



**HAL**  
open science

# Transférabilité d'une modélisation-simulation multi-agents : le comportement inter-gares des voyageurs de la SNCF lors des échanges quai-train

Fatma Elleuch

► **To cite this version:**

Fatma Elleuch. Transférabilité d'une modélisation-simulation multi-agents : le comportement inter-gares des voyageurs de la SNCF lors des échanges quai-train. Intelligence artificielle [cs.AI]. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2019. Français. NNT : 2019CNAM1227 . tel-02137524

**HAL Id: tel-02137524**

**<https://theses.hal.science/tel-02137524>**

Submitted on 24 Jun 2019

**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.

*École Doctorale d'Informatique, Télécommunications et Electronique*

Centre d'étude et de recherche en informatique et communications

**THÈSE** présentée par :

**Fatma ELLEUCH**

soutenue le : **19 mars 2019**

pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Discipline/ Spécialité : Informatique

**Transférabilité d'une modélisation-simulation  
multi-agents :  
le comportement inter-gares des voyageurs de la SNCF lors  
des échanges quai-train**

**THÈSE dirigée par :**

**M. Stéphane Natkin**  
**M. Charles Tijus**

Professeur des Universités, CNAM-Cédric  
Professeur des Universités, Université de Paris 8

**THÈSE encadrée par :**

**M. Axel Buendia**  
**Mme Stéphanie Donnet**

Enseignant Chercheur Associé, CNAM-Cédric  
Ergonome, SNCF Réseau

**RAPPORTEURS :**

**M. Alain Lioret**  
**M. Ludovic Le Bigot**

Professeur des Universités, Université de Paris 8  
Professeur des Universités, Université de Poitiers

**EXAMINATEURS :**

**Mme Safia Kedad Sidhoum**  
**Mme Corinne Talotte**

Présidente du jury, Professeur des Universités, CNAM  
Directrice Renouveau Technologique, SNCF



**Transférabilité d'une modélisation-simulation  
multi-agents :  
le comportement inter-gares des voyageurs de la  
SNCF lors des échanges quai-train**



## Remerciements

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à *Stéphane Natkin* et *Charles Tijus* pour avoir accepté de diriger ce travail. Je les remercie pour m'avoir fait confiance et accordé du temps, pour leur suivi rigoureux ainsi que leurs précieux conseils. Ce travail a été également encadré par *Axel Buendia* et *Stéphanie Donnet* que je remercie très vivement pour leurs conseils avisés, suivi minutieux, écoute et soutien sans faille.

Ces co-direction et co-encadrement ont été plus qu'enrichissants autour d'une problématique interdisciplinaire, et ont permis la cohabitation de l'intelligence artificielle, la psychologie cognitive et des recherches sur les transports. Merci pour cet encadrement de qualité, à travers lequel j'ai beaucoup appris.

Mes sincères remerciements d'adressent également aux membres de mon jury qui ont accepté d'évaluer ce travail de thèse. Je remercie tout particulièrement les professeurs *Ludovic Le Bigot* et *Alain Lioret*, pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse en acceptant d'être rapporteurs. Je remercie également le professeur *Safia Kedad Sidboun* ainsi que *Corinne Talotte* pour avoir accepté se joindre à ce jury comme examinatrices.

Ces travaux de thèse ont été suivis de près, à *SNCF réseau*, par *Jean-Claude Larrieu* et *Laurent Quelet*, que je tiens à remercier pour le temps consacré au suivi de la thèse et pour leur confiance. Merci également à *David De Almeida*, *Alexandre Ferret*, *Chantal Joie-La Marle*, *Pierre Marie Verchère*, *Guillaume Craveur* et *Marin Dubroca-Voisin* pour leur suivi du projet et la richesse de leurs regards expérimentés, durant nos comités de suivi de thèse.

Ces travaux de recherches sont le fruit d'une collaboration étroite avec *SpirOps*, entreprise dédiée à la recherche et développement en intelligence artificielle. Je souhaite remercier, particulièrement, *Benoît Legrand* pour sa grande implication dans ce projet, ses conseils et toutes les réflexions qu'on a pu élaborer autour de nos questions de recherche. Je souhaite également remercier, *Antoine*, *Clément*, *Denis*, *Edouard*, *Jérôme*, *Kevin*, *William* pour cette collaboration qui était plus que plaisante et les bons moments partagés.

Je remercie mes collègues au *CNAM*, au laboratoire *CEDRIC*, et du *LUTIN*. Nos discussions et nos partages m'ont été d'un grand réconfort. Ma gratitude s'adresse particulièrement à *Viviane Gal* pour toutes les questions administratives, mais notamment pour les moments d'échanges aussi plaisants qu'enrichissants. Ma reconnaissance s'adresse aussi à *Stéphanie Mader* et *Thomas Constant* pour leurs conseils de qualité et leur soutien.

J'ai eu le plaisir d'être intégrée dans l'équipe *Facteurs Humains Organisationnels*, à *SNCF Réseau*, et de travailler avec des personnes ayant de grandes qualités humaines. Je remercie *Christian Blatter*, *Christian Aucante*, *Pascal Claudel*, *Philippe Delattre*, *Adeline Pernet* et *Cécile Platini* pour leurs conseils et les forts moments plaisants passés ensemble. Je repense au début de ce travail de thèse de doctorat à *SNCF Réseau*. Je remercie *Pierre-Marie Verchère*, qui m'a initié au monde des transports et des chemins de fer, en tant que premier tuteur. Je n'oublie pas ma première équipe et mes premiers collègues, durant ce passage, qui m'a été aussi bien instructif que convivial. Je pense à *Eric*, *Christian*, *Xavier*, *Pascal*, *Isabelle*, *Joseph*, *André*, *Reynalds*, *Murielle*, et toutes les personnes que j'ai connues.

Ce projet de thèse a aussi accueilli un stage en Master 2. Je remercie *Jean-Baptiste Goupil* pour sa contribution autour de nos travaux de recherche ainsi que pour son aide précieuse dans les expérimentations menées sur terrain.

Cette thèse a été, pour moi, une vraie expérience de vie, des moments de débordement d'émotions et de recentrement envers moi-même. C'est une longue expérimentation et un long travail qui permet l'exploration de sa propre résilience face aux imprévus rencontrés durant ce long parcours. Une résilience sûrement extrapolable sur le plan personnel. A ce titre, amis et famille m'ont été d'un grand support dans cette passe. Merci à mes amis avec lesquels j'ai partagé soucis et joies en témoignage de ma fidélité. Je pense tout particulièrement à mon amie et « jumelle » *Khanla*. Je remercie également mon amie *Amel* pour son soutien précieux. Mes remerciements s'adressent aussi à *Willy*, *Zied* et *Abmed*, mes amis de longue date. Une pensée particulière pour « ma » *Christine*.

J'adresse aussi ma gratitude à des personnes formidables avec qui j'ai eu d'enrichissants moments d'échanges et de présence. Je pense particulièrement à *Luc*, *Jacqueline*, *Hervé*, *Anne*, *Inken* et *Ruben*.

J'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille en *Tunisie* et particulièrement mes parents, *Rakia* et *Brahim*. Merci pour votre soutien sans faille, d'avoir cru en moi et pour tous les efforts que vous avez consentis en ma faveur. Je remercie ma mère, pour ses encouragements, son écoute et son intérêt pour mes travaux. Je remercie également mon père, ancien doctorant et académique, pour ses relectures et ses conseils précieux. Mes remerciements s'adressent aussi à mon frère *Abmed* et ma belle sœur *Imen*, pour les bons moments passés ensemble qui m'ont permis de me ressourcer, je les remercie pour leur bienveillance, aide et encouragements. Mon amour et mes pensées vont directement à mon petit neveu, *Ehyes*, avec ses sages invitations à m'accorder des moments précieux de repos, face à sa grande curiosité du monde. Ma reconnaissance s'adresse à ma tante *Dorra*, *Ehyes* et *Lilia* qui ont su être, bien au-delà de ma famille, des amis précieux durant ce parcours. Mes pensées et affection s'adressent aussi à *Ticem* et à la petite *Elyssa* qui a rayonné le bonheur autour de nous par son arrivée. Un clin d'œil à la famille *Fourati* pour leur bienveillance et encouragements.

Je repense particulièrement au chemin parcouru depuis le début de cette thèse. Etant moi-même utilisatrice des transports en commun, j'avoue que j'ignorais à quel point il s'agit d'un système complexe, aussi bien d'un point de vue technique que social. J'avoue aussi que j'ai acquis une grande sympathie envers les passagers. Cela se traduit par un souhait profond que ce travail puisse servir, de près ou de loin, à l'amélioration de la qualité de service qui est offerte aux voyageurs. Ainsi, mes remerciements s'adressent aux personnes anonymes, aux passagers et aux habitués des gares qui ont accepté de partager leur vécu, ressenti et de s'exprimer sur leurs comportements dans les gares. Grâce à vous, il nous a été plus facile de nous imprégner dans la vie de la gare et d'en acquérir une meilleure compréhension.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, avec tous mes sentiments de reconnaissance.

## Résumé

Les travaux de cette thèse portent sur la définition et la validation d'une méthode de modélisation-simulation de foule permettant le transfert des principes et des mesures établis dans un contexte source d'observations vers des contextes cibles, non observables a priori. A partir de l'observation de comportements de piétons d'un contexte environnemental, social et urbain, notre approche consiste à inférer des règles et des motivations, rendant possible la modélisation et la simulation du comportement individuel de piétons dans ce contexte source, puis à évaluer la transférabilité du modèle dans un autre contexte cible. Nous appuyons nos travaux sur un cas réel. Il s'agit de la simulation du comportement des voyageurs (échange quai-train) entrants et sortants des trains du Réseau Express Régional dans une gare à fort trafic (situation dense). L'objectif de ce type de simulation est d'étudier entre autres les évolutions architecturales des stations qui permettent de raccourcir les temps de stationnement des trains.

Après une revue des théories, de modèles et de types de simulation, nous avons retenu une approche basée sur la simulation microscopique d'agents sociaux, situés, basée sur les motivations. Nous argumentons le choix principalement par le fait que par rapport à une simulation de foule classique elle a, a priori, l'avantage d'être plus facilement transférable.

La méthode de modélisation-simulation consiste à recueillir les éléments spatiaux du lieu d'observation et de recueil des comportements et des événements qui y sont générés en trois endroits précis correspondant à trois phases d'études : (1) sur le quai (2) dans le train (3) et à l'interface quai-train. Pour chacune de ces trois phases, est conduite une série d'observations et d'études psycho-cognitives. Pour chaque observation-étude, les données recueillies sont analysées pour décrire les comportements, les pondérer (quels sont les comportements dominants) et évaluer leur stabilité (à quel point ces comportements sont-ils dépendants du contexte ou transférables) pour aboutir à des connaissances sur les habitudes des voyageurs.

Dans un second temps, nous procédons à l'implantation de ces connaissances dans le simulateur afin de reproduire le phénomène étudié. Il est alors essentiel de vérifier la validité interne de ce modèle, ce qui requiert des analyses comparatives entre les données reproduites par la simulation et celles recueillies par les expérimentations. Ces opérations permettent d'identifier les connaissances manquantes et de calibrer le système jusqu'à la validation du modèle.

Nous nous focalisons par la suite sur le concept de transférabilité. Il s'agit d'assurer la validité et l'applicabilité des hypothèses développées en simulation pour un site de référence (première gare) sur un site ayant un contexte proche (une autre gare ou sur une modification de la première gare). Les deux gares diffèrent principalement par leurs agencements spatiaux. Enfin, nous procédons à l'analyse des critères qui semblent favoriser cette transférabilité et identifions ceux qu'il faudrait réévaluer ou définir comme données exogènes. Pour cela nous appliquons les principes et les paramètres analysés dans un contexte source et les appliquons sur un contexte cible qui est lui-même observable. Ceci nous permet de valider ou invalider les hypothèses de transférabilité. Le contexte environnemental, social et urbain source est celui de la gare de Bibliothèque François Mitterrand (en zone dense) où est observé, analysé, modélisé et simulé le comportement de ses voyageurs. Le contexte environnemental, social et urbain cible est celui de la Gare du Nord où est

simulé le comportement de ses voyageurs à partir du modèle générique obtenu par l'étude menée dans la gare source.

Mots-clés: Système multi-agents, Modèle microscopiques, Transférabilité, Approche motivationnelle, Contexte Ferroviaire.

## Abstract

This thesis focuses on the definition and the validation of a crowd-simulation modeling method. This method allows transferring principles and measurements established in a source observation context to a target one. From the observation of pedestrian behavior in a social and urban context, our approach infers rules and motivations in order to model and simulate the individual pedestrian behavior in this source context. This allows, in a second step, to evaluate the transferability of the model to a given target context. Our work is based on a real case: the simulation of the passenger's behavior entering and leaving trains (platform-train exchange) in a high-traffic station (dense situation). The goal of this type of simulation is to study the architectural evolutions of the stations able to shortened train dwell times.

Starting from the state of the art of theories, models and types of simulation, we choose an approach based on the microscopic simulation of social agent's motivation. This choice relies mainly on the fact that, compared to a classic crowd simulation, it has, a priori, a better transferability potential.

The simulation-modeling method first identifies the spatial elements of the observation site. Then it collects the behaviors and events generated at three specific locations corresponding to three phases of studies: (1) on the platform (2) in the train (3) and at the platform-train interface. For each one of the three phases, a set of psycho-cognitive observations and studies are conducted. For each observation-study, the data collected are analyzed to describe the behaviors, weighted (what are the dominant behaviors) and their stability is assessed (how context-dependent or transferable are these behaviors), with the aim of collecting knowledge about travelling habits.

In a second step, we implement this knowledge in the simulator in order to reproduce the studied phenomenon. It is then essential to verify the internal validity of this model, which requires comparative analysis of simulated and empirical data. These comparisons allow identifying missing knowledge and calibrating the system until the model is validated.

We then focus on the concept of transferability, which ensures the validity and applicability of the hypothesis developed in the simulation of a reference site (first station) to a target context (the second station). The second station can be another station of the same kind or a forecast modification of the first station. The differences between the two stations are mainly their spatial organization. Finally, we analyze the criteria that seem to favor or penalize the transferability and identify those that should be re-evaluated or defined as exogenous data. To reach this goal, we apply the principles and parameters analyzed in a source context and apply them to a target context that is itself observable. This allows us to validate or invalidate the transferability assumptions. The source context is the "François Mitterrand" station (in dense areas) where the passenger's behavior is observed, analyzed, modeled and simulated. The target context is the "Gare du Nord", where the behavior of its passengers is simulated using the generic model obtained by the study conducted at the source station.

**Keywords:** Agent-based system, Microscopic model, Transferability, Motivational Approach, Railway context.



# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>Contexte</b>	<b>33</b>
2.1	Origine du problème d'étude	33
2.2	Classification des facteurs influant sur les échanges quai-train	33
2.2.1	Où ? (cadrage spatial)	33
2.2.2	Quand ? (cadrage temporel)	33
2.2.3	Qui ? (acteurs)	34
2.2.4	Quoi ? (actions)	34
2.2.5	Comment ? (la manière)	34
2.3	La transférabilité	34
2.4	Enjeux	34
2.4.1	Cognitifs	34
2.4.2	Méthodologiques	35
2.4.3	Economiques	35
<b>3</b>	<b>État de l'art</b>	<b>37</b>
3.1	La foule	38
3.1.1	Définition	38
3.1.2	L'émergence	39
3.1.3	Méthode d'expérimentation	41
3.1.4	Caractérisation de la foule	45
3.2	Le comportement	53
3.2.1	L'émotion	53
3.2.2	Traits de personnalité	54
3.2.3	Culture	54
3.2.4	L'influence du groupe	55
3.2.5	Le stress	55
3.2.6	La motivation	56
3.3	Les recherches dans les transports	58
3.3.1	Caractéristiques techniques	58
3.3.2	Facteurs comportementaux humains influant sur le temps d'arrêt	64
3.3.3	Méthode expérimentales	72
3.3.4	Contre-mesures prises pour la fluidification	76
3.4	La transférabilité	83
3.4.1	Définition générale	83
3.4.2	Les critères vers la transférabilité	84
3.5	La modélisation et la simulation	91
3.5.1	La modélisation	91
3.6	Outils de simulation	101
3.6.1	Modèles physiques	101

3.6.2	Modèles en grille	105
3.6.3	Modèles à base d'agents	105
3.6.4	Autres outils	113
3.6.5	Discussion	113
<b>4</b>	<b><i>Problématiques et questions de recherche</i></b>	<b>115</b>
4.1	Positionnement	115
4.2	La méthode proposée	115
4.3	Validation de la méthode	118
<b>5</b>	<b><i>Expérimentations</i></b>	<b>120</b>
5.1	Choix de la première gare et contexte de l'étude	120
5.2	Observations :	121
5.2.1	Expérimentations I : Phase quai	121
5.2.2	Expérimentations II : Phase Train	144
5.2.3	Expérimentations III : Phase Quai-Train. Enregistrement vidéo des passages quai-train	175
<b>6</b>	<b><i>Modélisation et simulation</i></b>	<b>190</b>
6.1	Extraction des règles à BFM et formalisation	191
6.1.1	Extraction	191
6.1.2	Formalisation	192
6.1.3	Implémentation dans le simulateur	196
6.1.4	Calibrage du modèle à BFM - Correction de biais	198
6.1.5	Simulation et validation	202
6.2	Le transfert à Paris Nord	231
6.2.1	Le choix de la gare	231
6.2.2	Expérimentation et recueil de données	232
6.2.3	Série de simulations	243
6.2.4	Conclusion sur le transfert	267
<b>7</b>	<b><i>Analyse et discussion</i></b>	<b>276</b>
<b>8</b>	<b><i>Conclusion</i></b>	<b>281</b>
<b>9</b>	<b><i>Annexes</i></b>	<b>284</b>
<b>10</b>	<b><i>Bibliographie</i></b>	<b>311</b>

# Liste des Tableaux

Tableau 1 : Niveaux de services de Fruin en unité de densité et flux [FRU 92]	47
Tableau 2. Relations possibles entre les variables, les catégories en longueur et la description de données correspondantes	138
Tableau 3. P-value du GLM des catégories versus variables individuelles et propres au trajet, à travers le LRT ( <i>Likelihood-ratio test</i> [AGR 07]).	142
Tableau 4. P-value du GLM des catégories en longueur versus variables contextuelles	143
Tableau 5. Relations possibles entre les variables, les catégories en largeur et la description de données correspondantes	143
Tableau 6. P-value du GLM des catégories en largeur versus variables contextuelles	144
Tableau 7. Sélection du meilleur modèle selon les valeurs AIC les plus faibles	144
Tableau 8. Catégories de réponses dans le train, par véhicule	146
Tableau 9. Choix 1 selon les critères offerts par la situation	162
Tableau 10. Diverses possibilités de choix 2 en fonction du choix précédent, par type de carré.	163
Tableau 11. Les pourcentages des critères de choix, par carré	163
Tableau 12. Choix possibles depuis le remplissage 3 selon les critères de préférences	165
Tableau 13. Type de choix contraint : combinaison (Type + Sens) ou simple	166
Tableau 14. Choix 4 selon les critères offerts par la situation	166
Tableau 15. Sélection de cas des portes selon trois paramètres d'influence : Montants, occupation quai et train. En rouge, les cas doublons.	177
Tableau 16. Le nombre de déplacement d'une file à une autre et le sens des migrations	179
Tableau 17. Comptage des circulations « aisance » et « préférence »	183
Tableau 18. Comptage des circulations « aisance » et « préférence », par type de niveau	184
Tableau 19. Mesure des temps de montée et le nombre de flux selon la préférence	185
Tableau 20. Senseurs (éléments perçus de l'environnement) et actuateurs (action sur l'environnement) des agents dans SpirOps Crowd.	197
Tableau 21. Correction de divers biais des questionnaires sur le pourcentage total des catégories	199
Tableau 22. Valeurs de corrélation et p-value du ks-test pour chaque destination du top dix	208
Tableau 23. Valeurs de corrélation et p-value du ks test pour chaque destination du top dix, pour la position simulée « finale » et « voulue »	209
Tableau 24. Corrélation des valeurs Réelles et simulés (finales), et fusion des zones.	209
Tableau 25. Récapitulatif des corrélations des motivations avec les données empiriques	213
Tableau 26. Comparaison des données des circulations réelles et simulées	213
Tableau 27. Valeurs moyennes de temps de montée et descente selon la largeur de porte et la condition avec / sans Killer	220
Tableau 28. Tableau comparatif des temps moyen (s/passagers) de la littérature, des expérimentations faites à BFM et des valeurs obtenues dans la simulation	220
Tableau 29. Comparaison entre des temps de montée à BFM et en simulation	227
Tableau 30. Scénarios comparatifs de règles comportementales du conducteur. Deux missions étudiées BALI, avec un pic important de montées et DYVI avec une diminution des montées	228
Tableau 31. Récapitulatif des effets testés sur la simulation, à BFM	230
Tableau 32. Etude comparative des deux gares : BFM (RER C, sens Sud) et Paris Nord (RER D, Sens Sud et Nord)	231

