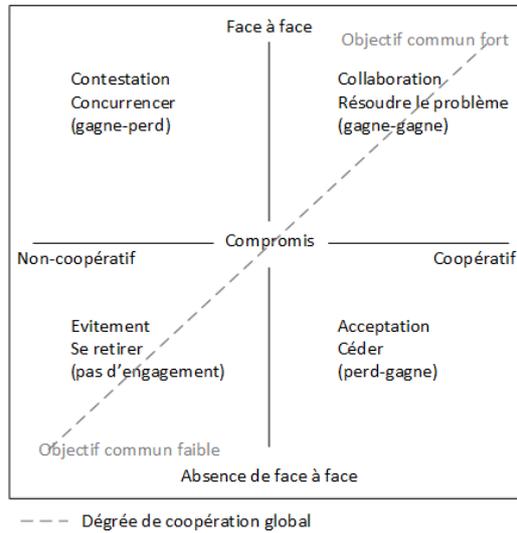


Figure 7 : Type de traitement de conflit (D'après Hodgson 1994). Nous avons ajouté sur la figure les éléments suivants : le degré de coopération global, l'objectif commun faible et l'objectif commun fort

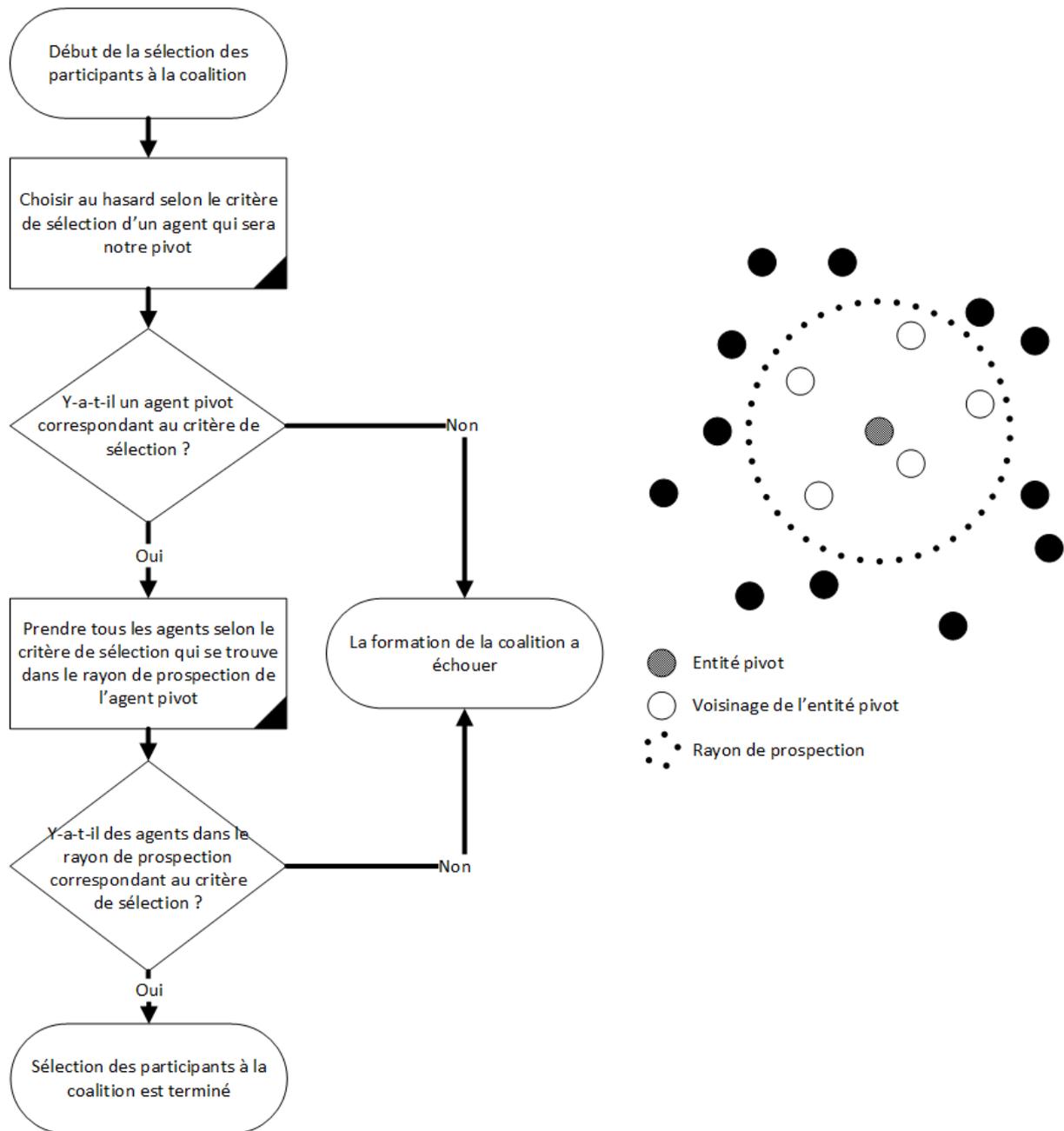


Figure 8 : Sélection des participants à la coalition

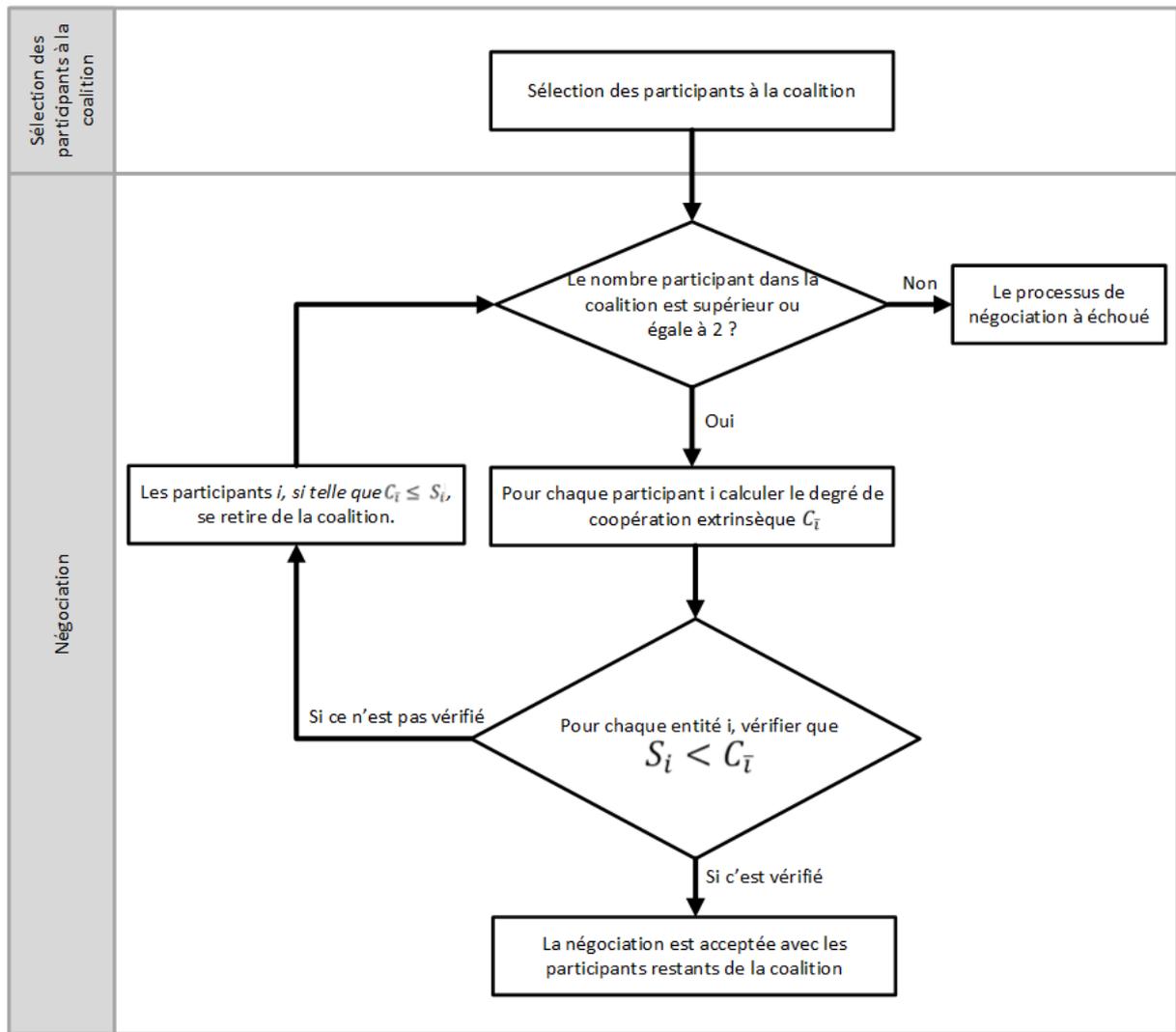


Figure 9 : Algorithme de coalition

5 Résultats expérimentaux

Cette section étudie les questions de la section Problématique à l'aide de simulations du modèle SACAT ; se déroulant à temps synchrone. Dans un premier temps, nous étudierons le modèle spatial. Dans un deuxième temps, l'influence des classes de coût des compagnies aériennes c'est-à-dire que nous ne comparerons aucune classe de coût (le modèle A) et deux classes de coût, low cost et middle/high cost, (le modèle B) dans une situation sans disparition des aéroports et de formation de coalition avec le marché fixe signifiant que le nombre de contrats ne change pas. Dans un troisième temps, nous comparerons l'effet de la coalition lorsque les aéroports peuvent fermer et disparaître. Les coalitions ne sont pas soumises à un processus évolutionnaire, les coalitions se forment initialement au début de la simulation puis restent telle quel jusqu'à la fin de la simulation. Ainsi, le modèle spatial est construit avec les agents aéroports et les compagnies aériennes, quand il y a coalition, ces dernières sont formées suivant trois types de coalition : coalition d'aéroports locaux seulement, coalition d'aéroports régionaux seulement et