<i>Tableau 33.</i> Sélection des cas uniques de portes selon trois paramètres d'influence : Montants, occupation quai et train. En rouge, les cas doublons. _____	240
<i>Tableau 34.</i> Valeurs moyennes des temps de montée et descente, selon la largeur de portes ____	241
<i>Tableau 35.</i> Comparatif entre les valeurs obtenues des temps moyens réels, de montée et de descente à BFM et à PN _____	243
<i>Tableau 36.</i> Conservation et réévaluation des paramètres endogènes et exogènes – PN - Simulation 1 _____	244
<i>Tableau 37.</i> Valeurs de corrélation et p-value du KS-test pour chaque destination du top dix, en simulé « finale » et « simulé », PN - Simulation 1 _____	247
<i>Tableau 38.</i> Corrélation des valeurs réelles et simulées, et fusion des zones, PN _____	247
<i>Tableau 39.</i> Récapitulatif des corrélations des motivations avec les données empiriques _____	250
<i>Tableau 40.</i> Comparaison des données des circulations réelles et simulées– PN Simulation 1 _	251
<i>Tableau 41.</i> La différence de pondération (représentativité) des motivations, d'un contexte à un autre (BFM versus PN). _____	257
<i>Tableau 42.</i> Conservation et réévaluation des paramètres endogènes et exogènes- PN Simulation 2 _____	258
<i>Tableau 43.</i> Valeurs de corrélation et p-value du KS-test pour chaque destination du top dix, en simulé « finale » et « réelle » - PN Simulation 2 _____	260
<i>Tableau 44.</i> Corrélation des valeurs Réelles et simulées, et fusion des zones, PN _____	261
<i>Tableau 45.</i> Récapitulatif des corrélations des motivations avec les données empiriques _____	261
<i>Tableau 46.</i> Temps de montée et de descente continus réels et simulés – PN – Simulation 2__	265
<i>Tableau 47.</i> Récapitulatif des effets testés sur la simulation, à BFM et PN Simulation 2 _____	266
<i>Tableau 48.</i> Augmentation (+) ou diminution (-) significative des motivations, selon la destination. _____	269
<i>Tableau 49.</i> Les effets marginaux et probabilité de motivation en fonction de variables individuelles et contextuelles _____	270
<i>Tableau 50.</i> Relations possibles entre les variables, les motivations de positionnement et la description de données correspondantes _____	271
<i>Tableau 51.</i> Sélection du meilleur modèle selon les valeurs AIC les plus faibles _____	271
<i>Tableau 52.</i> Les effets marginaux et probabilité de motivation en fonction de variables individuelles et contextuelles _____	271
<i>Tableau 53.</i> Augmentation (+) ou diminution (-) significative des motivations, selon la destination. _____	272
<i>Tableau 54.</i> Comparaison des distances des sorties des destinations les plus significatives, parmi les destinations du top dix _____	273

# Liste des Figures

Figure 1. Recherche expérimentale sur le comportement de marche des piétons, Hoogendoorn, Daamen & Bovy [HOO 03].	45
Figure 2. Recherche expérimentale sur le comportement de la marche et la biomécanique, Seitz et al. [SEI 14]).	45
Figure 3. Formation de lignes Hoogendoorn et Daamen [HOO 04]	48
Figure 4 .Illustration du <i>Zipper effect</i> [SEY 09]	48
Figure 5. Illustration du <i>Faster is slower effect</i> [PAS 15] (a) groupe basse compétitivité (b) groupe haute compétitivité (c) Sur l'axe X, groupes de différentes compétitivité. Sur l'axe Y moyenne de T en fonction de la compétitivité telle que T est la durée de l'évacuation.	49
Figure 6. <i>Freezing by heating effect</i> [HEL 00b] (1) Formation de lignes (b) manœuvres de dépassement (c) formation de bloc de directions différentes	50
Figure 7. Exemple de comportement grégaire lors d'une situation de panique [FOU 07]	50
Figure 8. Exemple de simulation montrant une situation de turbulence – les oscillations dans la foule sont dans des directions orthogonales à l'écoulement [GOL 14]	51
Figure 9. Raccourcis créés par les piétons [HEL 05]	51
Figure 10. Illustration du <i>shadow effect</i> (a) espaces inutilisés (b) la présence des officiers en bas à gauche, affecte la foule, laissant des espaces inutilisés [STI 00 : p152].	52
Figure 11. Disposition longitudinale (a) ou transversale (b) des sièges.	60
Figure 12. Relation entre largeur des portes et saturation du flux. Selon Fernandez et al. [FER 15], la valeur de saturation des flux de passagers (en p/s * m) croît avec la largeur des portes jusqu'à ce que celle-ci atteigne une largeur de 165 cm.	60
Figure 13. Selon la courbure de la voie, l'effet des lacunes horizontales selon les positions de portes par rapport aux bogies.	62
Figure 14. Les lacunes horizontales et verticales. © [TRA 07]	63
Figure 15. Dévers installé pour une voie en courbe [DEV 12]	63
Figure 16. Valeurs de lacune H différentes selon le type de courbure [HOR 14]	64
Figure 17. Temps de montée et de descente selon la densité à bord [FER 11]	65
Figure 18. Mesures des flux (piétons/minutes) sur l'axe X est le temps de trajet (secondes/m) sur l'axe Y. (a) présente les données pour le sens ascendant et (b) le sens descendants.	68
Figure 19. (a) Passage souterrain qui relie la station <i>Dhoby Ghaut</i> de la ligne nord-est de à la ligne nord-sud - <i>Singapour</i> (b) Brûler des calories et non de l'électricité ; affiche incitative pour la prise des escaliers – <i>New York</i>	69
Figure 20. Thompson et al. [THO 11] Facteurs d'influence sur le comportement de la foule	72
Figure 21. Moyenne de densité par organisation du véhicule [LAU 05]	73
Figure 22. Architecture hybride proposée qui augmente la capacité d'un véhicule et assure la sûreté à bord.	73
Figure 23. PAMELA - <i>Pedestrian And Movement Environment Laboratory</i> – (a) Vue de l'extérieur (b) agencement interne et externe, Fernandez [FER 11]	75
Figure 24. Recherche expérimentale sur les raisons de choix de positionnement dans le train [HIR 11]	75
Figure 25. Train de la ligne Yamanote (a) à 6 portes par véhicule (b) sièges repliés	76
Figure 26. Configuration de l'intérieur d'un véhicule (a) 2+2 et (b) 2+3	77
Figure 27. Comble-lacune (Z50000) - France	77

Figure 28. Sensibilisation par rapport à la lacune – RATP – France _____	78
Figure 29. Régulateurs de flux en gare du Nord _____	78
Figure 30. « Merci de vous répartir sur le quai » – RATP – Ligne 8 _____	79
Figure 31. Minimiser le confort siège couloir afin de maximiser l’occupation du siège milieu [BER 13] _____	79
Figure 32. Quai centraux larges (a) Autriche, Vienne – Station Flughafen Wien (b) Suisse, Zurich – Gare centrale de Zurich Ligne S10 (c) Francfort, Allemagne – gare centrale ligne S1 _____	80
Figure 33. Laisser descendre avant de monter (a) Bilbao - Ligne 1 (b) Opérateurs Nord Américains (Source: Washington Metropolitan Area Transit Authority). _____	80
Figure 34. Campagne de sensibilisation sur les préjudices de blocage de portes _____	80
Figure 35. Portes palières automatiques (a) Métro de Taipei (b) Métro de Paris ligne 13 _____	81
Figure 36. Information sur les zones desservies par le train (a) Autriche, Vienne – Station Flughafen Wien (b) Signalétique lumineuse par LED pour la problématique des trains courts sur le quai, France, Paris – Station Gare de Lyon du RER D _____	82
Figure 37. Hongrie, Budapest Station Rákóczi tér ligne 4 _____	82
Figure 38. Création de deux files, une d’attente et une autre de mouvement - Suisse, Zurich – Gare centrale de Zurich _____	82
Figure 39. La question de la validité est cumulative [TRO 01 : p31] _____	85
Figure 40. Capture d’écran de l’outil SimWalk _____	101
Figure 41. Simulation de PTV VisWalk et VISSIM. Vue de dessus des échanges quai-train (Source : Youtube) _____	102
Figure 42. Simulation de RBAS _____	103
Figure 43. Capture d’écran d’une simulation de Legion [LEG][MAN] _____	104
Figure 44. Capture d’écran d’une simulation multi-agents de Myriad II _____	104
Figure 45. Capture d’écran d’une simulation d’EXODUS _____	105
Figure 46. Capture d’écran d’une simulation de foule de Mass Motion au terminal de Transbay à San Francisco [CHA 09][ARU] _____	106
Figure 47. Simulation d’une station de Métro tirée de l’outil SIMULATE _____	107
Figure 48. Simulation de passagers montants et descendants du train dans SimTRap _____	108
Figure 49. Capture d’écran d’une simulation du niveau de politesse des passagers - GOLAE [SOU 11] _____	108
Figure 50. Simulation 3D de SIMULEM. (a) vue libre (b) vue de dessus _____	109
Figure 51. Modèle DirectIA dans une gare. La motivation de l’agent est satisfaite pour les agents en bleu, non satisfaite pour les agents en rouge _____	110
Figure 52. Simulation de SpirOps montrant le système de navigation à trois couches, le chemin A* (en rouge), le Platter Lift (en blanc), et l’évitement des obstacles (flèche bleue) _____	111
Figure 53. Comportement des personnes dans un bidonville dans Massive (Auteur : Andres Herzog). _____	112
Figure 54. (a) Comptage quai AB, BFM, sens Nord, JOB, 2017 (b) Comptage quai EF, BFM, Sens Sud, JOB, 2017 (Source : Comptage SNCF Transilien) _____	121
Figure 55. Identification des 12 zones sur le quai EF _____	122
Figure 56. Catégories de réponses sur la distribution longitudinale des passagers _____	124
Figure 57. Évolution des catégories de positionnement en longueur par zone _____	124
Figure 58. Répartition des catégories en longueur sur le quai de BFM _____	125
Figure 59. Répartition des sous-catégories « Quai » de BFM _____	125

Figure 60. Répartition des catégories en longueur sur le quai de BFM _____	126
Figure 61. Répartition des catégories en longueur sur le quai de BFM _____	126
Figure 62. Répartition des catégories en largeur sur le quai de BFM _____	127
Figure 63. Répartition des catégories en largeur, entre les deux voies E et F _____	127
Figure 64. Analyse factorielle des correspondances entre les catégories « longueur » et « largeur » _____	128
Figure 65. Intérieur d'une NAT, les véhicules d'une rame sont communiquant _____	129
Figure 66. (a) Comptage par entrée (b) corrélation entre les pourcentages de comptage par entrée et l'occurrence de la catégorie « Entrée » _____	131
Figure 67. Lunettes enregistreuses vidéo _____	132
Figure 68. Densité de personnes versus distribution de la sous-catégorie « <i>Quai- Moins de monde</i> », par zone. _____	132
Figure 69. Ré-échantillonnage en 16 zones du quai de BFM. _____	134
Figure 70. Densité dans le train versus catégorie « <i>Train</i> » _____	134
Figure 71. Lien entre la catégorie « <i>Train</i> » et le nombre montants, descendants, densité train et densité quai. _____	136
Figure 72. Représentativité des dix destinations des catégories « <i>arrivée</i> » par rapport au total des catégories « <i>arrivée</i> » _____	137
Figure 73. Le regroupement des passagers en fonction des <i>habitués</i> et des déplacements <i>individuels</i> , avec une légère prédominance de la stratégie « <i>Quai</i> » dans tous les regroupements non habitués et habitués / groupes. _____	139
Figure 74. Pour les habitués et non habitués, les voyageurs avec stratégie « <i>Entrée</i> » ont des temps de trajet plus réduits. _____	140
Figure 75. Pour les voyageurs avec une stratégie « <i>Train</i> » une moyenne d'âge augmentée et un écart-type plus réduit que pour les autres stratégies. Nous relevons aussi une légère réduction de cette stratégie en fonction du temps de trajet (axe x) _____	141
Figure 76. Les stratégies pour chaque intervalle de minutes. _____	141
Figure 77. Regroupement autour d' <i>habitué</i> et <i>maison</i> avec une prédominance de la stratégie « <i>Arrivée</i> » pour cette combinaison _____	142
Figure 78. Positionnement des personnes interrogées de la Voiture 16 de type Z8800 avec une disposition de sièges de 2+3. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan _____	148
Figure 79. Calcul de l'effort selon la porte empruntée et la rangée du siège. _____	150
Figure 80. Positionnement des personnes interrogées de la voiture 2 de type Z20900 avec une disposition de sièges de 2+2. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan _____	151
Figure 81. Remplissage des rangées des niveaux bas et haut, par taux de remplissage _____	152
Figure 82. Pourcentage de remplissage des sièges assis en fonction de l'évolution du pourcentage du remplissage des sièges du type « <i>sens de la marche : oui</i> » et « <i>contre sens de la marche : non</i> » _____	154
Figure 83. Pourcentage de remplissage des sièges assis en fonction de l'évolution du pourcentage du remplissage des sièges du type « <i>Fenêtre, Couloir, Milieu et Solo</i> » _____	154
Figure 84. Pourcentage de remplissage des sièges assis en fonction de l'évolution du pourcentage du remplissage des étages « <i>Bas et Haut</i> » _____	157

<i>Figure 85.</i> Pourcentage de remplissage des capacités respectives « assis » et « debout » en fonction de l'évolution des pourcentages des remplissages des trains (participations) _____	158
<i>Figure 86.</i> Pourcentage de remplissage des capacités respectives « assis » et « debout » en fonction de l'évolution des pourcentages des remplissages des trains (participations), par temps de trajet. _____	159
<i>Figure 87.</i> Mesure de l'effort (axe X) en boîte à moustaches, par type de sièges et en fonction de l'évolution du taux de remplissage des places assises (axe Y). _____	160
<i>Figure 88.</i> Carrée de (a) 4 et de (b) 6 _____	160
<i>Figure 89.</i> Possibilité de combinaison d'enchaînement des choix (24 possibilités) _____	161
<i>Figure 90.</i> Fréquence des chaînes de choix de positionnement dans un carré _____	162
<i>Figure 91.</i> Exemple d'enchaînement des choix dans un carré de quatre places _____	162
<i>Figure 92.</i> Choix possibles pour le remplissage 3 _____	164
<i>Figure 93.</i> Motivations exprimées de positionnement à l'intérieur du train _____	167
<i>Figure 94.</i> Motivations de positionnement dans le train selon les taux de remplissage _____	168
<i>Figure 95.</i> Assis et debout qui rapporte le caractère court du temps de trajet influant sur leurs choix _____	169
<i>Figure 96.</i> Choix de rangée pour les usagers « assis » argumentant leur choix en fonction du temps de trajet court _____	169
<i>Figure 97.</i> Les termes utilisés pour désigner les accès _____	171
<i>Figure 98.</i> Critères de choix selon les propriétés des sièges assis _____	172
<i>Figure 99.</i> Critères de choix de sièges assis selon ce que cela engendre en termes de contact _____	172
<i>Figure 100.</i> Inversement des préférences pour les niveaux de remplissage des sièges (80,100] qui bascule de « Fenêtre » vers « Couloir » _____	173
<i>Figure 101.</i> Très léger effet d'inversement des préférences pour la ZRAB- Z20900 _____	174
<i>Figure 102.</i> Dispositif d'enregistrement vidéo aux interfaces quai-train _____	176
<i>Figure 103.</i> Exemple de prise de vue fournie par l'opérateur situé dans le train : l'opérateur quai en train de filmer les événements des passages quai-train _____	177
<i>Figure 104.</i> Normes contextuelles – Laisser descendre avant de monter _____	178
<i>Figure 105.</i> Régulation des déséquilibres quantitatifs entre files - Déplacement d'une personne du flux de droite (a) vers le flux de gauche (b) _____	179
<i>Figure 106.</i> Déséquilibre quantitatif entre files – possible lien avec la provenance des flux conditionnée par la direction des escaliers _____	180
<i>Figure 107.</i> Non-respect de l'enchaînement Descente-Montée _____	181
<i>Figure 108.</i> Descente latérale _____	181
<i>Figure 109.</i> Retour en arrière des flux afin d'atteindre l'intérieur du train _____	182
<i>Figure 110.</i> Scénario 1 : Trajet des flux selon l'aisance _____	182
<i>Figure 111.</i> Scénario 2 : Trajet des flux selon la préférence (gris) _____	183
<i>Figure 112.</i> Scénario 3 : Trajet des flux selon l'aisance (rouge) + préférences (gris) _____	183
<i>Figure 113.</i> Variation du temps de montée en fonction de (a) nombre de préférence (b) nombre de montants _____	186
<i>Figure 114.</i> Positionnement du train par rapport au quai et quelques valeurs de nombre des montants et de temps de montée total _____	187
<i>Figure 115.</i> Provenances des flux du niveau -2 et 0 vers et le niveau -1 (quai). L'encadré en pointillés bleu correspond à peu près au quai EF en dessous. _____	191
<i>Figure 116.</i> Notion de l'espace personnel dans SpirOps Crowd _____	195

Figure 117. Déséquilibre quantitatif entre le nombre des questionnaires par zone, en lien avec la baisse de densité par zone.	198
Figure 118. Matrice illustrant la correction statistique sur les motivations par rapport au nombre de questionnaires et selon la densité, par zone.	199
Figure 119. Répartition de la stratégie sur tout le quai : le total pour chaque graphe fait 100%.	199
Figure 120. Diminution de l'écart entre les valeurs d'entrée au simulateur et des valeurs de sorties (a) Valeurs catégories avant correction questionnaires vs valeurs simulées (b) Valeurs catégories après corrections des biais vs valeurs simulées	200
Figure 121. Différence entre les pourcentages destinations recueillis dans le questionnaire par rapport à la simulation	200
Figure 122. (a) fréquence des missions de 17h à 20h (b) nombre de destinations desservies, par mission	201
Figure 123. Matrice illustrant la correction statistique sur les destinations par rapport aux nombres de questionnaires par destination et de la fréquence de desserte.	201
Figure 124. Différence après correction du biais entre les pourcentages destinations recueillis dans le questionnaire par rapport à la simulation	202
Figure 125. Comptages aux entrées réel versus simulé	203
Figure 126. Variabilité des motivations selon plusieurs instants T, BFM	204
Figure 127. Etude des variabilités des échantillons de la motivation « Arrivée » selon l'évolution temporelle	205
Figure 128. (a) Forte corrélation ( $r > 0.5$ et $p\text{-value} < 0.05$ ) avec la moyenne, (b) Différence significative ( $p < 0.05$ ) selon le test de Kolmogorov-Smirnov	206
Figure 129. Comparaison des répartitions de la motivation « Arrivée » par zone, par destination.	206
Figure 130. Cumul des répartitions par zone par destination, afin d'aboutir au cumul du top dix réel et simulé	206
Figure 131. Contribution des destinations du top dix dans le cumul de la motivation « Arrivée » dans le réel et le simulée « final »	207
Figure 132. Contribution des destinations du top dix dans le cumul de la motivation « Arrivée » dans le simulée « final » et « voulue »	209
Figure 133. Etude des variabilités des échantillons de la motivation « Entrées » selon l'évolution temporelle	210
Figure 134. Comparaison des répartitions de la motivation « Entrée » par zone	210
Figure 135. Comparaison des comptages réel et simulé par entrée, avec les motivations « Entrées »	211
Figure 136. Etude des variabilités des échantillons de la motivation « Moins de monde » selon l'évolution temporelle	211
Figure 137. Comparaison des répartitions de la motivation « Moins de monde » par zone	212
Figure 138. Etude de la variabilité des échantillons de la motivation « Train » selon l'évolution temporelle	212
Figure 139. Comparaison de la densité finale Réelle avec la densité simulée des positions « finales » (a), et des positions « voulues » (b)	213
Figure 140. Circulation des trains et le nombre de montants / descendants par train	214
Figure 141. Formation de lignes – vue de dessus - SpirOps Crowd	215
Figure 142. Le Zipper Effect –vue de dessus - SpirOps Crowd	215

Figure 143. <i>Shadow effect</i> –vue de dessus - SpirOps Crowd _____	215
Figure 144. Position des portes, BFM _____	216
Figure 145. Flux montants et descendants, par porte, BFM _____	216
Figure 146. Variabilité des quantités des montants et descendants par porte _____	217
Figure 147. Rapprochement des agents des portes lors de la décélération et réajustement lors de l'arrêt du train _____	218
Figure 148. Positionnement en « <i>V inversé</i> » pour laisser descendre _____	218
Figure 149. Valeurs moyennes de temps (s/passager) de « <i>montée</i> » et « <i>descente</i> » selon deux largeurs de portes (1300 mm et 1800 mm), en simulation _____	219
Figure 150. Valeurs moyennes de temps (s/passager) de « <i>montée</i> » selon deux largeurs de portes (1300 mm et 1800 mm) et deux conditions « <i>Avec Killer</i> » et « <i>Sans Killer</i> », en simulation _____	219
Figure 151. Capacité des portes de différentes largeurs et parallélisation des flux _____	220
Figure 152. Anticipation des descentes _____	221
Figure 153. Les descendants contournent les montants qui sont de part et d'autre des portes _	222
Figure 154. Temps de montée et de descente, par porte _____	223
Figure 155. Temps de montée et nombre, par porte (1,16) par échantillon. _____	224
Figure 156. Flux continu suivi de montées dispersées (sporadique), Porte 8 échantillons 21 _	224
Figure 157. Sélection des flux exclusivement continus (moins de 3 secondes de séparation entre deux personnes) _____	225
Figure 158. Position des portes, par rapport aux entrées et leurs directions - BFM _____	227
Figure 159. Identification de quatorze zones sur le quai 42/44 du RER D _____	233
Figure 160. Motivations de positionnement sur le quai de RER D de Paris Nord _____	233
Figure 161. Evolution des motivations tout au long du quai de PN _____	234
Figure 162. Comptages aux entrées du quai 42/44 (a) Comptage aux entrées (b) Comptages versus motivations « <i>Entrée</i> » _____	235
Figure 163. Densité sur le quai et la motivation « <i>Moins de monde</i> » _____	237
Figure 164. Densité dans le train et la motivation « <i>Train</i> » _____	238
Figure 165. Montants, descendants, charge quai et train et motivation « <i>Train</i> » _____	239
Figure 166. Variabilité des temps moyens par porte, de montants (a) et des descendants (b) _	242
Figure 167. Variation du temps de montée en fonction (a) du nombre de montants et (b) de descente en fonction du nombre de descendants _____	242
Figure 168. Comptage aux entrées, données réelles et simulée, PN - Simulation 1 _____	245
Figure 169. Variabilité des motivations selon plusieurs instants T, Paris nord, PN - Simulation 1 _____	245
Figure 170. Comparaison des répartitions de la motivation « <i>Arrivée</i> » par zone. Réelle versus simulée – <i>position finale</i> , PN - Simulation 1 _____	247
Figure 171. Comparaison des répartitions de la motivation « <i>Entrée</i> » par zone, PN - Simulation 1 _____	248
Figure 172. Comparaison des comptages réels et simulés sur toutes les zones (a) et par la zone d'entrée (b), avec les motivations « <i>Entrées</i> », PN - Simulation 1 _____	248
Figure 173. Comparaison des comptages réel et simulé par entrée, avec les motivations « <i>Moins de monde</i> », PN - Simulation 1 _____	249
Figure 174. Comparaison de la densité finale Réelle avec la densité simulée des positions « <i>finales</i> » (a), et des positions « <i>voulues</i> » (b) - PN - Simulation 1 _____	250
Figure 175. Circulation des trains et le nombre de montants / descendants par train _____	251

Figure 176. Position des portes, PN – Quai 42/44, vue de dessus _____	252
Figure 177. Flux montants et descendants, par porte, BFM _____	252
Figure 178. Variabilité des quantités des montants et descendants par porte _____	253
Figure 179. Temps de montée et de descente, par porte, PN Simulation 1 _____	253
Figure 180. Temps de montée et nombre, par porte (1,20) par échantillon. _____	254
Figure 181. Sélection des flux exclusivement continus (moins de 3 secondes de séparation entre deux personnes) _____	255
Figure 182. Position des portes, par rapport aux entrées et leurs directions - PN _____	256
Figure 183. Comparaison des répartitions de la motivation « Arrivée » par zone. Réel versus simulée – position finale – PN Simulation 2 _____	260
Figure 184. Comparaison de la densité finale Réelle avec la densité simulée des positions « finales » (a), et des positions « voulues » (b), PN Simulation 2 _____	261
Figure 185. Flux montants et descendants, par porte, PN Simulation 2 _____	262
Figure 186. Préférence selon la sortie pour certaines destinations et impact sur le nombre de montants en simulé - PN Simulation 2 _____	263
Figure 187. Variabilité des quantités des montants et descendants par porte, PN Simulation 2 _____	263
Figure 188. Temps de montée et de descente, par porte, PN Simulation 2 _____	264
Figure 189. Sélection des flux exclusivement continus (moins de 3 secondes de séparation entre deux personnes) - PN Simulation 2 _____	264
Figure 190. Variabilité des motivations, selon la destination. BFM. _____	268
Figure 191. Variabilité des motivations, selon la destination. BFM. _____	270
Figure 192. Retro-transférabilité et amélioration du modèle du contexte source et cible, à la fois _____	277
Figure 193. Matrice des mouvements des usagers des entrées vers les zones de positionnement _____	278

## Annexe : Liste de Figures

Figure Annexe 1. Hauteur et espacement pour personnes comprenant des personnes ayant des déficiences visuelles et motrices. « n » est le nombre de participants dans le groupe, « t » est le temps médian en secondes pour le groupe de personnes pour monter et descendre, « s » est le pourcentage de participants qui se sentent en danger, « e » est le pourcentage des personnes nécessitant un effort exceptionnel, « dnc » est le nombre de participants, en plus de « n » qui ont tenté et ne sont pas parvenu à terminer la tâche. _____	284
Figure Annexe 2. Mesures des temps de montée et de descente selon trois paramètres d'influence : Hauteur de la lacune, largeur de la porte et la manière de paiement (à bord ou prépayé) _____	285
Figure Annexe 3. La ligne du RER C ; Directions, branches et dessertes _____	285
Figure Annexe 4. Questionnaire A sur les motivations de positionnement des passagers sur le quai _____	286
Figure Annexe 5. Top dix des destinations les plus empruntées à BFM _____	287
Figure Annexe 6. Situer les sorties destination sur le quai BFM. Exemple : Mesures sur Ivry sur seine, une seule sortie à 204 mètres du TT. La position de la sortie (zone blanche). L'emplacement exact (point blanc). Position du TT à BFM (point rouge) _____	287
Figure Annexe 7. Position des sorties du top dix des destinations les plus empruntées _____	288

<i>Figure Annexe 8.</i> Questionnaire B sur les motivations de positionnement des passagers dans le train	289
<i>Figure Annexe 9.</i> Top dix des destinations les plus empruntées à BFM, dans les trois premiers véhicules du train.	290
<i>Figure Annexe 10.</i> Positionnement des personnes interrogées des voitures 1,2 et 3 de type Z8800 avec une disposition de sièges de 2+3. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan	290
<i>Figure Annexe 11.</i> Positionnement des personnes interrogées des voitures 1,2 et 3 de type Z20900 avec une disposition de sièges de 2+2. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan	291
<i>Figure Annexe 12.</i> Positionnement des personnes interrogées des voitures courtes et longue de type 2+3 et 2+2. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan.	291
<i>Figure Annexe 13.</i> Questionnaire C sur les motivations de positionnement des passagers dans le train	292
<i>Figure Annexe 14.</i> Remplissage des rangées par étage, par taux de remplissage, par matériel roulant	294
<i>Figure Annexe 15.</i> Les 24 différentes possibilités d'enchaînement de choix dans un carré de 4 places.	295
<i>Figure Annexe 16.</i> Questionnaire sur les motivations de positionnement des passagers sur les quais 42/44 de PN	296
<i>Figure Annexe 17.</i> Temps de montée et nombre, par porte (1,16) par échantillon, BFM.	297
<i>Figure Annexe 18.</i> La ligne du RER D ; Directions, branches et dessertes	298
<i>Figure Annexe 19.</i> Parseur XML pour l'exploitation de données de rames compteuses	298
<i>Figure Annexe 20.</i> Temps de montée et nombre, par porte (1,20) par échantillon.	299
<i>Figure Annexe 21.</i> Récapitulatif des distributions des motivations en position « finale » et « voulue » - Simulation 2 - PN	300

## Annexe : Liste des Tableaux

<i>Tableau Annexe 1.</i> Différentes combinaisons et longueurs Motrices (M) et Remorques (R) Selon le type et l'ordre des combinaisons, cela génère des emplacements différents des portes sur le quai	301
<i>Tableau Annexe 2.</i> Sélection des missions : Elimination des missions courtes (JILL) et les trains courts à 6 Voitures (CIME, CITY)	301
<i>Tableau Annexe 3.</i> Différentes capacités de place assises, par type de voiture	301
<i>Tableau Annexe 4.</i> Différentes capacités de place assises, par type de matériel roulant, par étage, par type de véhicule (Motrice = Court, Remorque= Longue)	302
<i>Tableau Annexe 5.</i> Différentes combinaisons et capacités de place assises, par type de matériel roulant	302
<i>Tableau Annexe 6.</i> Catégorisation des portes à BFM selon les paramètres d'influence (occupation quai, occupation train, nb montants)	303
<i>Tableau Annexe 7.</i> Type de rame pouvant se combiner entre elles. 9 combinaison et longueurs différentes. Différences maximale = 10.6m	303

<i>Tableau Annexe 8.</i> Catégorisation des portes à PN selon les paramètres d'influence (occupation quai, occupation train, nb montants) _____	304
<i>Tableau Annexe 9.</i> Résultats du post-hoc significatifs contrastant plusieurs portes avec les valeurs de pentes (Estimate) – BFM _____	305
<i>Tableau Annexe 10.</i> Résultats du post-hoc significatifs contrastant plusieurs portes avec les valeurs de pentes (Estimate) - PN _____	305
<i>Tableau Annexe 11.</i> Récapitulatif des effets significatifs des analyses de positionnement par rapport à la distance par rapport aux portes _____	307
<i>Tableau Annexe 12.</i> Récapitulatif des effets significatifs des analyses de choix par type de siège / étage et comportement assis et debout par rapport aux variables individuelles et contextuelles _____	308
<i>Tableau Annexe 13.</i> Récapitulatif des effets significatifs des analyses de l'effort par rapport aux taux de remplissages, type de siège et variables individuelles et contextuelles _____	308
<i>Tableau Annexe 14.</i> Récapitulatif des effets significatifs des comptages par carrée en fonction de type de siège, sens et contact induit _____	308
<i>Tableau Annexe 15.</i> Récapitulatif des motivations exprimées par rapport au taux de remplissage, états, temps de trajet et étage _____	309

# Introduction générale

# 1 Introduction générale

## Origine de la thèse

Nos travaux de thèse sont issus d'un sujet qui préoccupe les entreprises de transport ferroviaire : la maîtrise des temps d'arrêts des trains à quai. Pour les lignes constituées de gares avec un flux de voyageurs très important, il est crucial de maîtriser les temps d'arrêts des trains afin de garantir la ponctualité de ces derniers et donc la régularité du plan de transport. On définit le temps d'arrêt en gare comme étant la durée d'immobilisation du train pour permettre la descente et la montée des voyageurs [HUT 13].

Le fait de maîtriser les temps d'arrêt est un des facteurs qui permet d'augmenter le débit sur les lignes où il devient impossible de jouer uniquement sur des facteurs techniques. Peut-on diminuer les temps d'arrêt en reconfigurant une gare ?

Répondre à cette question n'est pas une tâche aisée parce que les facteurs qui déterminent les temps d'arrêt sont non seulement de natures diverses, mais il existe entre eux des interactions plus ou moins importantes qui peuvent contribuer fortement aux variations du temps d'arrêt. Ces divers facteurs peuvent être objectifs, tels que l'infrastructure du - train et quai - et la densité de voyageurs, mais aussi subjectifs qui déterminent les comportements individuels des personnes et le comportement collectif de groupes.

Il s'agit donc de prédire les effets de l'interaction « voyageurs – environnement » et « voyageurs – voyageurs » et son impact sur le temps d'arrêt des trains à quai. Pour la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), ces travaux vont permettre d'imaginer de nouvelles configurations des espaces comme l'architecture des quais, l'agencement de l'intérieur des trains ainsi que les caractéristiques de l'interface quai-train. Ces environnements conçus et étudiés par les urbanistes, les ergonomes et les constructeurs, tiennent compte des contraintes d'adaptabilité à la population, de faisabilité technique, ainsi que des contraintes économiques. De plus, cela doit permettre de bâtir une stratégie de gestion de foule basée sur des principes et des méthodes scientifiquement validés. L'entreprise devrait pouvoir mieux contrôler les temps d'arrêts, considérés dans la littérature comme une variable déterminante de la performance, de la fiabilité et de la qualité des services proposés [PUO 00] [HUT 13] [FER 15].

La problématique d'échanges quai-train peut être considérée comme un questionnement propre au contexte ferroviaire qui fait intervenir un agencement spatial spécifique et des objectifs relatifs aux services offerts. Néanmoins, s'agissant de zones où les voyageurs sont nombreux (zones denses), elle relève de l'analyse du comportement d'un rassemblement de personnes en interaction permanente dans un même espace public. A cet égard, la problématique s'inscrit dans la problématique générale d'études de l'analyse comportementale de la foule [ZHA 08] [FRU 92].

En revenant à la méthodologie à développer, elle doit reposer sur une base de connaissances exploitable dans plusieurs gares c'est-à-dire dans plusieurs contextes ferroviaires voisins. On demande donc à cette méthode de montrer un haut degré de flexibilité et d'adaptabilité.

Dans la pratique, il s'agit de partir d'un modèle et des données quantitatives et qualitatives mesurées et validées dans un contexte source pour les exploiter dans un contexte cible voisin de

celui du contexte source. Par conséquent, nous utilisons le terme transférabilité [LIN 85] qui est le plus adapté à cette problématique.

### **Méthode d'analyse du comportement et transférabilité d'un modèle de simulation**

Il existe plusieurs manières de recueillir les connaissances scientifiques sur la foule et de tester leur validité. Tout d'abord, il est essentiel de souligner qu'il est très difficile de mener en situation réelle des expérimentations, car il s'agit de manipulations très coûteuses et qui risquent de provoquer des dysfonctionnements dont les plus redoutables sont les turbulences et les mouvements de panique [HEL 07].

Il existe des méthodes d'analyse de comportements plus sûres et moins coûteuses. Par exemple, on identifie dans la littérature des modèles à échelle réelle qui consistent à reproduire l'architecture de l'environnement étudié et de recruter des personnes pour s'y déplacer le plus naturellement possible [FER 15] ou d'autres méthodes qui se basent sur des observations en milieu naturel et l'incorporation des connaissances dans un modèle d'étude. La modélisation et la simulation des personnes permettent de construire un environnement virtuel conforme au milieu réel et d'y faire autant d'expérimentations que nécessaire.

On relève trois échelles de modélisation dans la littérature : d'abord, les approches macroscopiques qui représentent le comportement global de la foule comme une entité en faisant souvent l'analogie avec la dynamique des fluides [HEN 74]. Ensuite l'échelle microscopique [ZHA 09] qui traite chaque individu dans le modèle comme une entité unique avec des objectifs et caractéristiques comportementales propres ainsi que les interactions entre ces entités. Enfin, l'échelle mésoscopique qui constitue une approche hybride entre les deux autres échelles déjà citées [TEK 07].

L'apparition de ces échelles semble être en lien avec le niveau de finesse des résultats attendu de la modélisation. Partant sur l'étude des comportements individuels, les approches microscopiques semblent offrir le niveau de finesse adéquat pour notre étude.

Dans les approches microscopiques de simulations, on en distingue plusieurs qui offrent divers avantages et inconvénients. Des automates cellulaires qui simplifient la problématique de l'obtention des informations des espaces avoisinants [CON 70] aux Modèles de Forces Sociales (MFS) qui représentent l'individu comme soumis à des forces même s'agissant de ses propres désirs et buts [HEL 95]. On distingue aussi les modèles multi-agents [MAC 10] [ZIB 07 16][SAL 09], qui semblent être les plus adaptés et les plus utilisés pour la représentation des phénomènes sociaux et des comportements individuels [BOE 15].

L'analyse des comportements requiert de mettre en lien les variables du modèle avec ces comportements. De ce point de vue, l'analyse comportementale fait appel à une multitude d'approches comme par exemple, les facteurs qui relèvent des émotions [LAZ 91], des traits de personnalité [WOR 76], de la culture [PON 06], de la physiologie de la personne, et bien d'autres. Cela peut être très intéressant dans l'explication de certains comportements, mais il s'agit fondamentalement d'approches différentes et de niveaux de précisions distincts. Nous nous orientons vers une approche qui unifie la forme d'analyse du comportement et qui nous affranchit du carcan des origines profondes des comportements [CAR 08]. En effet, l'approche motivationnelle permet une vision qui lie les causes plus ou moins immédiates et de s'affranchir de la question de l'origine « ultime et profonde » de la motivation, non essentielle à notre

problématique. La formalisation des comportements sous forme de liens de cause à effet, permet d'avoir une meilleure connaissance scientifique du phénomène et des dépendances entre ses variables ; ce qui permet de favoriser la transférabilité vers un contexte cible.

Nos travaux ont pour but de produire une simulation valide depuis un contexte source et qu'il est possible de la transférer vers un contexte cible congruent. Le choix d'une approche qui permet une représentation à la fois détaillée (approche microscopiques) et économique (approche motivationnelle) des règles comportementales est une des bases de cette transférabilité. Dans cette thèse, qui a pour objectif de définir et de valider une certaine méthode, nous partons de deux contextes existants : c'est-à-dire deux gares de la SNCF. Le contexte source est celui de la gare *Bibliothèque François Mitterrand* et le contexte cible est celui de la gare *Paris Nord*. Disposant de deux contextes observables, nous procédons à l'analyse des critères qui semblent favoriser la transférabilité et identifions ceux qu'il faudrait réévaluer ou définir comme paramètres d'entrée. Ceci nous permet de valider ou invalider les hypothèses de transférabilité.

### **Organisation de la thèse**

Cette thèse part donc d'un sujet ferroviaire concret pour concevoir et valider une méthode générique de modélisation-simulation de piétons qui permet sa transférabilité d'un contexte source d'observations vers un contexte cible. A partir de l'observation de comportements de piétons, notre approche consiste à inférer les règles et les motivations individuelles. Ceci permet de modéliser puis de simuler le comportement individuel de piétons dans un contexte source donné. Nous évaluons ensuite la transférabilité du modèle dans un autre contexte cible. Nous optons pour une simulation microscopique afin de reproduire la finesse des comportements individuels qui se produisent dans un cadre spatio-temporel restreint. L'approche multi-agents permet de mieux capturer les phénomènes sociaux impliqués. Et enfin, l'approche motivationnelle nous permet de disposer d'une forme spécifique, robuste et plus transférable des comportements.

Cette thèse est organisée de la façon suivante : le premier chapitre est consacré à une présentation contextualisée du problème posé par la SNCF. Le second chapitre est un état de l'art portant sur les notions de foule, de comportement, les recherches sur les problèmes de transport proprement dit, la notion de transférabilité et les modèles de simulation. La problématique de notre recherche est exposée au chapitre quatre, le chapitre cinq présente les expériences menées. Le modèle de simulation est développé au chapitre six. Après une analyse des résultats obtenus nous concluons nos travaux.

# Contexte

## 2 Contexte

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte dans lequel nos travaux s'inscrivent. Nous définissons la problématique pratique qui est à l'origine de notre recherche et exposons les divers enjeux soulevés à travers la littérature.

Dans cette section, nous définissons en détail la problématique, puis nous procédons à la classification des facteurs influant sur les échanges quai-train. Ensuite, nous présentons le concept de la transférabilité pour notre cas d'étude. Enfin, nous évoquons plusieurs idées reçues sur le sujet.