coalition mixte aéroports locaux et régionaux. Ces dernières sont obtenues en fixant les paramètres adéquats, c'est-à-dire S_i et C , du modèle de coalition. Ensuite, la négociation commerciale et le modèle évolutionnaire sont répétés suffisamment pour aboutir à une convergence du système.

Bien que le modèle tente de rester le plus simple possible, 16 paramètres sont nécessaires pour la simulation. Le Tableau 1 résume l'ensemble des paramètres ainsi que leurs valeurs étudiées. Les valeurs sont choisies pour de l'ordre de grandeur du paysage français lorsque cela est possible, par exemple : le nombre d'aéroports, le nombre de contrats maximal que peut accueillir un aéroport et la densité d'usager. De plus, un plan factoriel des paramètres les plus pertinents du modèle tel que le nombre de contrats et les différents types de coalition ont été étudiés. [nombre de simulations + moyenne est donnée par la suite] Nous avons utilisé l'outil de traitement statistique R⁴ et l'outil de tracer de courbe gnuplot⁵. Nous avons utilisé le simulateur Netlogo3⁶ pour construire la simulation du modèle SACAT et réaliser son étude.

5.1 Modèle spatial

Le but du modèle spatial n'est pas d'avoir une copie conforme de la réalité qui est un travail en soi par exemple les travaux de définition d'une faible densité (Noin, 2007). Toutefois, nous obtenons une distribution de populations suffisamment satisfaisante pour l'étude de notre modèle où il existe des zones à forte densité et de larges zones à faible densité. Par la suite, la densité de population pourra expliquer la dynamique des simulations observées.