### 2.1 Origine du problème d'étude

L'origine de ce travail, provient d'un des enjeux cruciaux pour les entreprises ferroviaires : minimiser le temps d'arrêt des trains en gare pour permettre une régularité de transport et ceci en toute sécurité. Nous définissons le temps d'arrêt en gare comme étant la durée d'immobilisation du train pour permettre l'échange de passagers, montants et descendants. Ce problème dépend essentiellement du comportement des usagers des transports en commun lors des échanges quai-train. La maîtrise du temps d'arrêt n'est pas une tâche aisée car les facteurs qui influent sur ces temps sont d'une part de nature diverse et d'autre part interagissent entre eux. Il peut s'agir de facteurs objectifs, tels l'infrastructure train – quai et la densité d'usagers, mais également, s'agissant de personnes, de facteurs subjectifs individuels ou collectifs. En interagissant avec les facteurs objectifs, certains comportements peuvent également contribuer fortement aux variations du temps d'arrêt. Or, ce que nous cherchons à connaître n'est pas la quantification d'une situation observable, mais la prédiction du temps d'arrêt dans une configuration à construire pour diminuer ce temps. Il s'agit donc, de prédire les effets de l'interaction voyageurs – environnement et son impact sur le temps d'arrêt des trains à quai.

### 2.2 Classification des facteurs influant sur les échanges quai-train

Ces échanges se produisent dans un espace-temps spécifique. L'environnement est agencé d'une manière bien spécifique et les personnes s'y trouvant sont guidées par des buts généraux et propres à chaque individu. Ceci permet une classification générale des facteurs d'influence.

#### 2.2.1 Où ? (cadrage spatial)

L'étude des échanges quai-train implique :(i) l'étude des événements sur le quai produisant une migration vers (ii) un autre espace le train (dès son arrivée) et (iii) l'association quai et train créée ainsi l'interface quai-train. Nous retenons donc trois cadres spatiaux (i) Quai (ii) Train (iii) Interface quai-train.

#### 2.2.2 Quand ? (cadrage temporel)

La perte de la maîtrise des temps d'arrêt est souvent observée aux heures de pointe [PUO 00]. Pour notre simulation, une heure peut être qualifiée de pointe en fonction d'une part de la fréquence d'apparition de certains événements : telle que l'arrivée des trains et d'autre part de la densité de voyageurs transitant dans une gare. On identifie donc trois cadres temporels

microscopiques définis par les événements qui peuvent survenir : (i) avant l'arrivée du train (quai, train), (ii) à l'arrivée du train (quai, train) et (iii) durant l'ouverture des portes (quai, train, interfaces)

### **2.2.3 Qui ? (acteurs)**

Les acteurs sont des usagers de la ligne étudiée qui peuvent être soit des montants, soit des descendants.

### **2.2.4 Quoi ? (actions)**

Les montants ou descendants peuvent être en attente ou en mouvement dans les deux cadres « quai » et « train ». Pour le cadre « interface », les personnes sont en mouvements rapides afin d'atteindre le « quai » ou le « train ». Les actions d'un voyageur sont motivées par un objectif comme attendre le train près de la localisation d'une porte, dans un coin tranquille sur le quai, en fonction de la sortie dans la gare de destination.

### **2.2.5 Comment ? (la manière)**

Nous connaissons les grands axes d'action (i.e. attente du train, monter ou descendre du train, etc.), nous ne disposons cependant pas de connaissances sur la manière exacte dont l'action est faite, hormis les apports de quelques études qui sont discutées dans l'état de l'art sur la foule (page 38) et les transports (page 58). Il est néanmoins clair que cette action est d'une part basée sur un but et d'autre part sur des interactions entre les comportements individuels (comme être le premier dans la rame) et collectifs (éviter de se faire bousculer par exemple). En définitive, le comment résulte d'un enchaînement d'actions déterminées par l'objectif final du voyageur.

## **2.3 La transférabilité**

Etudier le comportement des voyageurs en gare ne présente, dans notre cas, un intérêt que si les résultats sont transférables dans un contexte modifié, voire inexistant.

Selon la définition de Lincoln et Guba [LIN 85], la transférabilité consiste en l'étude de l'applicabilité des résultats d'une étude de recherche à d'autres contextes, situations, moments et populations.

L'objectif de l'étude menée dans cette thèse n'est pas de fournir des connaissances transférables à toutes les gares, mais plutôt entre deux gares avec plusieurs similarités et quelques différences.

## **2.4 Enjeux**

Dans cette partie, nous évoquons les divers enjeux de cette recherche.

### **2.4.1 Cognitifs**

Cette recherche permettra de comprendre l'interaction de l'utilisateur avec un système complexe, qui a évolué au cours des temps. Cette recherche permet de souligner des comportements d'adaptations avec des contextes qui évoluent d'états libres vers des états très restreints. Elle

souligne la prise de décision des personnes selon les choix permis et permet de distinguer ce qui importe le plus aux yeux de l'utilisateur.

## 2.4.2 Méthodologiques

La méthode proposée englobe plusieurs étapes allant du recueil et de la validation des données, de la formalisation des comportements, vers la construction du modèle et enfin du calibrage et de la validation du modèle de simulation. Pour tester et valider la transférabilité, le modèle est transféré vers une station cible et comparé aux mesures qui y sont effectuées.

## 2.4.3 Economiques

Une forte densité peut avoir des conséquences négatives sur l'économie et le tourisme [HOU 03]. Cette situation peut conduire à de l'inconfort durant l'attente du train, l'incapacité à monter dans le train et augmenter le niveau du stress des passagers [VEI 13][NEW 92]. Vu par les clients, le niveau d'affluence est l'un des indicateurs du niveau de service fourni parmi d'autres comme le temps de trajet et la fiabilité [LIZ 13]. Naturellement, une forte densité est corrélée avec l'apparition de dysfonctionnements et des implications sur les temps d'arrêt.

Le temps d'arrêt est considéré dans la littérature [PUO 00] [FER 15] [LID 15] et par les compagnies de transports publics comme une variable déterminante de la performance, de la fiabilité et de la qualité de service. En effet, la maîtrise des facteurs de variation du temps d'arrêt permet de mieux exploiter la capacité de transport (i.e. le nombre maximum de passagers qu'il est possible de transporter) tout en prenant les mesures efficaces aptes à le réduire. De la sorte, il devient possible d'augmenter la capacité véhiculaire et la régularité sans détériorer la qualité de service. En revanche, ne pas maîtriser le temps d'arrêt peut générer une dégradation rapide du service. Par exemple, s'agissant de trains, une cause principale des retards aux heures de pointe est due aux temps d'arrêt plus longs que prévus. Le train est non seulement retardé, mais ce retard entraîne des effets en cascade [LID 15] [YAM 13]. C'est en effet, l'un des objectifs des entreprises ferroviaires : maîtriser la grille horaire et étudier la possibilité d'augmenter la capacité d'une ligne, afin d'alléger les charges entre les trains en circulation. Cela permettra par la même occasion de préserver le bien-être des usagers, de favoriser leur confort et d'améliorer la qualité de service.

**Première partie**  
**État de l'art**

### 3 État de l'art

Tout d'abord, nous investiguons une des composantes du phénomène étudié : la foule. Nous présentons l'état de l'art sur la foule dans la Section 1 (page 38). Nous définissons la foule comme étant un rassemblement de personnes orientées par leurs propres buts qui correspondent aux choix possibles offerts par le contexte spatio-temporel.

Cela suppose une compréhension de la question des comportements individuels et collectifs indissociables de la foule. Nous présentons l'état de l'art sur les théories du comportement dans la Section 2 (page 53). Ensuite, nous contextualisons les comportements émergeants en décrivant notre lieu d'intérêt et son influence : les gares à fort trafic. Ainsi, nous présentons l'état de l'art des recherches sur les transports dans la Section 3 (page 58).

La compréhension des vecteurs majeurs du phénomène étudié constitue une ligne directrice vers la construction du modèle comportemental. A cet égard, nous nous penchons sur un des objectifs de cette thèse : favoriser l'applicabilité inter-contextuelle du modèle comportemental. Cela est exposé par la notion de la transférabilité : présentation de la transférabilité des connaissances dans la Section 4 (page 83).

Finalement, nous passons en revue les différentes approches de la méthode d'analyse de comportements choisie : la modélisation et simulation de foule piétonne. Nous présentons les approches de modélisation et simulation dans la Section 5 (page 91) ainsi que les différents simulateurs de foule existants dans la Section 6 (page 101).

# Chapitre 1

## 3.1 La foule

La foule a été considérée comme étant un phénomène a priori difficile à quantifier ou à prédire son comportement. Nous commençons par la définition de ce phénomène complexe. Puis, nous présentons la notion de l'émergence qui illustre bien la difficulté quant à la description d'un point de vue macroscopique et microscopique de la foule. De ce fait, nous évoquons les implications individuelles et collectives dans le phénomène. Nous passons en revue les méthodologies d'expérimentation utilisées dans ce cadre et rapportons certains effets caractéristiques et propres de la foule.

### 3.1.1 Définition

A travers la littérature, nous trouvons diverses définitions de la foule. Les premières définitions sont assez larges et ne sont pas d'un grand apport à la compréhension du phénomène. Par exemple, certains auteurs décrivent la foule comme constituée de « *plus de 2 personnes au même endroit et à la même période* » [GUS 895] [MCP 91] [WIJ 11]. D'autres auteurs démontrent que la foule n'est pas seulement un grand nombre de personnes dans un espace commun [LIV 12] [SCH 60] [MAY 15].

Heïgeas et al. [HEI 10] définissent la foule comme étant « *un ensemble d'objets ou de personnes quasi-similaires dans un environnement commun, qui suivent une issue commune (i.e. flux) et manifestent des caractéristiques communes collectives émergentes* ».

Daamen et Duives [DUI 13] proposent une autre définition : « une foule est un rassemblement large de personnes ( $N \geq 100$  tel que  $N$  est le nombre d'individus), dans un même contexte spatio-temporel. Les mouvements de ces personnes sont prolongés pour une période de temps ( $T \geq 60$  s, tel que  $T$  exprime le temps) dépendant majoritairement d'interactions locales ( $K \geq 1$ ,  $P/m^2$ , tel que  $K$  exprime la densité) ».

Le constat est que la définition de la foule est assez variable compte tenu de sa complexité. Il semble que chaque étude identifie les aspects d'intérêt les plus importants du phénomène. En fonction de ces éléments, une définition de la foule est établie.

Dans nos travaux, nous étudions la foule dans un contexte spécifique : les transports en commun. Dès lors, nous essayons de réunir les éléments rapportés dans la littérature afin d'identifier les axes majeurs de cette question. Nous commençons par investiguer s'il s'agit d'une entité à part entière ou d'une somme de composantes. Nous abordons cette question à travers des études sociologiques et nous l'illustrons par le principe de l'émergence. Ensuite nous énumérons les méthodes expérimentales utilisées pour la compréhension de la foule. Enfin nous caractérisons ce phénomène à travers des faits rapportés dans la littérature.

### 3.1.2 L'émergence

Depuis longtemps, les caractères propres et spécifiques de la foule ont été analysés. Le Bon [GUS 895] considère la foule comme une entité psychologique particulière non réductible aux individus qui la composent. Cette entité dispose de sa propre unité mentale qui induit sur des comportements individuels primitifs et passionnels. Ceci a été qualifié de « *l'âme de la foule* » [GUS 895]. Cette vision a été supportée par des faits rapportés et intrigants qui soulignent mal l'implication de la composante individuelle. Il s'agit du pouvoir de la persuasion [MCG 85], d'obéissance [ASC 51], de désindividualisation [FES 52] et de déresponsabilisation [LAT 69]. Zimbardo [ZIM 69], rapporte que certains de ces faits ne sont pas systématiques, ils apparaissent à certains stades et se réunissent sous des conditions bien spécifiques (i.e. le type de foule, la perception de l'autorité, etc.).

D'un autre côté, McPhail [MCP 97] contredit la vision de Lebon sur la foule. Il postule que la foule est composée d'individus qui agissent et prennent leurs propres décisions indépendamment du groupe et peuvent cependant, pendant une certaine durée, agir collectivement.

Ce débat peut être représenté par le principe de l'émergence qui caractérise de tels systèmes complexes. Wilensky [WIL 15 : p6] définit l'émergence comme « *l'apparition de nouvelles structures, modèles et propriétés à travers l'interaction de plusieurs éléments distribués* ».

Pour illustrer notre problématique, nous reprenons deux exemples assez répandus autres que la foule. Le premier est la formation de nuée d'oiseaux. La nuée d'oiseaux, tel que nous la voyons, a une dynamique assez caractéristique et régulière à travers le temps et fonctionne sans plan centralisé. Le second exemple concerne l'embouteillage. Dans la plupart des sociétés industrielles, nous pouvons observer des embouteillages. Nous avons tendance à penser que les embouteillages se composent de milliers de voitures individuelles, mais d'un point de vue macroscopique, les embouteillages apparaissent comme un seul objet reculant à contre-courant de la circulation. Voici le type de questionnements relatifs à de tels systèmes complexes : par quels mécanismes se forment ces nuées ou ces embouteillages ?

En soi, la compréhension de l'émergence, présente deux défis fondamentaux et distincts. Le 1<sup>er</sup> défi est de déterminer le modèle agrégé quand on sait comment les éléments individuels se comportent, donc de passer de l'individuel au collectif. Cette compréhension est dite *intégrative*, car elle est parallèle à l'intégration cumulative de petites différences dans le calcul. Le 2<sup>ème</sup> défi se pose lorsque le modèle global est connu et qu'on essaie de trouver le comportement des éléments qui pourraient générer le modèle. Cette compréhension est dite *différentielle* ou *compositionnelle*, car elle est parallèle à la recherche en calcul pour les petits éléments qui produisent un graphe agrégé lorsqu'il est accumulé [WIL 15 : p7]. Cela peut être représenté par le principe « *Le tout est plus que la somme de ses parties* » d'Aristote.

Wilensky and Resnick [WIL 99a] recommandent une description des phénomènes émergents à deux niveaux : (i) au niveau des éléments individuels (i.e. voitures, oiseaux, personnes, etc.) (ii) au niveau du système (i.e. nuée, embouteillage, etc.). Ils ajoutent que la bonne compréhension de l'émergence réside dans la faculté à pouvoir « glisser » entre les niveaux pour attribuer les

propriétés d'un niveau à l'autre et d'être vigilant quant à la tentative de transfert d'une propriété de l'agrégat aux éléments individuels.

Il est donc intéressant d'aborder la problématique de l'émergence du comportement de la foule en essayant de comprendre ce qui anime (i) son comportement global et (ii) les comportements des individus qui la composent ainsi que (iii) la relation qui existe entre les deux.

### **3.1.2.1 Propriétés du groupe**

On souhaite investiguer le comportement d'un groupe en tant qu'agrégat. Blumer [BLU 69] distingue quatre types de foules en se basant sur leur but et leur dynamique. Il décrit certains comportements émergents stéréotypés. A savoir :

- Les foules occasionnelles : c'est un rassemblement de personnes dans un même endroit en même temps et qui a un but commun, ce rassemblement disparaît une fois le but atteint (i.e. en attente de traverser la rue, marcher, etc.).
- Les foules conventionnelles : c'est un rassemblement de personnes dans un but précis (i.e. film, un concert, une conférence, etc.).
- Les foules expressives : c'est un rassemblement de personnes dans le but d'exprimer une émotion (i.e. événement religieux, politique, sportif, etc.)
- Les foules agissantes : une foule franchit une étape importante au-delà d'une foule expressive en adoptant un comportement violent ou destructeur (i.e. pillage, panique, etc.)

Un cinquième type, les foules de protestations, a également été distingué par d'autres chercheurs [MCP 83].

On remarque qu'à travers la définition du but du rassemblement, on peut prédire, en partie, les issues de la situation (i.e. comportements émergents).

### **3.1.2.2 Propriétés des individus**

En général, chaque piéton dispose d'objectifs propres (implicites ou explicites) qui justifient sa présence dans cet environnement urbain. Ces buts vont tendre à cadrer avec un ensemble précis de choix possibles dans une situation donnée. Il y a un besoin d'une étude détaillée du comportement humain aussi bien au niveau individuel que collectif. Ceci sera abordé en détail dans la page 38.

### **3.1.2.3 Interaction entre le groupe et l'individu**

Goode [GOO 92] pense que les foules occasionnelles et conventionnelles n'agissent pas vraiment sur un comportement collectif, car leur comportement est relativement structuré et suit des normes conventionnelles pour se comporter dans de tels contextes. Cependant, la différence entre la foule conventionnelle et expressive n'est toujours pas claire, car dans une foule expressive les individus se livrent tout de même à un comportement collectif.

D'un autre côté, ces buts individuels peuvent s'aligner avec des buts collectifs (i.e. lors des rassemblements ...). Cela a été rapporté par exemple, via le principe de la contagion émotionnelle qui est la tendance à capturer ou à exprimer l'émotion d'autrui (*les sentiments subjectifs, expressions, tendance à l'action et les comportements*) [GUS 895] [HAT 65]. Elle découle de la capacité à percevoir et interpréter les émotions d'autrui de manière non consciente.

### 3.1.3 Méthode d'expérimentation

#### 3.1.3.1 Observation en milieu naturel

Les recherches sur la foule en milieu urbain se sont beaucoup étendues grâce à l'équipement des lieux publics, de caméras de surveillance. Les images vidéo permettent d'observer, de déceler un événement ou une anomalie, de décrire et de chercher les dépendances de l'événement. Avant cela, le constat général sur la foule rapportait le phénomène comme étant chaotique et imprédictible, au fil des années, des recherches et des observations indiquent l'existence de certaines régularités qualitatives et quantitatives.

Par exemple, pour Helbing et al. [HEL 01], les piétons manifestent une forte aversion à l'idée de faire des détours ou de se déplacer en sens inverse, même si la route directe est bondée. Par conséquent, les piétons choisissent normalement la route la plus rapide vers leur prochaine destination en créant la forme d'un polygone [GAN 98]. Si les itinéraires alternatifs sont de même longueur, un piéton préfère celui où il peut aller aussi loin que possible et de changer de direction le plus tard possible (à condition que l'itinéraire alternatif ne soit pas plus attrayant, i.e. moins de bruit, plus de lumière, plus convivial, etc.). Lors de leurs parcours, les piétons se tiennent à une certaine distance des autres piétons et des frontières (i.e. rues, murs et des obstacles [BRI 93] [TRB 85]). Cette distance est plus petite lorsque le piéton se dépêche, et elle diminue également avec la densité croissante des piétons. Les personnes au repos (en attente sur le quai, assises dans une salle à manger, ou allongées sur une plage) sont uniformément réparties sur la surface disponible s'ils n'en ont aucune connaissance acquise. La densité des piétons augmente (et les distances interpersonnelles diminuent) autour de lieux particulièrement attirants [HEL 98]. Les individus qui se connaissent peuvent former des groupes qui se comportent de la même façon qu'un seul piéton. Les tailles des groupes sont des distributions de Poisson [COL 64]. Les piétons préfèrent marcher avec une vitesse individuelle désirée, qui correspond à la vitesse de marche la plus confortable et la moins énergivore [WEI 93], tant que la situation n'est pas pressante. Les vitesses désirées dans les foules piétonnes sont décrites sous forme de gaussiennes et quantifiées (Moyenne=1.34 m/s, Écart-type = 0.26 m/s) [HEN 71].

Plus récemment, les techniques de reconnaissance de formes et de mouvement ont permis de déceler plusieurs types d'événements dans une foule : il est possible de suivre le mouvement de plusieurs personnes dans une foule grâce au *tracking* [PEL 09], détecter des mouvements anormaux [MEH 09], détecter des groupes [KRA 11] et d'analyser les interactions [SCO 09].

### 3.1.3.2 Recherches écologiques

Ces études tendent à creuser les impacts du contexte comme par exemple la perception de l'espace et les effets de sa variabilité (i.e. restriction, amplification) sur les comportements des personnes. Barker [BAR 65] [BAR 68], rapporte des comportements émergents des situations « sous-peuplées » versus « surpeuplées ». Il prend comme exemple les comportements des élèves de petites écoles qui semblent être plus engagés dans les activités de groupe, tandis que les élèves de grandes écoles semblent trouver satisfaction dans des activités loin des autres. De son côté, Hall [HAL 66] présente le principe de la proxémie définie comme étant l'étude de la perception et de l'usage de l'espace par l'homme en tant que produit culturel spécifique. En effet, les personnes se différencient dans leurs habitudes, attitudes, valeurs concernant l'utilisation de l'espace et la distance interpersonnelle selon leurs cultures. Par conséquent, l'implication de la proxémie dans ces études confirme davantage des dépendances des comportements avec des caractéristiques personnelles. Sommer [SOM 69] rajoute que la perception des relations spatiales parmi les objets est significativement influencée par le type d'activité (i.e. but) qui se produit au sein du cadre spatial.

### 3.1.3.3 Etudes corrélationnelles

Ces études établissent des liens entre la mesure de densité avec des pathologies sociales et médicales (taux de crimes, épidémiologie, suicide, etc.). Par exemple, selon ces études, où la densité de la population est généralement associée à une désorganisation sociale, exceptée pour la Chine, la densité n'est pas associée avec des anomalies comportementales [SCH 63].

### 3.1.3.4 Analogie avec les comportements animaliers

Les premières études sur la foule énumèrent certaines similitudes de comportements entre l'humain et l'animal [SIG 901]. Plusieurs études rapportent les effets de la restriction spatiale sur le comportement animalier [CAL 62][CHI 60]. En effet, apparaît le phénomène de cloaque comportemental (*Behavioral sink*) qui décrit le changement de comportement quand il y a surpeuplement (i.e. négligence maternelle, retrait individuel des interactions sociales, baisse prononcée de reproduction, etc.). En revanche, la littérature scientifique rapporte une des limites de ces études : l'applicabilité des données de la recherche animale à l'humain est limitée par des problèmes de validité écologique [BRU 56].

### 3.1.3.5 Etudes Expérimentales

Plusieurs études expérimentales explorent les effets des variables physiques et psychologiques.

**Variables physiques :** concernant la quantité de personnes dans la foule ou le volume du groupe, des études rapportent que les membres d'un groupe plus large ont tendance à être plus agressifs et asociaux que ceux appartenant à des petits groupes et ceci indépendamment du contexte de l'étude [PRO 70] [HUT 66].

Concernant le contexte, certains considèrent la foule comme étant liée intimement avec la taille de l'espace qui la contient [FRE 70][FRE 71]. Ces études rapportent que quand la taille du groupe est maintenue constante et que la taille de l'espace est variée, la tâche de performance reste aussi efficace que celle des personnes dans un espace plus grand. En revanche, les relations interpersonnelles au sein du groupe dans, une petite salle, montrent des différences en fonction du genre (relation entre femmes est plus intime et amicale que dans le groupe masculin). Il en découle la définition de la densité comme variable physique d'étude de la foule.

**Variables psychologiques :** une forte densité de personnes relève de caractéristiques physiques et peut être évaluée objectivement [COX 06]. Seulement, il existe des effets très importants vécus subjectivement qui accompagnent cette densité. Dans ce sens, Stockol [STO 72] propose de faire la distinction entre la condition physique que l'on attribue au mot « densité » et l'expérience psychologique associée à une situation appelée « foule ». En effet, la sensation de foule est un phénomène psychologique subjectif créé par l'interaction entre la densité perçue et des facteurs environnementaux, sociaux et cognitifs. Il s'ensuit qu'une même densité de personnes peut entraîner ou non une sensation de foule. La sensation de foule et son caractère stressant peuvent être amplifiés par des caractéristiques spatiales telles que la limitation de l'espace, les mouvements restreints, l'atmosphère émotionnelle générale et la contagion émotionnelle, l'augmentation de la température, le taux d'humidité, le manque d'air et encore d'autres stimuli sensoriels comme le bruit ou la luminosité [GRI 71][STO 72]. C'est ainsi que l'expérience de la foule est assimilée à « un état psychologique » qui dispose de propriétés motivationnelles et induit des comportements visant à réduire le niveau d'inconfort ressenti [BEL 00].

Une autre composante de la foule est étudiée à savoir le manque de contrôle et le stress engendré par cette situation. En effet, les personnes ont plus tendance à éprouver un sentiment de manque de contrôle de la situation dans une zone dense de population [LAN 77]. Cette sensation provient du fait d'être contraint à subir un « temps d'arrêt » : ce qui engendre un sentiment de manque de contrôle sur la proximité avec les autres [LAM 99]. Des études montrent que les effets du stress associés à la foule peuvent toutefois être modérés par le degré du contrôle que l'on peut exercer dans une situation très dense [LUN 76]. Par exemple, dans un train, les facteurs de réduction du stress sont, la possibilité de choisir un siège et contrôler la proximité avec les autres. Singer et ses collègues [SIN 78] ont mesuré chez les passagers les taux d'adrénaline et de noradrénaline qui reflètent le niveau du stress. Chez des personnes montant dans le train lors du 1<sup>er</sup> arrêt, ce taux est bas par rapport à celui des passagers qui sont montés au départ du train et qui ont dû rivaliser avec les autres voyageurs lors du choix de leur place. Cependant, le taux le plus élevé est retrouvé chez les personnes qui sont montées à la moitié du trajet, où les véhicules sont plus chargés, si bien que les passagers sont encore plus contraints par la situation. Cette méthode est efficace pour la mesure de l'impact de l'environnement urbain aussi bien sur le niveau physiologique que psychologique. Cependant, ce type d'intervention est assez invasif et semble difficilement reproductible.

### 3.1.3.6 La simulation

Selon le Petit Larousse la simulation est une « méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène, un système à étudier par un modèle plus simple mais ayant un comportement analogue ».

Selon Natkin [NAT 18], « *une simulation génère une suite d'événements qui représentent de façon plus ou moins « réaliste » un phénomène réel.* » Il s'agit d'en tirer des conclusions qualitatives et/ou quantitatives sur le comportement du système réel ou de son environnement et, éventuellement, participer à l'amélioration du fonctionnement de ce système (formation, contrôle en temps réel). Les objectifs de ce processus peuvent être :

- D'étudier le comportement d'un système réel complexe.
- D'étudier l'effet d'une modification d'un système réel complexe.
- D'étudier le fonctionnement et aider à la conception d'un futur système complexe.
- De former des personnes à réagir correctement dans des situations qui ne peuvent être observées dans la réalité (le système simulé et ou son environnement sont trop coûteux, les situations visées trop rares, trop dangereuses, etc.).
- De permettre d'expérimenter perceptivement des situations « extraordinaires » dans lesquelles un utilisateur ne peut être placé dans la réalité.
- De fabriquer un objet « virtuel » « équivalent » à un système réel (synthèse).

La simulation repose sur la notion de modèle.

Par ailleurs, toute étude d'un phénomène naturel repose d'une part sur, l'observation en milieu naturel et le recueil de données et, d'autre part sur l'expérimentation. Mais dans le cadre des sciences comportementales, il est en général difficile de mener des expérimentations en situation réelle [HOC 95]. Bien qu'il existe de nombreux exemples de ce type d'expériences (simulation du comportement d'un groupe dans un milieu clos comme une navette spatiale, analyse du comportement des opérateurs en situation de crise dans une centrale nucléaire, études du comportement d'un groupe en cas d'agressions [LAT 69]). L'expérimentation comportementale est, dans son principe, complexe. D'une part l'activation de facteurs individuels, dont l'effet est analysé, est souvent très difficile et d'autre part, le maintien sous contrôle de la simulation peut être problématique. Dans le cadre de l'analyse comportementale d'une foule, la reproductibilité expérimentale du phénomène est assez épineuse, compte tenu de sa dépendance à une multitude de facteurs (atmosphère actuelle, buts personnels, facteurs de stress et de fatigue, enjeux, etc.). A noter l'existence des modèles à échelle réelle ou virtuelle qui reproduisent l'architecture de l'environnement étudié et d'y faire les expérimentations nécessaires. La simulation fait partie du processus d'expérimentation et une méthode de risque et de coût moindre que les autres méthodes (i.e. pas de modification du milieu réel). Nous discutons en détail des méthodes de modélisation et simulation de foule dans la Section 5 (page 91).

### 3.1.3.6.1 Simulation à échelle réelle

Il s'agit de reproduire le cadre spatial étudié par une maquette à échelle réelle en environnement artificiel, de recruter des personnes pour s'y déplacer le plus naturellement possible afin de simuler les conditions étudiées [HOO 03] (Figure 1). Cette technique permet de recueillir des données sur la nature des mouvements individuels (étude en biomécanique [SEI 14], Figure 2) ou des mesures quantitatives (vitesse, temps, etc.). L'avantage de ces méthodes de simulation est de pouvoir faire varier certains paramètres pour en étudier les effets ; ce qui est difficile de faire dans l'environnement réel.



Figure 1. Recherche expérimentale sur le comportement de marche des piétons, Hoogendoorn, Daamen & Bovy [HOO 03].



Figure 2. Recherche expérimentale sur le comportement de la marche et la biomécanique, Seitz et al. [SEI 14]).

### 3.1.3.6.2 Simulation à échelle virtuelle

Les avancées technologiques en simulation permettent de reproduire numériquement le phénomène réel à travers un modèle. Ceci est d'un grand apport dans la compréhension de la foule. La modélisation et la simulation de foule reproduisent virtuellement les rassemblements des personnes à partir des connaissances actuelles, permettent la visualisation de ces connaissances et leurs améliorations. Ces méthodes se distinguent par leur coût diminué, leur sûreté, leur meilleure reproductibilité et la rapidité des calculs.

## 3.1.4 Caractérisation de la foule

Bien que chaque personne dispose d'objectifs propres, la foule montre un haut niveau d'adaptabilité face aux contraintes. Elle se déplace selon une dynamique assez homogène qui tend en général vers une forme d'auto-organisation [HEL 98] et de stabilité du système. Il existe

cependant des contre-exemples à cette régulation menant par exemple à des mouvements de panique [HEL 07]. Nous identifions plusieurs caractérisations de la foule dans ce qui suit. Ces descriptions peuvent être d'une grande utilité dans nos études expérimentales (i.e. servir de métriques de validation d'une simulation [DUI 13]).

#### **3.1.4.1 Niveaux de services**

Les travaux de Fruin se portent sur l'évaluation des espaces d'attente et de marche [FRU 92] (cf. Tableau 1), il a identifié 6 niveaux de services correspondants à une quantification en densité et en flux. Respectivement, selon le taux d'occupation de la superficie moyenne en personne/m<sup>2</sup> et le flux exprimé en p/m<sup>2</sup>/min. Ces niveaux décrivent l'espacement entre les individus, la vitesse de marche et expliquent qualitativement la situation. Plus la densité augmente, plus il est impossible d'éviter le contact avec les autres. Les mouvements deviennent alors davantage restreints et ralentis et les attentes moins plaisantes.

Tableau 1 : Niveaux de services de Fruin en unité de densité et flux [FRU 92]

Niveau de service	Densité (P/m <sup>2</sup> )	Flux (P/m <sup>2</sup> /min)	Description
A	<0,31	< 37	Les piétons se déplacent sans changer leurs mouvements en réponse aux autres piétons. Leur vitesse est librement choisie et les conflits entre piétons sont peu probables.
B	0,31 - 0,43	37 - 57	Espace suffisant pour les piétons pour sélectionner leur vitesse librement, afin de dépasser les autres piétons et éviter des conflits. A ce niveau, les piétons commencent à être conscients des autres piétons, et pour tenir compte de leur présence, choisissent leur trajet.
C	0,43 - 0,72	57 - 68	L'espace est suffisant pour une vitesse normale et pour dépasser les autres piétons en flux unidirectionnel. Des flux en sens inverse ou des mouvements croisant peuvent causer des conflits mineurs. Les vitesses et les flux sont un peu plus faibles.
D	0,72 - 1,08	68 - 75	La liberté de choisir une vitesse individuelle et de dépasser d'autres piétons est limitée. Des flux croisant ou des flux en sens inverse ont une forte probabilité de conflits, ce qui nécessite des changements fréquents de vitesse et de position. Ce niveau fournit un flux raisonnablement fluide, mais des frictions et des interactions entre piétons sont probables.
E	1,08 - 2,17	~ 75	Pratiquement tous les piétons réduisent leur vitesse normale, souvent en adaptant leur démarche. En limite supérieure de cet échelon, le mouvement vers l'avant n'est possible que par le brassage. L'espace n'est pas suffisant pour laisser dépasser les piétons les plus lents. Des flux croisant ou des flux en sens inverse sont possibles seulement avec des difficultés extrêmes. Les flux approchent la limite de la capacité de l'infrastructure, avec des arrêts et des interruptions dans l'écoulement.
F	>2,17	>75	Toutes les vitesses sont très réduites et le mouvement en avant se fait uniquement par le piétinement. Il y a des contacts fréquents et inévitables avec les autres piétons. Des mouvements croisant et en sens inverse sont pratiquement impossibles. Le flux est sporadique et instable. L'espace est plutôt caractérisé par des piétons en attente que par des piétons en mouvement.

La dernière version du guide de conception utilisé aux États-Unis (*le Highway Capacity Manual*), a pris en compte l'évolution des capacités physiques, les volumes physiques et l'espace acceptable autour d'un piéton. Pour cela, la même catégorisation que celle de Fruin a été adaptée, mais en réduisant les valeurs seuils, correspondant niveau de service au seuil de la densité exprimé en Personnes/ m<sup>2</sup> [TRB 85].

D'autres caractérisations apparaissent, comme celles de Puskarev et Zupan [PUS 77] (en sept niveaux avec la description de chaque niveau) et Brilon [BRI 94] et bien d'autres.

### 3.1.4.2 Formation de lignes

Au cours de ce processus, un certain nombre de voies de largeur variable se forment [OKA 93] [HOO 04].

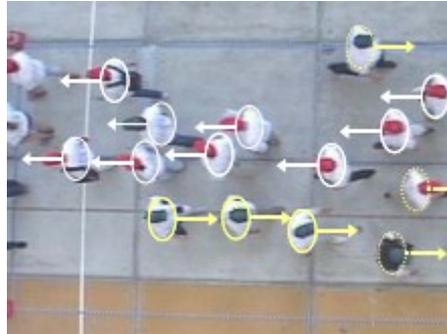


Figure 3. Formation de lignes Hoogendoorn et Daamen [HOO 04]

### 3.1.4.3 Zipper effect – formation en quinconce

Dans cette situation, les individus permettent à d'autres personnes d'être dans l'espace territorial en diagonale devant eux, tant que l'espace direct devant leurs pieds est toujours vide. Dans un goulot d'étranglement, il permet la création de voies plus étroites que la largeur prévue de la zone territoriale d'un piéton [HOO 05].

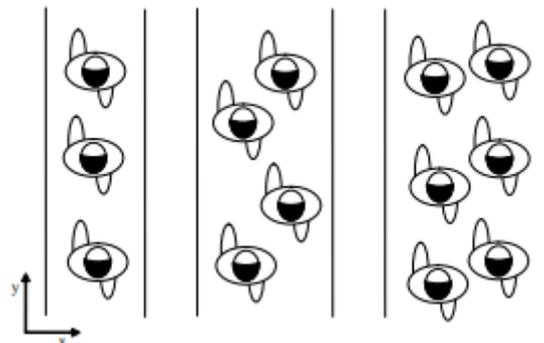


Figure 4. Illustration du Zipper effect [SEY 09]

### 3.1.4.4 Faster is slower effect

L'effet a été décrit comme étant lié à l'impatience des personnes et à leur tentative quant au fait de vouloir réinstaurer la vitesse désirée quand ces derniers se trouvent contraints de suivre la vitesse imposée. Il en résulte plusieurs collisions et par conséquent des ralentissements [HEL 00a][HEL 09]. Cet effet a été étudié expérimentalement par [PAS 15] en créant une situation d'évacuation des piétons par des portes étroites, avec des comparaisons entre des groupes de

hautes

et

basses

compétitivités.

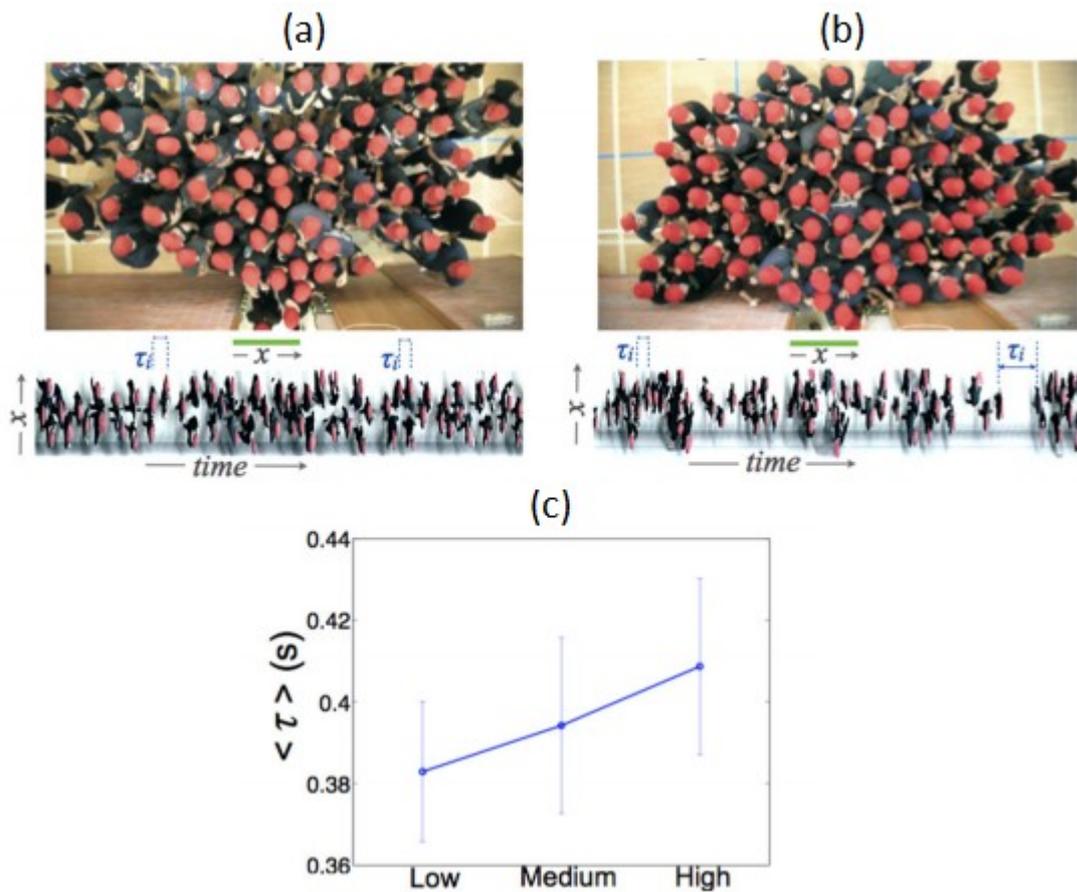


Figure 5. Illustration du *Faster is slower effect* [PAS 15] (a) groupe basse compétitivité (b) groupe haute compétitivité (c) Sur l'axe X, groupes de différentes compétitivité. Sur l'axe Y moyenne de  $\langle T \rangle$  en fonction de la compétitivité telle que  $T$  est la durée de l'évacuation.

### 3.1.4.5 Freezing by heating

En cas de densités extrêmes, de grandes perturbations ou de foules nerveuses, les couloirs formés peuvent s'effondrer en raison des manœuvres de dépassements incessantes. Par conséquent, les blocs de piétons avec les directions de mouvement désirées et celles opposées se font face et ne peuvent plus progresser [HEL 00b].

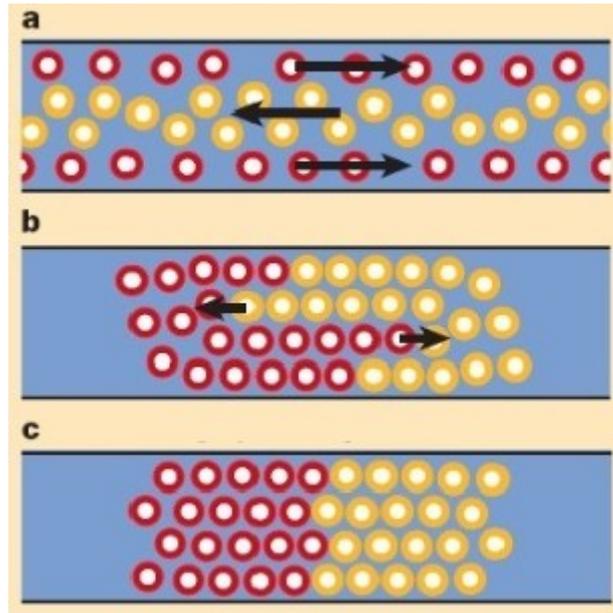


Figure 6. *Freezing by heating effect* [HEL 00b] (1) Formation de lignes (b) manœuvres de dépassement (c) formation de bloc de directions différentes

### 3.1.4.6 Comportements grégaires (*Herding*)

Cet effet décrit le cas où le manque de clarté de la situation (i.e. situation de panique) amène les individus à se suivre au lieu de suivre l'itinéraire le plus optimal [HEL 05].