Nous distinguons donc deux types de densité d'usagers : haute densité correspondant à toute cellule ayant plus de 50 % d'usager maximum et basse densité correspondante à toute cellule ayant moins de 50 % d'usager maximum ; après simulation, il y a respectivement à 17 % et 83 % de la surface avec ces types de densité. La répartition d'usager simulée n'est donc pas uniforme avec une large majorité de zone de basse densité. Même si cette répartition n'est sans doute pas proche d'une situation réelle particulière, elle nous permet dans le cadre de cette étude de discuter de manière pertinente selon la densité de population.

Au sein des 200 aéroports, nous avons fixé, conformément au paysage français, une proportion de 9 % d'aéroports régionaux et de 91% de locaux. Par simulation, nous observons qu'en moyenne 74 % des usagers sont dans une zone de chalandise d'un aéroport local et que 26 % sont dans une zone de chalandise d'un aéroport régional. Dans les simulations, en moyenne, un aéroport local est 3.3 fois plus petit en termes d'usager qu'un aéroport régional. Encore une fois, ces proportions nous permettent de discuter de façon pertinente dans le cadre de cette étude en termes de taille d'aéroport en ayant des aéroports régionaux de tailles plus importantes que les aéroports locaux.

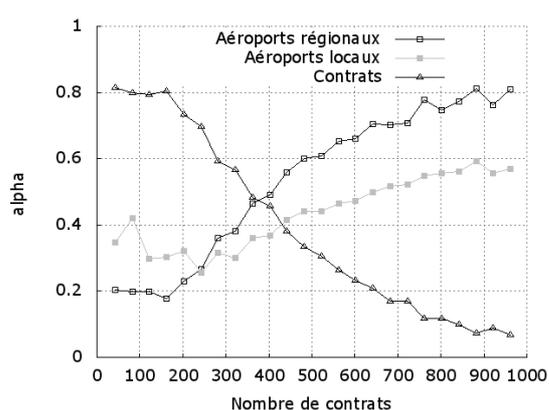
5.2 Influence des classes de coût des compagnies aériennes

Dans cette section, nous étudions l'influence sur le pouvoir de négociation de l'existence de compagnies aériennes low cost en particulier sur celui des aéroports locaux.

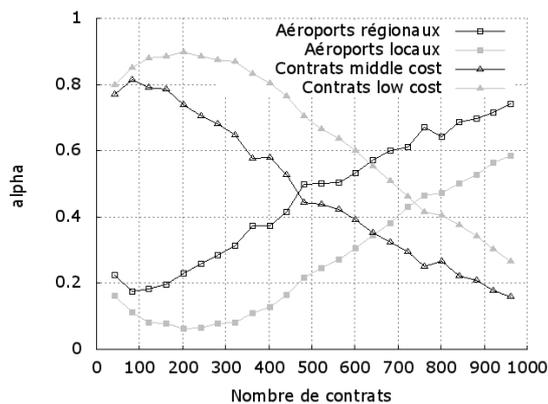
⁴ <http://www.r-project.org/>

⁵ <http://www.gnuplot.info/>

⁶ <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>



(a) Modèle A



(b) Modèle B

Figure 10 : Partage des gains en fonction du nombre de contrats. A gauche un seul contrat a droite deux type de contacts.

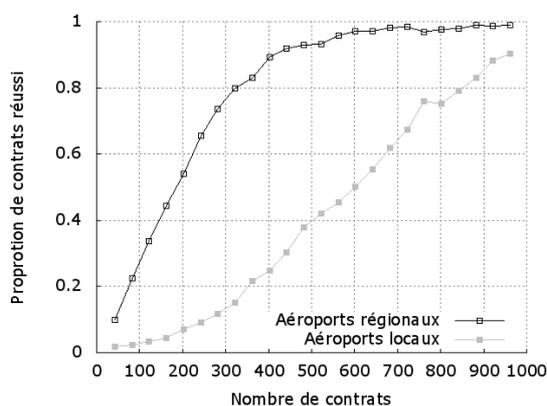


Figure 11 : Proportion de contrats acceptés en moyenne pour les aéroports locaux et régionaux pour le modèle B.

Nous avons étudié deux situations minimalistes pour comparer le modèle n'ayant pas de classe de coût et un modèle ayant deux classes de coût (low cost et middle/high cost) au niveau des compagnies aériennes qui respectivement correspondent au modèle A et au modèle B. Dans cette section, les aéroports ne ferment pas et ne réalisent aucune coalition.

La Figure 10(a), montre les parts de gain demandées moyen dans le cas d'un seul type de compagnie aérienne (modèle A) en fonction du nombre de contrats entre aéroports et compagnies aériennes. La part de gain demandée des aéroports augmente et celle des compagnies aériennes diminue avec l'augmentation du nombre de contrats. Le point équitable, où chacun demande la même part de gain, est de 390 contrats. À partir de 200 contrats, les aéroports régionaux obtiennent une plus grande part que l'aéroport local.

Le pouvoir de négociation est en faveur des aéroports régionaux, car ils sont plus attractifs financièrement que les aéroports locaux. Ce qui implique que les compagnies aériennes se concentrent principalement sur le marché des aéroports régionaux. Un aéroport régional cumule deux points en sa faveur, le fait d'avoir de beaucoup d'usagers et d'être en faible nombre. De plus, la mise en concurrence des aéroports s'effectue dans une zone restreinte, donc s'il y a un aéroport régional dans la zone alors il est forcément choisi du fait qu'il est plus attractif financièrement.

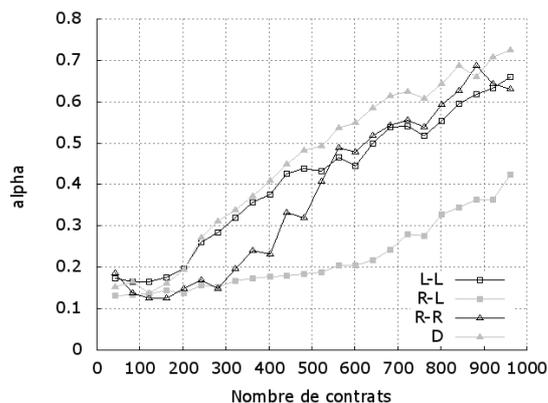
Pour le modèle B, Figure Figure 10(b), la part de gain des aéroports augmente et la part de gain des compagnies aériennes diminue avec le nombre de contrats. Pour les compagnies aériennes, deux classes de coût co-existent. Sauf pour un faible nombre de contrats, les parts de gain demandées varient de manière identique. Nous avons deux points équitables une pour la classe de coût aéroports régionaux/middle cost et pour la classe de coût aéroports locaux/low cost qui respectivement correspond à 462 contrats et à 742 contrats.