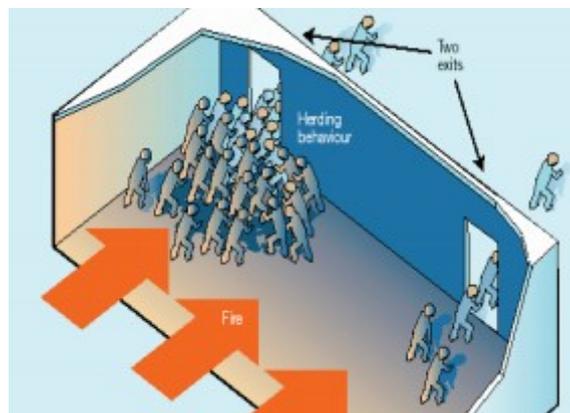


Figure 7. Exemple de comportement grégaire lors d'une situation de panique [FOU 07]

### 3.1.4.7 Stop & Go

Cela peut être décrit comme une concaténation d'une accélération suivie d'une onde de freinage et ainsi de suite [HEL 07] en raison de densité très importante.

### 3.1.4.8 Turbulence

Il s'agit de mouvements irréguliers imprévus et involontaires des individus dans différentes directions en raison de forces fortes et changeantes dans des foules d'une densité extrême.



*Figure 8.* Exemple de simulation montrant une situation de turbulence – les oscillations dans la foule sont dans des directions orthogonales à l'écoulement [GOL 14]

#### **3.1.4.9 Systèmes optimaux**

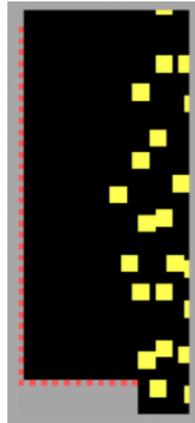
La Figure 9 illustre un exemple où les piétons n'acceptent pas les détours de plus de 20%, de sorte qu'ils laissent souvent des chemins pavés pour prendre des raccourcis [HEL 05].



*Figure 9.* Raccourcis créés par les piétons [HEL 05]

#### **3.1.4.10 Shadow effect**

Après le passage des piétons dans un couloir étroit, la densité des piétons dans les zones près du bord de l'environnement sera maintenue presque nulle [STI 00].



(a)



(b)

Figure 10. Illustration du *shadow effect* (a) espaces inutilisés (b) la présence des officiers en bas à gauche, affecte la foule, laissant des espaces inutilisés [STI 00 : p152].

# Chapitre 2

## 3.2 Le comportement

Avec la croissance exponentielle de l'urbanisation, la situation de foule est devenue assez commune. Compte tenu de sa récurrence et des enjeux qu'elle représente, l'étude de la foule suscite aujourd'hui l'intérêt de différentes disciplines.

La psychologie sociale étudie les manifestations intra-personnelles relatives à l'individu (i.e. émotion, attitude, influence du groupe, de quelle manière un individu pense des autres, cognition sociale) et interpersonnelles relatives aux relations dyadiques et de groupe (i.e. comportement d'entraide, agression, attraction, relation entre les groupes). Mais ceci suppose une compréhension de l'individu en tant qu'entité à part entière. La psychologie cognitive, vise à décrire et étudier les processus mentaux individuels affectant chaque comportement. Par ces connaissances recueillies, il est possible d'établir un tableau complet du fonctionnement aussi bien sur le plan individuel que collectif.

Nous nous intéressons à la modélisation des comportements piétonniers individuels et collectifs dans un milieu urbain. Le comportement humain est la résultante de l'interaction des caractéristiques environnementales et personnelles qu'elles soient d'ordre cognitif, perceptuel ou affectif [BAU 78] [DOW 74].

La perception de la foule dans un milieu urbain et les réactions générées sont le produit de facteurs individuels propres comme l'émotion du moment [BEE 11], la personnalité [WOR 76], les expériences passées [BAU 75], la culture [PON 06], l'expérience du stress [COX 06] et de la gestion de l'espace personnel [HAA 73].

Nous détaillons par la suite les facteurs et théories explicatives des conduites et comportements humains et essayons de relever les éléments les plus saillants pour l'étude de la foule.

### 3.2.1 L'émotion

Il s'agit d'un état affectif bref et intense qui apparaît en réponse à une expérience. L'expérience émotionnelle peut être concrétisée en action. L'humeur peut, elle aussi, influencer sur les comportements, elle se différencie des émotions par le fait qu'elle introduit un état plus prolongé, moins intense et qui n'apparaît pas en réponse à une expérience donnée [BEE 11].

L'état émotionnel peut être considéré comme une combinaison de trois composantes : l'éveil physiologique (*Arousal*), de l'évaluation psychologique (*Appraisal*) et des expériences subjectives. Telles que présentées, ces évaluations sont conditionnées par les expériences passées et la culture personnelle. C'est en partie ce qui explique que : face à une même expérience, deux personnes peuvent avoir deux expériences émotionnelles totalement différentes.

Il en découle de nombreuses théories sur les émotions qui tentent de relier ces processus séquentiellement et parallèlement avec des ordres différents, ainsi qu'une intégration progressive de la composante cognitive en tant qu'élément d'évaluation (*Appraisal*). On en cite les théories de : James-Lange, Cannon-Bard , Schachter-Singer [SCA 62], Lazarus [LAZ 91].

Les expressions comportementales de l'émotion se sont étendues aux expressions corporelles à travers l'intonation de la voix, les expressions faciales, le langage corporel et les actions physiques. Parmi les travaux les plus connus, on peut citer ceux d'Ekman [EKM 97] sur les expressions faciales qui rapportent que l'humain dispose de cette aptitude à les reconnaître et les produire d'une manière universelle. Il identifie six émotions de base, valide en tout contexte : la joie, la surprise, la tristesse, la peur, le dégoût et la colère.

### 3.2.2 Traits de personnalité

La personnalité est définie comme étant l'ensemble des comportements habituels, cognitifs et les schémas émotionnels qui découlent de facteurs biologiques et environnementaux [COR 09]. Selon cette perspective, ce sont des aspects de la personnalité qui sont relativement stables à travers le temps. Ces traits de personnalité peuvent s'exprimer à travers des modes de pensée et des comportements récurrents. Ayant une connaissance de ces traits, les comportements individuels peuvent devenir plus prédictibles face à une situation donnée.

Plusieurs théories de la personnalité émergent comme pour l'explication de l'efficacité et de la compétence (i.e. *auto-efficacité* de Bandura [BAN 03], *locus de control* de Rotter [ROT 66], *l'auto-régulation* de Mischel [MIS 72]). A travers la *théorie de déterminisme réciproque*, Bandura [BAN 90] propose de faire le lien entre les processus cognitifs, comportementaux et le contexte.

Il apparaît aussi des modèles incluant des descriptions des traits de personnalité comme celles d'Allport [ALL 36] (4500 descriptions), Cattell [CAT 46][CAT 57] (16 dimensions) , Eysenck [EYE 85] (3 dimensions). Par la suite, apparaît le modèle des cinq facteurs *OCEAN* qui est le modèle le plus pertinent dans l'approximation des traits de personnalité [FUN 01] ; (O) Ouverture, (C) Conscienciosité, (E) Extraversion, (A) Agréabilité, (N) Neuroticisme.

### 3.2.3 Culture

La culture fait partie intégrante de l'environnement, par conséquent elle contribue à la formation de la personnalité [TRI 02]. La culture intègre les croyances, les coutumes et les traditions pour chaque société donnée. Les chercheurs en psychologie de la personnalité investiguent la question de la variabilité des traits de personnalité à travers les cultures. Il apparaît que les traits sont à la fois universels et spécifiques à la culture. L'un des concepts les plus rattachés à la culture est celui de la proxémie qui concerne la gestion de l'espace individuel [HAL 66]. D'autres études s'entendent à l'expression des émotions négatives qui est plus restreinte chez certaines cultures [MAT 90]. Tandis que d'autres testent la validité des théories des personnalités, déjà développées, quand elles sont appliquées dans d'autres cultures [CHE 11].

### 3.2.4 L'influence du groupe

Parmi les premières expériences qui soulignent le changement comportemental humain sous l'effet de la pression du groupe, on retrouve celle de Asch [ASC 51]. Asch souligne que le changement comportemental trouve son origine à trois niveaux : (1) distorsion perceptuelle : le sujet dit que son choix lui semble le bon (2) distorsion du jugement : le sujet pense que, si tout le groupe est d'accord, c'est que c'est lui qui se trompe (3) distorsion de l'action : le sujet sait qu'il a raison et choisit de suivre le groupe afin d'éviter le désagrément du désaccord avec celui-ci. D'autres études ont été faites sur l'effet de l'autorité et l'obéissance [MIL 65].

L'humain peut aussi moduler ses comportements en fonction des rôles sociaux [HAR 03], des normes sociales [DEU 55] et des scripts [SCH 77]. On définit les rôles sociaux comme étant des modèles comportementaux attendus de la personne dans ce contexte [HAR 03]. La norme sociale est une attente d'un comportement acceptable et approprié par ses membres. Les scripts sont les connaissances de la séquence des événements attendus dans un contexte donné [SCH 77]. Au vu de ces éléments, l'être humain va essayer de produire un comportement ou une chaîne de comportements selon des rôles, des normes sociales et des scripts.

### 3.2.5 Le stress

Le terme est souvent utilisé pour décrire une variété d'états de sentiments désagréables. Malgré l'usage répandu du terme, il reste un concept assez vague et difficile à définir avec précision. Globalement, le stress peut être vu comme un stimulus mais aussi comme une réponse à une réaction. C'est la définition « *basée sur le stimulus* » versus « *basée sur la réaction* ». Lazarus [LAZ 84] introduit la composante cognitive dans l'évaluation du stress. Il en découle que c'est aussi un phénomène subjectif. Comme présenté par Selye, il semble que le stress ce n'est seulement ce qui arrive à la personne mais plutôt la façon dont elle y répond [SEL 76].

Les facteurs de stress sont multiples (i.e. deuil, difficultés financières, études, changement de mode de vie, etc.). Cependant, ils n'impliquent pas forcément des événements majeurs de la vie. Les tracas et les irritations mineures font partie de notre vie quotidienne (i.e. embouteillage, courses, collègues désagréables, etc.) peuvent causer du stress aussi bien que les événements majeurs [KAN 81]. La littérature rapporte des stratégies émergentes que l'humain instaure afin de s'adapter au stress ( *coping* ) [LAZ 84] : (1) l'adaptation centrée sur le problème – ou la résolution du problème et (2) l'adaptation centrée sur l'émotion.

L'adaptation basée sur le problème semble plus récurrente dans les situations où la personne éprouve un sentiment de contrôle sur la situation. Tandis que l'adaptation basée sur l'émotion implique plus souvent une situation peu contrôlable [FOL 80]. C'est ce qui explique les bienfaits du contrôle ou la perception du contrôle sur la diminution des effets de stress [NEU 07].

### 3.2.6 La motivation

La motivation est un terme qui fait référence aux « raisons » de n'importe quel comportement dirigé par un objectif. Plusieurs études se sont penchées sur l'origine de la motivation afin d'en donner une définition précise. Il en émerge une variété de théories de la motivation. Par exemple, on retrouve la théorie de l'homéostasie corporelle [HUL 43], les théories d'incitation positive, les représentations des motivations intrinsèques émanant de la personne elle-même (i.e. satisfaction personnelle, besoin d'apprentissage) et les motivations extrinsèques venant de l'environnement de la personne (i.e. gratification matérielle ou immatérielle) [HUI 01].

Il existe aussi l'approche psychodynamique de Freud qui représente les motivations comme étant la résultante de conflits intrapsychiques inconscients [FRE 46]. Pour Bandura, c'est notre sens de l'*auto-efficacité* qui motive les comportements [BAN 03]. Deci, propose la théorie de l'*autodétermination* qui considère trois besoins psychologiques fondamentaux : le besoin de compétence, d'autonomie et de relations sociales [DEC 00]. Quant à *la hiérarchie des besoins de Maslow*, elle montre la relation entre divers besoins physiologiques de niveau inférieur au très haut niveau d'auto-actualisation par ordre de priorité [MAS 43]. Festinger, à travers la théorie de la *dissonance cognitive* [FES 57] explique certains comportements comme résultant de l'inconfort ressenti quand il existe une contradiction entre le comportement et les idées ou les objectifs de la personne. Cette dernière adopte des stratégies pour réduire cet inconfort. D'autres théories existent comme celles de Dweck et Legget [DWE 88] sur les objectifs de performance ou d'apprentissage, la *réactance psychologique* face à la restriction à la liberté [BRE 66] et bien d'autres.

Il est clair qu'on fait aussi face à une diversité des théories de motivation qui sont apparues et ont évolué à travers plusieurs courants et approches (évolutionnisme, rationalisme, behaviorisme). Cette diversité implique une difficulté à avoir une vision d'ensemble des théories motivationnelles. Fenouillet [CAR 08] rapporte : « *Il est difficile de concevoir la motivation comme une entité construite sur un socle commun* » [CAR 08 : p308] et « *il n'existe pas actuellement de théorie capable de résumer en un tout cohérent l'infinité des motifs que l'individu est susceptible d'invoquer pour expliquer ces « raisons » qui le poussent à agir dans une situation donnée* » [CAR 08 : p318].

Fenouillet [CAR 08 : chapitre 16] propose une approche intégrative des théories de la motivation pour « l'unification ». Il y fait la distinction entre le terme *motif* et *motivation* car cette dernière tente de chercher son origine alors qu'un motif tente de représenter l'origine directe du comportement en fonction de sa finalité et n'ont pas l'ambition de représenter la source ultime de la motivation. Pour Nuttin [NUT 91] « les motifs » (en anglais, *motives*) sont les concrétisations des besoins : « *ils constituent la composante dynamique et directionnelle de l'acte concret. Le terme motivations (au pluriel), ou une motivation spécifique, est souvent employé dans le même sens que motif(s)* ».

Essentiellement, cette différenciation entre « origine psychologique » et « motifs » permet de s'affranchir du carcan biologique et de l'origine interne de la motivation. [CAR 08 : p316].

Les diverses théories sont pertinentes mais elles sont de niveau de précisions distincts et sont fondamentalement des approches différentes. Dans notre cas, l'approche motivationnelle semble être intéressante. Tel que nous définissons la motivation (*les motifs*) [NUT 91], cette définition

peut nous éviter de se perdre dans les origines profondes du comportement [CAR 08: chapitre 16]. En effet, elle permet une modération des liens de dépendance entre les variables (i.e. la motivation en tant que l'origine à l'action sans aller plus loin). Ainsi, une motivation permet d'expliquer un comportement. Cette représentation modérée en liens logiques, pourrait être une source de flexibilité en faveur de la transférabilité. Nous discutons de la transférabilité en détail dans la section 4 (page 83).

# Chapitre 3

## 3.3 Les recherches dans les transports

Nous étudions la foule dans un contexte très spécifique : dans les transports en commun, lors des échanges quai-train, dans des gares à fort trafic. Dans ce qui suit, nous relierons l'aspect individu / foule avec la spécificité de l'environnement étudié, de l'impact de son architecture, agencement, indications et normes contextuelles. Ainsi, nous disposons d'une large connaissance du type de comportement généré face aux caractéristiques de ces contextes ainsi qu'aux multiples contre-mesures prises dans le système ferroviaire.

### 3.3.1 Caractéristiques techniques

Les quais et les trains présentent des configurations spatiales propres et des risques différents. Les humains semblent générer des comportements différents selon leurs interprétations des informations du moment. L'état de l'art des recherches en transports rapporte quelques spécificités techniques constatées dans le milieu étudié, des comportements humains émergents et des répercussions sur les temps d'arrêts ( $TA$ ) ainsi que des adaptations prises expliquant à la fois l'évolution du système et des comportements.

#### 3.3.1.1 Le type de quai

Les quais encadrés par deux voies présentent des difficultés en matière de gestion de flux voyageurs avec un effet sur la durée du temps d'arrêt. Avec un quai de ce type, lorsque deux trains sont présents de chaque côté, la densité de voyageurs augmente drastiquement sur le quai avec des croisements entre les flux de voyageurs au niveau des entrées sur le quai, via les escaliers et les escalateurs, ce qui contribue au ralentissement des flux. À l'inverse, les quais latéraux qui offrent plus d'espace n'ont pas ce problème de circulation des flux de passagers. En termes de sécurité sur les quais, les quais centraux et en courbe sont considérés comme étant beaucoup plus dangereux que les quais latéraux sans courbe [FUJ 10][YAM 14][AND 15].

#### 3.3.1.2 L'agencement du quai

La présence de sièges, de colonnes, de tableaux d'informations, d'escaliers, d'ascenseurs et d'escalateurs réduit l'espace libre sur le quai, et l'écoulement du flux de voyageurs. Alors que beaucoup de ces objets sont nécessaires sur un quai, la manière dont ils sont agencés peut plus ou moins réduire la superficie totale et engendrer des parties plus étroites que d'autres sur le quai. Une telle configuration conduit à l'augmentation de la densité de personnes à certains endroits et peut obliger les usagers à se placer trop près du bord du quai. Outre les risques et dangers que présente cette situation, les voyageurs deviennent plus vigilants et se déplacent plus lentement ; ce qui entrave la fluidité des parcours.

### 3.3.1.3 L'aménagement des espaces d'attente et de marche

Plus généralement, l'aménagement des espaces a un effet sur l'écoulement des flux de voyageurs. La littérature rapporte des niveaux de services pour les espaces d'attente et de marche, selon la densité et le flux [FRU 92] [TRB 85] (voir page 46 pour plus de détails). Ces recommandations décrivent l'espacement entre les individus, la vitesse de marche et les arguments sont : plus la densité augmente, plus il est difficile d'éviter le contact avec les autres. Les mouvements deviennent de plus en plus restreints, les déplacements de plus en plus ralentis et les attentes moins plaisantes.

### 3.3.1.4 Agencement à l'intérieur du véhicule

La capacité de transport de voyageurs dépend aussi de la capacité de transport de chaque véhicule. Une solution est la réduction du nombre de sièges dans les véhicules qui accroît cette capacité. De telles solutions ont été étudiées [AGU 08] et les résultats indiquent que les temps d'arrêt sont réduits proportionnellement à la réduction du nombre de sièges. En effet, la réduction des sièges implique plus d'espace libre, facilitant la circulation des personnes à l'intérieur du train et aux interfaces quai-train. Toutefois, la réduction ou la suppression des places assises implique une diminution de la qualité de service et de confort [BAK 07]. En outre, plus de passagers debout impliquent une augmentation des risques d'accident (par exemple, de chute), afin d'atténuer les risques de blessure, les trains sont obligés de réduire leur vitesse avec alors des conséquences sur la capacité du réseau [COX 14].

Par exemple, pour une meilleure répartition des voyageurs, [LAU 05] a étudié l'impact de l'architecture de l'intérieur du train sur les flux voyageurs en faisant varier la disposition et l'orientation des sièges, ainsi que l'architecture des entrées et des couloirs. L'étude a permis des préconisations de conception afin de décourager les usagers de rester près des portes, un comportement qualifié par l'auteur d'effet « sentinelle » (induisant un blocage partiel des entrées), et de les conduire à mieux disposer leurs effets personnels.

S'agissant de la disposition des sièges, il existe deux grands types de dispositions : une disposition longitudinale, parallèlement aux fenêtres (Figure 11), dégageant ainsi l'espace central et permettant une circulation plus rapide des passagers [RUG 08] et une disposition transversale perpendiculairement aux fenêtres. C'est la disposition des sièges la plus fréquente dans les transports de longues distances.



(a)



(b)

Figure 11. Disposition longitudinale (a)<sup>1</sup> ou transversale (b)<sup>2</sup> des sièges.