Notons que la saturation illustrée dans la Figure 11 des aéroports régionaux intervient à partir de 400 contrats.

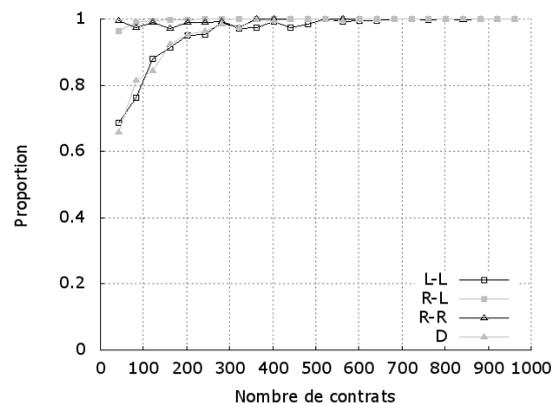
La mise en place des classes de coût a permis d'établir deux marchés distincts. Les aéroports régionaux ont un pouvoir de négociation plus grand que les aéroports locaux. Quand il n'y a pas de saturation (nombre de contrats inférieur à 200) du marché des aéroports régionaux, le pouvoir de négociation des aéroports régionaux et locaux sont très proches. Lors que la saturation des aéroports régionaux intervient (nombre de contrats supérieur à 200), les compagnies aériennes n'ayant pas de contrat changent de classe de coût pour obtenir des contrats. La différence du pouvoir de négociation entre aéroports régionaux et locaux est donc plus marquée avec l'introduction des classes des coûts.

Finalement, le fait d'introduire une segmentation du marché ajoute une pression désavantageuse pour les aéroports qu'ils soient régionaux ou locaux. Cependant, cela est moins marqué pour les aéroports régionaux.

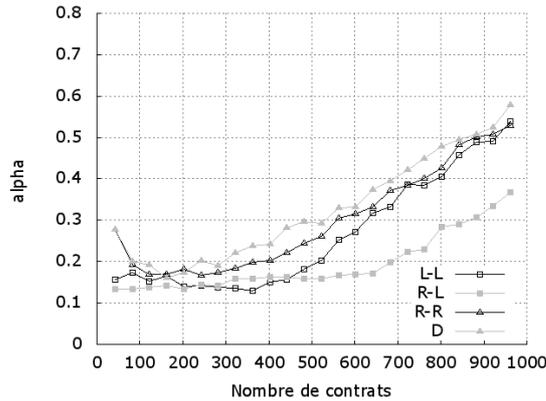
5.3 Effet de la disparition et des coalitions



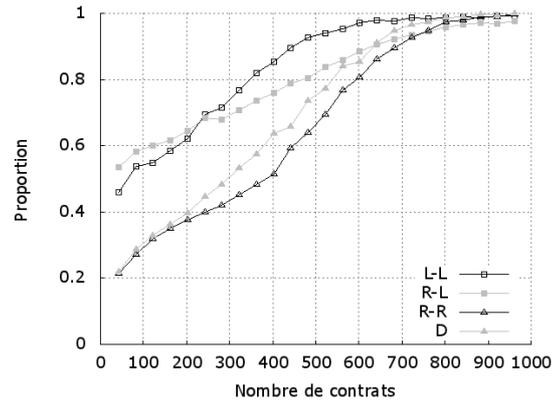
(a) Modèle A



(b) Modèle A



(c) Modèle A



(d) Modèle A

Figure 12 : Moyenne de la part de gain et de la proportion d'aéroport survivant. La situation D coorespond à sans coalition avec concurrence mamimale, la situation L-L, R-R, R-L correspondent respectivement avec coalition que d'aéroports locaux, à disparition avec que des coalitions d'aéroports régionnaux et avec des coalitions mixtes.

Cette section étudie les conséquences la formation de coalitions ; dans toute cette section, les aéroports non rentables, i.e. les aéroports n'ayant pas obtenu de contrat durant 100 itérations, ferment et disparaissent. La Figure 12 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 est retenue est celle obtenue à la convergence c'est-à-dire ici au bout de 4000 itérations.

À la fois pour les aéroports régionaux et locaux, la part de gain est supérieure lorsqu'il n'y a aucune coalition, quelque soit le nombre de contrats. Cette part augmente avec le nombre de contrats.

La situation témoin, sans aucune coalition, est le plus favorable dans la part de gain que cela soit pour les aéroports régionaux que les aéroports locaux. Notons que l'association entre régionaux et entre locaux n'a pratiquement pas d'influence sur la part de gain. Par contre, la coalition mixte est désavantageuse pour les aéroports régionaux et les aéroports locaux au niveau de la part du gain. Globalement, les aéroports régionaux ont une part de gain plus élevée que les aéroports locaux ; cet écart est plus marqué lorsque la taille du marché est élevée : pour 200 contrats et la situation 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 et de 0.5.

Bien que le gain ne soit pas meilleur dans le cas des coalitions régionales seules et locales seules, cela apporte un bénéfice quant à la survie des aéroports en coalition lorsque le marché est petit. Ce bénéfice est très important pour les aéroports locaux, car pour une taille de marché de 100 contrats s'ils ne réalisent pas de coalition entre eux le taux de survie est seulement de 30 % alors que s'il y a coalition entre aéroports locaux le taux de survie est de 55 %. Cette différence est très prononcée jusqu'à un nombre de contrats élevé : 600 contrats. En ce qui concerne les coalitions d'aéroports régionaux seuls, l'effet est moindre, car étant peu enclin à disparaître ; les coalitions ne sont qu'utiles pour une taille de marché très faible de 0 à 200 contrats. La coalition mixte a aussi un effet positif sur la survie des aéroports du même ordre que lors de coalition d'aéroport régional seul et aéroports locaux seuls.

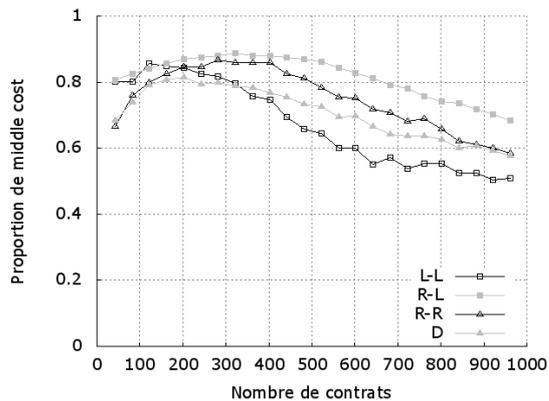


Figure 13 : Proportion de compagnie aérienne middle cost

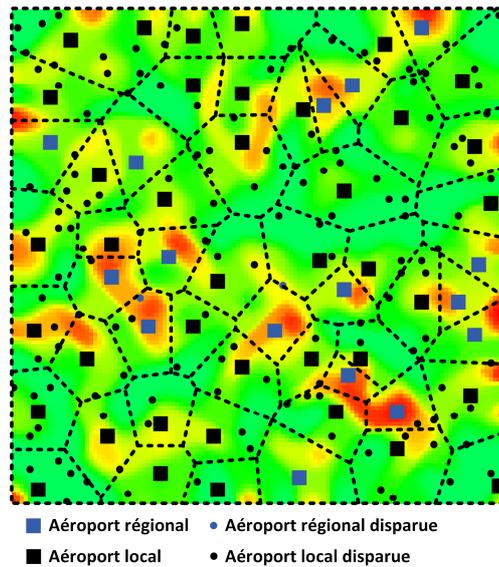


Figure 14 : Aéroports survivants avec densité de population

La disparition des aéroports locaux est plus grande que pour les aéroports régionaux. Ayant des zones de chalandise plus petites que les aéroports régionaux, elles sont alors moins attractives financièrement surtout lorsque les aéroports régionaux ne sont pas saturés. Deux facteurs peuvent expliquer l'attractivité des aéroports locaux ; d'une part, de la part de gain sont plus faibles que les aéroports régionaux et d'autre part la saturation des aéroports régionaux obligeant les compagnies aériennes à aborder le marché low cost.

Les aéroports régionaux sont situés près de zone à haute densité comme dans l'exemple de la Figure 14 en rouge. 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 chalandise suffisamment large leur permettant d'être suffisamment attractives.