Les passagers préférant s'installer dans le sens de la marche, puis dans le sens inverse de la marche, mais rarement en position latérale [RUG 08], l'agencement transversal est réservé pour les longs parcours, où la tolérance à l'inconfort est moindre. Toutefois, cet agencement diminue la distance entre les portes et est moins efficace pour la gestion des flux de passagers. Le positionnement longitudinal des sièges est plus adapté à un nombre élevé de voyageurs lors de trajets courts. Tandis que la disposition transversale est plus adaptée à une densité moindre de voyageurs, garantissant un niveau de confort plus élevé, avec moins de risques de blessure à l'intérieur du train, mais perturbant le mouvement des flux dans le cas d'une grande affluence de voyageurs.

### 3.3.1.5 La largeur des portes

Parce qu'elle facilite plus ou moins la sortie et l'entrée des voyageurs, la largeur des portes influence le temps d'échange quai-train et la durée du temps d'arrêt. L'effet de la largeur des portes a été étudié de diverses manières. Par exemple, Fernandez et al. [FER 11] montrent que l'augmentation de la largeur de la porte (de 800mm à 1600mm) permet de diminuer de 40% le temps de descente et de 25 à 45% le temps de montée, un résultat cohérent par le fait que l'augmentation de la largeur de porte permet de faire passer plus de personnes en même temps (Figure 12). Cependant, la diminution du temps de descente et de montée est variable, selon la densité de voyageurs dans les trains et sur le quai.

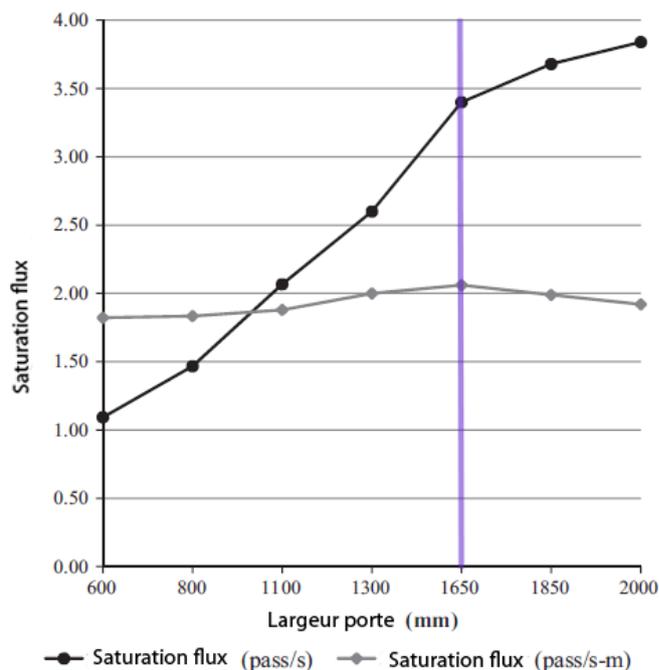


Figure 12. Relation entre largeur des portes et saturation du flux. Selon Fernandez et al. [FER 15], la valeur de saturation des flux de passagers (en p/s \* m) croît avec la largeur des portes jusqu'à ce que celle-ci atteigne une largeur de 165 cm.

<sup>1</sup> © Métro de Sapporo, ligne de métro Toyoho, ligne 9000, intérieur de voiture/ Chuoterminal\_02

<sup>2</sup> © MF2000 tout nouveau, tout beau / <https://patrice.skyrock.com/>

### 3.3.1.6 Le nombre de portes

Le nombre de portes a un effet sur la durée du temps d'arrêt. Dans le manuel « *Qualité de service et capacité de transit* » du *Transportation Research Board* de Washington [TRB 03], il est précisé que la variable la plus importante qui affecte le temps d'arrêt est le nombre de portes : plus le nombre de portes est élevé et plus le temps nécessaire au passage d'un flux de passagers est réduit.

Toutefois, tout comme pour la largeur des portes, l'augmentation du nombre de portes diminue le nombre de places assises puisque les espaces autour des portes doivent être libres pour la circulation des flux. Il faut donc trouver un bon compromis entre le confort du voyageur et le temps d'arrêt du train.

### 3.3.1.7 La courbure de la voie

La courbure de la voie en gare et celle du quai ont un effet sur la durée du temps d'arrêt. Lorsqu'un train est dans une courbe, les extrémités et le centre des voitures sont «jetés» en dehors de l'axe de la voie. La lacune H existante, au niveau de chaque porte, entre le quai et la voiture sera alors fonction de la position de la porte sur la façade de la voiture (voir Figure 13) et la valeur des lacunes horizontales (H) varie selon la courbure de la voie. On s'intéresse à la valeur des lacunes H au niveau des portes car c'est cette distance qui perturbe les mouvements des piétons au niveau des interfaces quai-train. Pour obtenir le meilleur compromis, il est préférable que les portes soient le plus proche des bogies, ces chariots mobiles situés sous le véhicule ferroviaire destiné à s'orienter convenablement dans les courbes, pour affecter le moins possible la valeur des lacunes séparant les portes du train au quai [DEV 12].

On remarque que dans le cas où les portes sont placées tout près des bogies, c'est-à-dire en bleu, et pour des courbures modérées – représenté par l'angle  $i$  – On a :  $X_1 + X_2 \approx (L - E)$  et  $X_1 \approx X_2$  Tel que L représente la largeur de la voie et E représente la largeur du véhicule. Dans le cas où les portes sont placées au milieu du véhicule, représentées en vert, on a :  $X_{m1} + X_{m2} = L - E$ , indépendamment de la courbure.

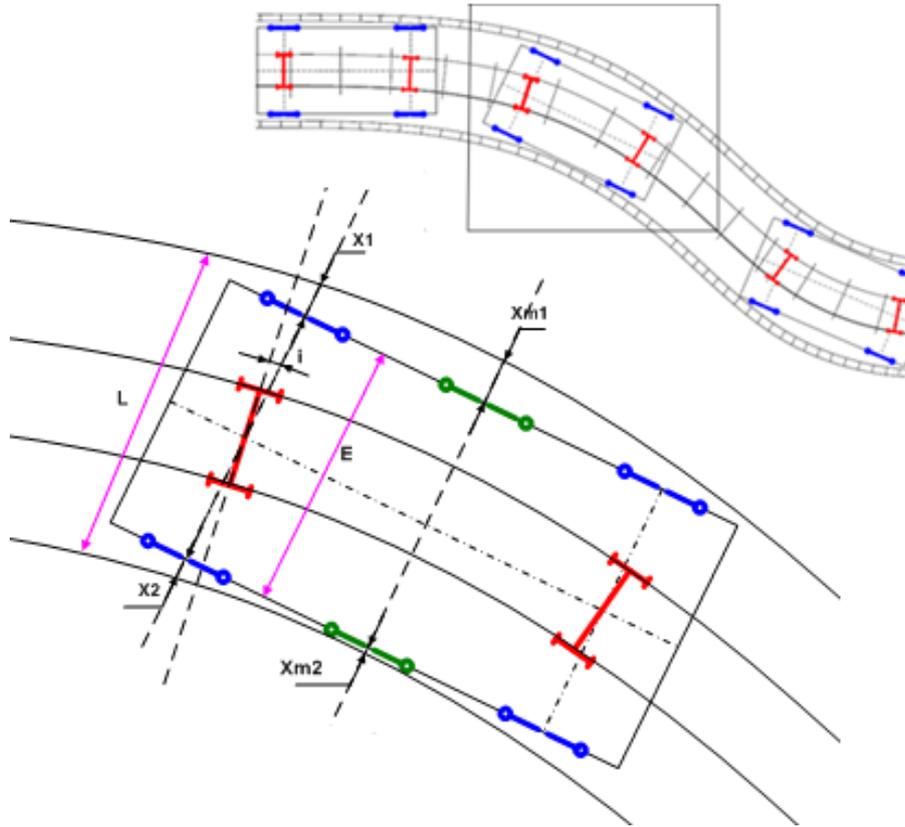


Figure 13. Selon la courbure de la voie, l'effet des lacunes horizontales selon les positions de portes par rapport aux bogies.

En conclusion, la somme des deux lacunes est toujours sensiblement égale à la différence entre la largeur de la voie et la largeur du véhicule. Pour éviter des lacunes très importantes : cas du côté (D), on a intérêt à prévoir des portes situées près des bogies afin d'éviter d'avoir des valeurs extrêmes de lacunes.

### 3.3.1.8 La lacune entre le quai et le train

La taille de la lacune entre le quai et le train a un effet sur la durée du temps d'arrêt. Une étude néerlandaise [DAA 08] a étudié les variations des temps de montée et de descente par rapport aux différentes valeurs de lacunes verticales (V) et horizontales (H) et aux différentes largeurs de portes (Figure 14).



Figure 14. Les lacunes horizontales et verticales. © [TRA 07]

Les résultats montrent la diminution des capacités de passage des portes lorsque les valeurs des lacunes V et H augmentent. Cependant, les valeurs des lacunes qu'elles soient V ou H sont fortement dépendantes d'autres paramètres de l'infrastructure (voie, quai) et du matériel roulant. Par exemple, l'effet de la lacune V va dépendre de la hauteur de la plateforme et de la hauteur du plancher du train et celui de la lacune H du rayon de courbure de la voie qui va varier selon la position des véhicules et la position des portes par rapport aux bogies [HOR 14] [DAN 09]. En outre, le type de la courbure amplifie ou diminue la valeur de la lacune H. Par exemple, pour une voie en courbe concave, plus la porte se rapproche de l'extrémum de la concavité, plus la lacune sera sévère, plus elle s'en éloigne, plus la lacune sera faible, et inversement pour la convexité. En somme, avec une même voiture on pourra être confronté aux différentes situations selon la courbure de la voie mais à des degrés différents en fonction de la localisation.

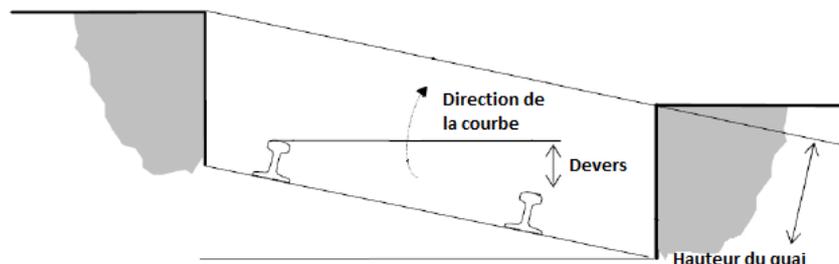


Figure 15. Dévers installé pour une voie en courbe [DEV 12]

Il faut également noter qu'une voie en courbe implique l'installation de dévers (Figure 15) afin de neutraliser les effets des forces latérales et de mieux répartir la charge du train sur les deux rails. Ce qui signifie une élévation du train d'un côté de la voie par rapport à l'autre, entraînant une variation de la lacune verticale (Figure 16). En conséquence, selon ces paramètres, il y a une interdépendance entre les valeurs de lacunes H et V.



Figure 16. Valeurs de lacune H différentes selon le type de courbure [HOR 14]

Atkins Rail [ATK 04] rapporte une étude pour laquelle 120 personnes, comprenant des personnes à mobilité réduite, ont participé aux expérimentations de montées et de descentes de véhicules avec différentes valeurs de lacunes (H-V). L'étude a montré que la distance est acceptable (une dimension d'un pas) lorsque la hauteur de marche du quai additionnée à la largeur de la lacune :  $(H + V)$  ne dépasse pas 200 mm et que la distance de progression de 300 mm est inacceptable en matière d'effort et de sécurité (voir Figure Annexe 1)

### 3.3.2 Facteurs comportementaux humains influant sur le temps d'arrêt

Outre les facteurs techniques, les comportements collectifs et individuels des flux de passagers et spécifiques au contexte ferroviaire, exercent un effet notable sur la variation du temps d'arrêt.

#### 3.3.2.1 Le nombre de montants, de descendants et le taux d'occupation des voitures

Comme attendu, plusieurs études montrent que le nombre de montants et descendants affecte le temps d'échange [LIN 92] [KIT 03] composé en temps de descente et de montée dépendant de la vitesse des usagers à monter et à descendre [SAN 16].

A priori, les usagers attendant sur le quai s'écartent pour faciliter la descente, puis commencent à monter quand le flux de descendants semble être fini. Cependant ce n'est pas toujours le cas, certains usagers ne respectent pas forcément cette règle et se pressent pour entrer dans les voitures (en raison du manque d'indication de la position des portes sur le quai, par peur de rater son train ou par incivilité). Il arrive aussi que des passagers ne se soient pas préparés à la descente (par manque de signalisation, oubli ou distraction) et entreprennent la descente tardivement, ce qui fait que l'on obtient des flux mixtes de voyageurs. Ces flux prolongent alors le temps d'arrêt par rapport au temps d'arrêt avec des flux unidirectionnels. Douglas [DOU 12] montre par exemple qu'un flux mixte (bidirectionnel) de 30 montants et 30 descendants nécessite 40 secondes contre une durée de 25 à 35 secondes pour un flux unidirectionnel de 60 usagers.

Enfin, on peut s'attendre à ce que la durée de la descente soit plus courte que la durée de la montée. Toutefois, il semble que cela ne soit pas toujours le cas. Fernandez [FER 11] qui a étudié le temps d'arrêt de bus lors des échanges de voyageurs montre que le taux d'occupation des voitures affecte aussi le temps d'échange : proportionnellement à l'augmentation de la densité

à l'intérieur des véhicules, le temps de montée augmente linéairement de 0.9 à 2.0 secondes par passager tandis que le temps de descente augmente exponentiellement de 0.6 à 6.0 secondes par passager (Figure 17) ; un résultat déjà trouvé par Lin et Wilson [LIN 92]. En faisant varier la densité à l'intérieur du bus, les résultats indiquent qu'au-dessus d'un certain seuil de densité équivalant à 4 passagers par mètre carré, les passagers montants semblent mettre plus de temps que les descendants. Tandis qu'au-dessus de cette densité, la situation s'inverse : les usagers dans le train ont alors du mal à atteindre les portes à cause de la congestion à l'intérieur du véhicule.

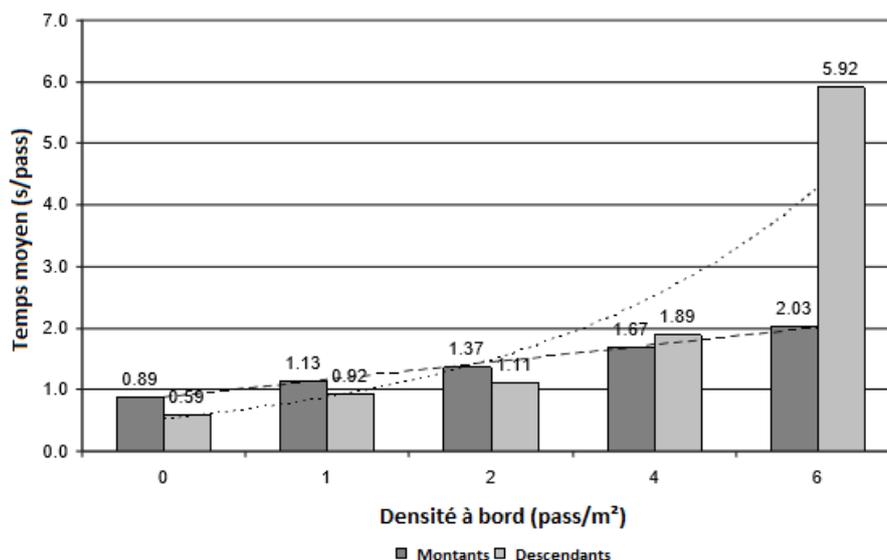


Figure 17. Temps de montée et de descente selon la densité à bord [FER 11]

Dans les travaux de Fernandez et al. [FER 11], les effets sur les temps de passage, de trois variables déjà évoqués ont été contrôlés: la hauteur de la lacune (0, 150 et 300 mm), la largeur de la porte (étroite à 800mm et large à 1600 mm) et le mode de paiement (prépaiement à l'extérieur du véhicule ou à l'entrée du véhicule).

Indépendamment de la lacune, les bus à portes larges réduisent le temps de descente de près de 40%, tandis que pour le processus d'embarquement, le temps d'embarquement est réduit de 10 à 35% (paiement à bord) et de 25 à 45% (paiement anticipé), voir Figure Annexe 2.

### 3.3.2.2 Les usagers avec bagages<sup>3</sup>

En général, les usagers ayant des bagages ralentissent les flux et la fluidité des parcours, surtout pendant les échanges quai-train. L'effet de la présence de bagage sur la capacité des passages au niveau des portes a été étudié [DAA 08] et il a été montré que cette capacité diminue jusqu'à 25%. L'interaction entre les valeurs des lacunes horizontales et verticales, et le nombre et l'encombrement des bagages a été étudiée. Pour des valeurs de 5 cm en lacunes horizontales et verticales pour des usagers sans bagage, la capacité de passage au niveau des portes est de 91% tandis que pour les usagers avec bagage, elle décroît à 69 %. Il est trouvé, en outre, un effet intéressant : pour des petites lacunes verticales, la capacité de passage au niveau des portes croît

<sup>3</sup> Les usagers avec des poussettes à bébé ont également une influence manifeste sur les flux à la fois du fait de leur encombrement et de la plus ou moins grande facilité à monter ou descendre du train ou du bus. Ce phénomène plutôt récent n'a pas encore été étudié scientifiquement.

avec l'augmentation des lacunes horizontales pour les voyageurs portant des bagages. Autrement dit, pour les petites lacunes verticales de 5 cm et pour les usagers portant des bagages, la capacité des portes augmente légèrement à 73% quand les lacunes horizontales augmentent de 5 cm à 30 cm.

### 3.3.2.3 La densité de voyageurs sur le quai

Dans son étude, Lau [LAU 05] étudie les effets de la densité, de la distribution de personnes sur le quai et sur la connaissance préalable de la position des portes à l'arrivée du train ; ce qui peut ralentir les descentes si les personnes présentes sur le quai sont mal positionnées et ne s'écartent pas pour favoriser la descente. Wiggeraad [WIG 01] rapporte que les passagers se positionnent majoritairement autour des entrées, et s'interroge quant aux motivations des passagers en relation avec la charge de train. Plus récemment, Kim et al, [KIM 14] ont analysé les raisons pour lesquelles les usagers se positionnent sur le quai; ce qui fait varier la distribution tout au long du quai. Les résultats montrent que le choix de positionnement de la majorité des usagers (76.6%) est en fonction de la voiture dans laquelle ils vont monter. Le choix de la voiture est pour 69.7% des usagers, lié à la volonté de minimiser la distance qu'il y aura entre la voiture et la sortie de leur gare de destination. Pour 16.6% des cas, il s'agit de minimiser la distance par rapport à l'entrée de la gare de départ ; préférant rester à côté des entrées. Pour 13.5%, il s'agit d'avoir du confort pendant leur trajet.

Ces stratégies de placement sur le quai peuvent conduire à une densité importante de personnes sur une ou plusieurs parties du quai. Etant donné, que le temps d'arrêt en gare dépend du temps d'échange quai-train [DAA 08], une forte densité au niveau d'une seule porte peut prolonger le temps d'arrêt ; ce que n'aurait pas occasionné une distribution de ces personnes le long du quai. Il est donc important d'explorer la question de la distribution des personnes sur le quai et les mesures qui peuvent être prises pour éviter une difficulté d'accès à certaines portes tandis que d'autres sont libres.

### 3.3.2.4 La navigation horizontale et verticale

Dans des espaces comme les gares (ou les centres commerciaux), il existe des déplacements de deux types : (i) les déplacements horizontaux (i.e. d'un point A vers un point B sur un même plan) et les déplacements verticaux (i.e. de l'escalier vers le quai). Pour les mouvements de piétons dans les gares, il s'agit de choix d'itinéraire à la fois horizontaux et verticaux [CHE 98].

A cet égard, la grande majorité des grandes gares disposent de plusieurs entrées sur le quai accessibles à travers un étage (en dessous ou en dessus). Ce qui implique des déplacements verticaux. Comme on a évoqué précédemment, les mouvements sur le quai peuvent être en lien avec des stratégies de positionnement sur le quai [KIM 14]. Néanmoins, une partie de cette stratégie de positionnement peut être exercée au niveau de l'étage (i.e. à cause d'espace plus grand, d'une densité moins importante), voire même d'être influencé par l'architecture de cette dernière (i.e. préférence des escalators). Dans ce cadre, l'étude du pré-positionnement au niveau du quai, n'est pas totalement indépendante de l'architecture et de l'agencement de l'infrastructure qui mène au quai.