Au niveau des compagnies aériennes (cf. Figure 13), les observations sont le complémentaires de celle pour les aéroports les middle cost sont très avantagés lors de coalitions mixtes, car ce type de coalition permet des offres régionales avec une capacité d'accueil plus grande (mutualisation de la capacité maximum d'accueil de tous les aéroports de la coalition). Faire des coalitions entre aéroports locaux induit plus de compagnies aériennes low cost. Notons que plus le marché est grand en terme de nombre de contrats, plus le nombre de contrats middle cost et de contrats low cost sont plus équilibrés ; ceci à cause de la saturation des aéroports régionaux.

Avec un marché suffisant, supérieure à 200 contrats, une coalition entre les aéroports régionaux ou mixtes entre les aéroports régionaux et aéroports locaux n'augmente pas de taux de survie notablement pour les aéroports régionaux et tend à faire baisser la part de gain. Ainsi, il est peu probable de voir apparaître ce type de coalition. Les coalitions mixtes ou entre aéroport local augmentent les chances de survie. Mais les coalitions mixtes seront refusées par les aéroports régionaux. Il est donc probable que les alliances entre aéroports locaux se réalisent.

5.4 Forme de coalition

[CALCULE] L-L / L-R / R-R

6 Conclusion

Le modèle proposé Simulation Aéroport Compagnie Aérienne et Territoire (SACAT) modélise les rapports commerciaux entre les aéroports et les compagnies aériennes du point de vue l'aménagement du territoire suite aux réformes de libéralisation du marché aéroportuaire. Ce modèle ne vise pas à reproduire une situation particulière du territoire, ce qui est hors de portée face aux données à notre disposition et aux connaissances des acteurs eux-mêmes, mais il apporte des éléments de réponse sur les facteurs importants et sur les dynamiques possibles du marché aéroportuaire. Les simplifications utilisées dans ce modèle sont issues d'un dialogue interdisciplinaire entre aménagement du territoire et informatique. Le 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 classes de coût des compagnies aériennes qui segmente le marché aéroportuaire, la taille du marché aérien et les capacités d'accueil des aéroports, et les types de coalition entre aéroports qui est le 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.

Les premiers résultats expérimentaux issus de simulations montrent sans aucune coalition entre aéroports que l'existence de compagnies aériennes « low cost » entraîne une plus grande pression sur les aéroports locaux dont les zones de chalandise sont plus restreintes que les aéroports régionaux. Les aéroports locaux ont alors une faible force de négociation commerciale et ont tendance à fermer fréquemment faute de rentabilité suffisante. Une augmentation du marché aéroportuaire sature d'abord les capacités d'accueil des aéroports régionaux, plus attractifs, avant de profiter aux aéroports locaux. De manière a priori non attendue, l'introduction de coalition entre aéroports n'entraîne pas une plus grande part de gain pour les aéroports. Une coalition permet une meilleure répartition des gains entre aéroports ce qui diminue avant tout le taux de fermeture. En s'associant, les aéroports peuvent espérer une meilleure résilience face au marché. Malgré tout, tous les types de coalition ne semblent pas pouvoir émerger. Les aéroports régionaux étant dominants, une association d'un aéroport entraîne une perte de gain pour lui sans pour autant augmenter notablement la résilience. Dans un premier temps, les coalitions entre aéroports locaux semblent profitables.

Les perspectives de ce travail pluridisciplinaire peuvent s'organiser dans deux domaines celui de l'informatique et de la théorie des jeux et celui des sciences humaines en aménagement du territoire. Coté théorie des jeux, étudier l'influence de spatialisation dans le modèle de coévolution du jeu à ultimatum symétrique et étudier le jeu (évolutionnaire) de coalition définit dans ce travail. Coté aménagement du territoire, étudier deux types de coalition émergents simultanément : les coalitions aéroports régionaux seuls avec des coalitions aéroports seuls ; intégrer différents types de contrats ; utiliser la technologie GIS (Système d'Information Géographique) afin d'intègre des données réelles comme la densité de population ; remplacer la distance spatiale par les distances de transports terrestres.

7 Bibliographie

Bachrach, Y., Kohli, P. & Graepel, T., s.d. *Rip-off: Playing the Cooperative Negotiation Game (Extended Abstract)*. s.l.:s.n.

Burguillo-rial, J. C., s.d. *A Memetic Framework for Describing and Simulating Spatial Prisoner's Dilemma with Coalition Formation*. s.l.:s.n.

Carrard, M., 2011. La coopération aéroportuaire au sein de l'Espace Métropolitain Loire-Bretagne : une réflexion à l'aide de la théorie des jeux. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, #feb#, février(1), pp. 185-211.

Carrard, M., s.d. La modélisation réflexive : une contribution de la recherche-action au développement durable. Dans: s.l.:s.n.

Carrard, M., s.d. La réforme aéroportuaire et les relations stratégiques entre aéroports et compagnies aériennes : une analyse à l'aide de la théorie des jeux.

de Jong, S., Uyttendaele, S. & Tuyls, K., 2014. Learning to Reach Agreement in a Continuous Ultimatum Game. *{arXiv:1401.3465 [physics]}*, #jan#.

Ellingsen, T., 1995. *The Evolution of Bargaining Behavior*, s.l.: s.n.

Horn, C., 2010. *Airports and territory : emergence of a new strategic actor in the air transport system*, s.l.: s.n.

Iranzo, J., Román, J. & Sánchez, A., 2011. The spatial Ultimatum game revisited. *Journal of theoretical biology*, #jun#, 278(1), pp. 1-10.

Laplace, I. et al., 2010. Future strategies for airports. *Air Transport and Operations*, pp. 506-513.

Leroux, I. & Berro, A., 2010. Négociation public/privé et coévolution stratégique dans un biocluster. *M@n@gement*, #mar#, Vol. 13(1), pp. 38-69.

Nowak, M. A., Page, K. M. & Sigmund, K., 2000. Fairness Versus Reason in the Ultimatum Game. *Science*, #sep#, 289(5485), p. 1773–1775.

Page, K. M., Nowak, M. A. & Sigmund, K., 2000. The spatial ultimatum game.. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, #nov#, 267(1458), pp. 2177-2182.

Skiena, S. S., 2008. *The algorithm design manual*. 2nd ed éd. London: Springer.

Smith, J. M. & Price, G. R., 1973. The Logic of Animal Conflict. *Nature*, #nov#, 246(5427), pp. 15-18.

Szakiel & Beare, S., 2009. Spatial Competition and the Structure of Retail Markets. *The 18th World {IMACS Congress and {MODSIM09}*, pp. 1119-1125.

Szolnoki, A., Antonioni, A., Tomassini, M. & Perc, M., 2014. Binary birth-death dynamics and the expansion of cooperation by means of self-organized growth. *{EPL (Europhysics Letters), #feb#, 105(4), p. 48001.*

Szolnoki, A., Perc, M. & Szabo, G., 2012. Defense mechanisms of empathetic players in the spatial ultimatum game. *Physical Review Letters, #aug#.109(7).*

Talman, S., Hadad, M., Gal, Y. & Kraus, S., 2005. *Adapting to Agents' Personalities in Negotiation.* New York, {NY, {USA, {ACM, p. 383–389.

Wu, D. J. & Sun, Y., 2002. Cooperation in multi-agent bidding. *Decision Support Systems, 33(3), pp. 335-347.*

Xavier, P. & Michel, R., 2011. Les aéroports et l'objectif d'aménagement du territoire : entre concurrence et coopération. Dans: *La réforme aéroportuaire de la loi du 13 août 2004 à l'épreuve des faits.* s.l.:L'Harmattan, pp. 165-180.

Nom du paramètre	I nterval	Interprétation	Valeur(s)
Paramètres spatiaux			
<i>dimension_grille</i>	N	Dimension de la grille	120x120
<i>max_usager</i>	N	Nombre d'unité d'utilisateur par cellules	1000
<i>m</i>	N	Nombre d'itérations pour le lissage	10
<i>nombre_aeroport</i>	N	Nombre d'aéroports	200
<i>distance_eloignement</i>	N	Distance d'éloignement minimale entre deux aéroports	3
Paramètres de négociation commerciale			
<i>nombre_contrat</i>	N	Nombre de contrats	[0 ; 1000]
<i>nombre_prospection</i>	N	Distance maximum dans lequel les compagnies aériennes cherchent des aéroports	12
<i>k_plus_proche_AG_A</i>	N	Sélection des k-plus-proche aéroports voisins pour participer au tournoi de la sélection α	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>	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 aérienne	0.0005
Paramètre jeux de coalition aéroportuaire			
<i>k_plus_proche_AG_coalition</i>	N	k-plus-proche aéroports qui sont susceptible de réaliser une coalition	3

<i>seuil</i>	[0 ; 1]	Seuil minimal d'acceptabilité du degré de coopération extrinsèque pour un agent.	0.01
Limite de la capacité aéroportuaire			
<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
<i>min_rentabilite_A</i>	\mathbb{R}	Seuil minimal de rentabilité d'un aéroport entraînant la disparition (fermeture)	1

Tableau 1 : Paramètres du modèle