**Le déplacement horizontal :** pour ce qui est du déplacement horizontal, Daamen et al. [DAA 05] présentent plusieurs facteurs dans le choix d'itinéraire:

- Caractéristiques du réseau [SEN 85] :
  - Nombre d'options possibles : l'une des caractéristiques les plus importantes est le chevauchement entre les itinéraires.
- Caractéristiques des chemins [SEN 85] [VER 97] [BOV 12] [CRO 98] :
  - Distance : les usagers choisissent le chemin le plus court
  - Nombre d'attraction sur le chemin et son agréabilité. Plus la route est attractive, plus le facteur temps perd de l'importance.
  - Protection contre les événements météo. Ces facteurs ne sont pas évalués comme étant importants.
- Caractéristiques individuelles [SEN 85] [VER 97] :
  - Genre : pas de différence significative selon le genre dans le choix d'itinéraire.
  - Âge: différence significative entre les groupes d'âge.
- Caractéristiques du trajet [SEN 85] [VER 97] [CRO 98] :
  - Objectif: l'objectif peut définir l'itinéraire. Par exemple. Le paysage est très important pour les voyages de loisirs, mais il ne joue aucun rôle dans les déplacements à pied liés au travail.

Daamen et al. [DAA 05] expose aussi la question de la densité en se reportant aux travaux de Helbing [HEL 97] sur la question. Il affirme que « même si la progression sur une route directe est relativement lente (jusqu'à environ  $\frac{3}{4}$  de la capacité disponible), le choix d'une route plus longue reste rarement choisis ».

**Le déplacement vertical :** concernant le déplacement vertical, les piétons considèrent non seulement le temps de trajet et la distance de marche les plus courts, mais également les efforts nécessaires pour gravir une pente. Cheung et Lam [CHE 98] proposent d'investiguer les mouvements des passagers dans les escaliers et les escalateurs dans les deux sens ascendants et descendants.

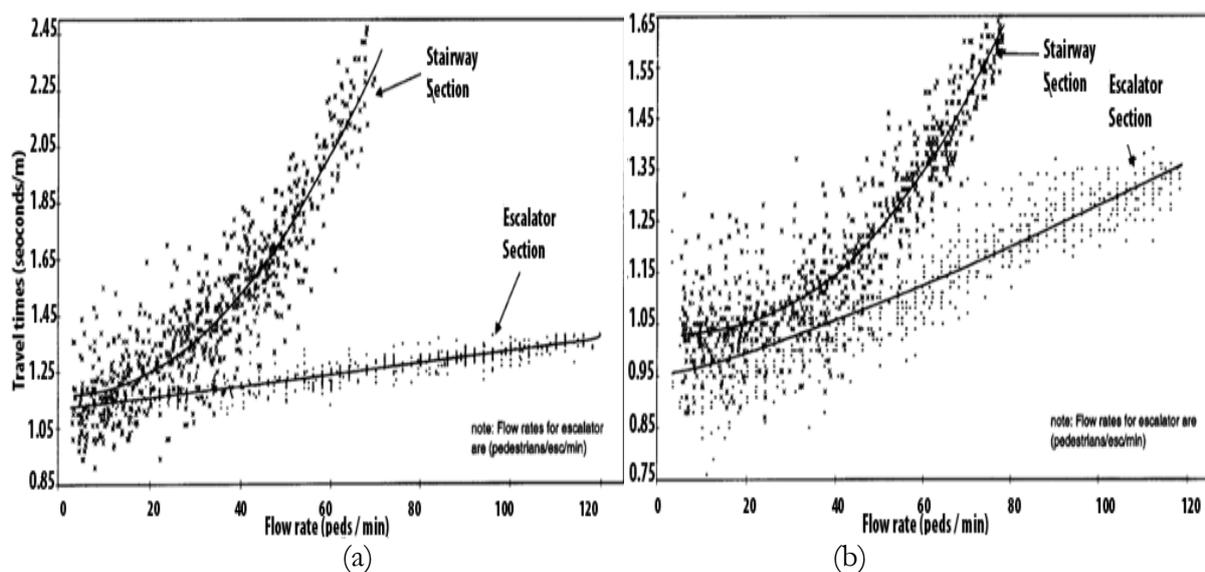


Figure 18. Mesures des flux (piétons/minutes) sur l'axe X est le temps de trajet (secondes/m) sur l'axe Y. (a) présente les données pour le sens ascendant et (b) le sens descendants.

Pour la Figure 18, (a) et (b) les piétons sont libres de contrôler leur vitesse de marche lorsque les flux de piétons sont faibles. En effet, les vitesses sont moins uniformément réparties. Lorsque le flux de piétons est élevé, les piétons sont moins libres de contrôler leurs vitesses.

Quand la densité est faible, les vitesses de marche dans le sens descendant sont supérieures à celles du sens montant. En effet, les piétons se comportent différemment selon le sens. Ils sont plus sensibles au facteur temps dans le sens descendant qu'ascendant, car l'effort à fournir dans le sens descendant est perçu comme moindre que dans le sens ascendant. En d'autres termes, avec le même temps requis pour les déplacements verticaux, le pourcentage de piétons utilisant des escaliers dans le sens descendant devrait être supérieur à celui dans le sens ascendant. Les résultats sont cohérents avec des études précédentes [FRU 87] [DAL 91] [LAM 95]. Et l'on remarque que pour les deux sens, la vitesse associée aux escalateurs est naturellement diminuée par rapport aux escaliers avec des capacités de flux nettement plus grandes.

**Moindre sensibilité au facteur temps selon le sens du déplacement vertical** : par ailleurs les auteurs [CHE 98] présentent des faits intéressants en conclusion, sur les choix faits entre les escaliers et escalateurs en prenant en compte le rapport temps/effort : 85% des piétons sont prêts à utiliser un escalateur lorsque le retard relatif atteint jusqu'à 7,8 secondes dans le sens descendant, contre 17,4 secondes acceptables pour le sens ascendant.

**Choix quand les escaliers et escalateurs sont adjacents** : Zhang et al. [ZHA 15] rapportent qu'il subsiste une forte préférence pour utiliser l'escalateur dans la direction ascendante mais pas d'effet significatif pour la direction descendantes.

**Choix quand les escaliers et escalateurs ne sont pas adjacents** : Zacharias & Ling [ZAC 15a] posent la question concernant le scénario suivant : séparer l'escalier de l'escalateur augmenterait-il l'utilisation de l'escalateur ? Les auteurs présentent deux modèles linaires des montants et des descendants dans lequel les variables suivantes sont présentées : (i) volume de flux, (ii) distance séparant l'escalier de l'escalateur et (iii) la hauteur de l'étage. Pour le modèle ascendant, ces variables contribuent à 71% au modèle ascendant ( $R^2=0.71$ ) et 24% pour le modèle descendants. Dans ces deux modèles, la distance entre l'escalier et l'escalator, est associée à une pente positive tandis que la hauteur est associée une pente négative. Ceci veut dire que plus la distance entre l'escalier et l'escalateur est importante, plus cela renforce préférence de l'escalier. Plus la hauteur augmente, plus la préférence de l'escalier diminue. De plus, une augmentation de 100% de la distance entre un escalier et l'escalateur le plus proche augmente de 95% la probabilité de monter les escaliers.

**Les capacités en lien avec la proxémie et la corpulence** : Lam et al. [LAM 95] ont étudié les caractéristiques des flux de piétons dans diverses installations de Hong Kong et ont indiqué que la capacité de l'escalier du MTR était de 71 passagers /m/min dans le sens ascendant, et de 77 passagers /m/min dans le sens descendant. Cette capacité importante peut en partie s'expliquer par la notion de proxémie [TAN 86] et la corpulence dans le pays étudié.

**La perception visuelle :** d'autres variables sont impliquées, par exemple, il y a une tendance à l'utilisation d'escaliers lorsque ceux-ci étaient nettement plus visibles [EVE 08a] [DOL 06].

**Mimétisme comportemental :** des études rapportent des effets de mimétisme dans les choix escaliers-escalateurs (i.e. les piétons auront plus tendance à utiliser les escaliers si en arrivant ils remarquent les autres le faire) [WEB 11].

**La largeur des escaliers :** Eves et al. [EVE 08b] rapportent qu'en doublant la largeur des escaliers, pourrait entraîner une augmentation atteignant les 17.2% de l'utilisation des escaliers.

**Les incitations et leurs implications sur les comportements des piétons :** dans des travaux récents Zacharias & Ling [ZAC 15a], étudient les choix des usagers par rapport aux types escaliers et escalator, à Montréal. L'étude a testé l'hypothèse selon laquelle la séparation de l'escalier et de l'escalator augmenterait le taux d'utilisation de l'escalier. Ce cas d'étude a été réalisé dans un centre commercial. Il est important de rappeler une motivation importante créée par les médias et les professionnels de santé, qui est en partie le contexte de cette étude : lutter contre le mode de vie sédentaire en prenant des mesures quotidiennes comme marcher, faire du vélo est prendre les escaliers [WWO 10]. Cette incitation est telle que suit : « *Prenez les escaliers au lieu de l'escalateur ou de l'ascenseur* ». Voir Figure 19.



Figure 19. (a) Passage souterrain qui relie la station *Dhoby Ghaut* de la ligne nord-est de à la ligne nord-sud - *Singapour*<sup>4</sup> (b) Brûler des calories et non de l'électricité ; affiche incitative pour la prise des escaliers – *New York*<sup>5</sup>

Par exemple, parmi les méthodes d'incitation dans le souterrain *Dhoby Ghaut* (Figure 19a), les déplacements des passagers génèrent de la musique. De plus, sont affichés des messages d'incitation de faire au moins 10.000 pas par jour. Un autre exemple, à Barcelone, au niveau du *Passeig de Gracia* est affiché sur les escaliers « *7 minutes d'escalier par jour protègent votre cœur* ». Les exemples sont très nombreux et ces campagnes sont les résultats d'une étroite collaboration entre les autorités de la santé, de conception, de construction, de l'urbanisme et des transports.

Plusieurs études confirment le pouvoir de l'incitation à opter à un comportement plus qu'un autre dans ce type de contexte [DOL 06][EVE 09].

**Réplication et étude comparative :** l'étude de Zacharias & Ling [ZAC 15a] a fait l'objet de réplication, en Chine [ZAC 15b]. Les auteurs concluent que séparation des escaliers et des

<sup>4</sup> © DDB et MEC Singapore.

<sup>5</sup> © <https://www1.nyc.gov/>

escalateurs augmente efficacement l'utilisation des escaliers à Beijing, représentant 29% de la variance de l'utilisation des escaliers, contre 43% à Montréal. A Montréal, la distance a moins d'effet sur le taux d'utilisation des escaliers en descente. Dans l'ensemble, 25,4% des habitants de Beijing ont opté pour les escaliers lorsqu'ils montent, contre 20,3% pour les Montréalais et 32,8% et 31,1% pour la descente, respectivement. Ceci montre l'effet de la distance sur la prise de décision quant à l'utilisation des escaliers et des escalateurs.

**Exemple de modèle proposé :** à la lumière de ces connaissances sur les composantes architecturales et leurs influences, Daamen et al. [DAA 05] proposent un modèle de l'utilité de la route  $r$  en fonction des éléments niveau, escalateur, escalier, rampes et taille du chemin. Ce modèle a un coefficient de détermination  $R^2 = 0.76$ .

$$U_r = -0.130 T_r^l - 0.242 T_r^{st} - 0.167 T_r^{esc} - 0.178 T_r^{ramp} + 3.181 PS_r + \varepsilon_r$$

$U_r =$  Utilité de la route  $r$

$T_r^l =$  Temps de trajet dans l'élément niveau de l'infrastructure qui est une partie de la route  $r$

$T_r^{st} =$  Temps de trajet relatif aux escaliers dans la route  $r$

$T_r^{esc} =$  Temps de trajet relatif aux escalateurs dans la route  $r$

$T_r^{ramp} =$  Temps de trajet relatif aux rampes dans la route  $r$

$PS_r =$  Taille du chemin de la route  $r$

Dans ce modèle, tous les paramètres liés au temps de marche sont négatifs, indiquant la désutilité de marcher sur ces types d'infrastructures. Marcher sur un élément de niveau (quai, passerelle, couloir, étage) a la plus faible désutilité, indiquant que lorsque les passagers peuvent choisir, ils préfèrent les éléments de niveau par rapport aux éléments non-niveau. Comparant les différents types d'infrastructures, les escaliers ont le plus de désutilité que les escalateurs et les rampes. Les escalateurs et les rampes sont presque évalués de la même manière. Les escalateurs sont légèrement plus préférés.

Les auteurs proposent une comparaison quantitative, à travers laquelle, le temps de marche sur une infrastructure spécifique est comparé au temps de marche sur un élément de même niveau. Par exemple, le temps de marche dans les escaliers a une désutilité unitaire de 1,87 fois de celle de marcher sur un élément de niveau. Pour les escalateurs et les rampes, une seconde de temps de marche équivaut à environ 1,3 s de marche sur un élément plat. Les auteurs rapportent aussi que pour tous les types d'infrastructures, les paramètres de la montée sont plus négatifs que ceux de la descente, ce qui indique que les passagers ont plus de mal à marcher vers le haut que vers le bas. Ceci est conforme aux conclusions de Cheung et Lam [CHE 98].

D'autres modèles sont proposés comme celui de Srikuenthiran et al. [SRI 13], et bien d'autres.

**Implications :** ces observations soulèvent un fait important ; pour les personnes souhaitant minimiser l'effort en prenant l'escalator, et à minimiser la distance par rapport à l'entrée de la gare de départ ; ceci peut conduire à divers problèmes :

- Sur le quai : l'agglutination au niveau des zones de sorties des escaliers / escalateurs préférés

- Sur l'escalier / escalateur : une concentration de la charge de flux majoritairement sur l'entrée préférée. Cette sur-sollicitation peut causer des pannes fréquentes. Elle cause, en plus, la diminution de l'exploitation des capacités respectives aux entrées, par conséquent de la capacité du train.

### 3.3.2.5 La distribution dans le train

Les passagers disposent de préférences propres une fois rentrés dans le train. Berkovich et al. [BER 13] ont observé des comportements récurrents des passagers debout et assis, dans le métro de New York :

- Une claire préférence pour les sièges adjacents aux portes.
- Pas de préférence particulière aux sièges adjacents aux barres de maintien.
- Pour les voitures contenant une disposition de sièges transversale, il existe une préférence pour les sièges à côté des fenêtres, puis à côté du couloir et enfin ceux du milieu.
- Plusieurs études rapportent que les dispositions 2+3 sont universellement mal acceptées [SAW 09]. Certains passagers rapportent même qu'ils préfèrent rester debout plutôt que de s'asseoir au milieu. La résistance des passagers à s'asseoir au milieu a bien été argumentée [BAG 96].
- Une préférence presque égale des sièges en contre-sens de la marche et ceux dans le sens de la marche.
- Plus le taux d'occupation augmente, la chance de rester debout est plus grande pour les hommes que les femmes.
- L'utilisation des sièges au-delà de 90% est achevée à 120% du taux d'occupation total.
- Les passagers qui restent debout préfèrent majoritairement rester au niveau de la plateforme d'entrée du train en s'accrochant aux barres verticales.
- Les portes, en soi, sont des zones d'accueil pour 2 à 3 personnes selon la position de leurs corps (latérale versus de face).
- Les conditions météorologiques peuvent influencer le comportement des passagers : (a) lorsqu'il fait chaud, les passagers sont plus susceptibles de se placer au milieu du véhicule afin de s'approcher de l'air frais des climatiseurs (b) lorsqu'il fait froid, de s'asseoir le plus loin possible des portes (c) lorsque les conditions sont sévères, les passagers peuvent attendre les trains à l'abri des entrées aux quais.

### 3.3.2.6 Le déséquilibre de charge inter-véhiculaire

Lau et al. [LAU 05] rapportent que les véhicules centraux sont plus chargés (en moyenne de 20 à 25% en plus) que la charge moyenne de tout le train (conditions : heure de pointe du matin, en direction de l'ouest dans la ville de *Colma / Daly*).

Selon le *TCQSM (Transit Capacity and Quality Service Manual)* [TCR 13], la différence de charge entre les voitures se situe entre +61% et -33% par rapport à la moyenne de la charge de passagers dans le *Vancouver SkyTrain*, et peut fluctuer jusqu'à +156% à -89% dans *Toronto's Yonge Street*. De plus, l'étude conduite par Kim et al. [KIM 14] montre une différence de charge qui varie entre +118% et 90% pour le *Seoul Metro* de la ligne 7 en Corée du Sud, durant l'heure de pointe du matin.

Ce déséquilibre de charge peut être sujet à des comportements qu'on peut qualifier d'auto-organisation. L'augmentation de la charge véhiculaire implique pour un passager peu de chance de trouver une place assise. Les passagers instaurent certaines stratégies de substitution pour l'obtention de place assise comme la sélection du véhicule le moins occupé [KIM 14], ou le choix de monter à l'extrémité d'un train et de le parcourir jusqu'à trouver une place [PEP 03].

### 3.3.2.7 Blocage des portes

Certains comportements des passagers, tels que le blocage délibéré des portes, ont un effet préjudiciable sur la maîtrise des temps d'arrêts et les horaires de service [COX 10].

### 3.3.2.8 L'expérience de la foule dans les transports

L'étude de Thompson et al. [THO 11] identifie divers facteurs qui influencent le comportement de la foule (Figure 20).



Figure 20. Thompson et al. [THO 11] Facteurs d'influence sur le comportement de la foule

## 3.3.3 Méthode expérimentales

### 3.3.3.1 Etudes comparatives

Lau et al. [LAU 05] testent plusieurs configurations de sièges et de portes afin de trouver le bon équilibre entre la capacité de places assises et la capacité de places debout tout en essayant de maximiser la capacité. Il s'agit de réorganiser l'architecture de l'intérieur du train tout en maintenant un bon niveau de qualité de service.

La différence entre plusieurs organisations et types de sièges, est plus prononcée quand le nombre de personnes par m<sup>2</sup> est faible. En effet, certaines configurations augmentent la capacité de passagers totale alors que d'autres la diminuent. Cependant, ces valeurs de capacités tendent à converger vers les mêmes valeurs quand le nombre de personnes par m<sup>2</sup> atteint son maximum

montrant que dans des situations très denses, une valeur seuil de capacité est atteinte indépendamment de l'architecture du véhicule (Figure 21).

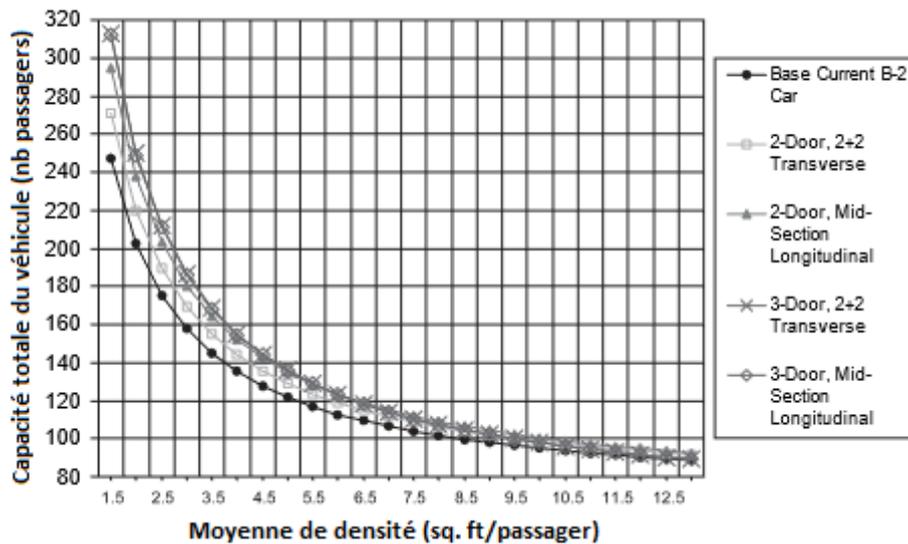


Figure 21. Moyenne de densité par organisation du véhicule [LAU 05]

Les chercheurs du *Washington Metropolitan Area Transit Authority* ont observé les mouvements des passagers dans des voitures aménagées et les ont comparé avec l'aménagement original [WAS 05], et ceci à travers l'étude d'images vidéo. Une nouvelle architecture hybride a été conçue comportant plus d'espace autour des portes et quelques sièges longitudinaux (Figure 22) [ALP 10]. La conception à 100% sièges longitudinaux a été abandonnée pour des risques possibles (i.e. chute), malgré le gain en capacité qu'offre cette conception (Figure 22 a.b).

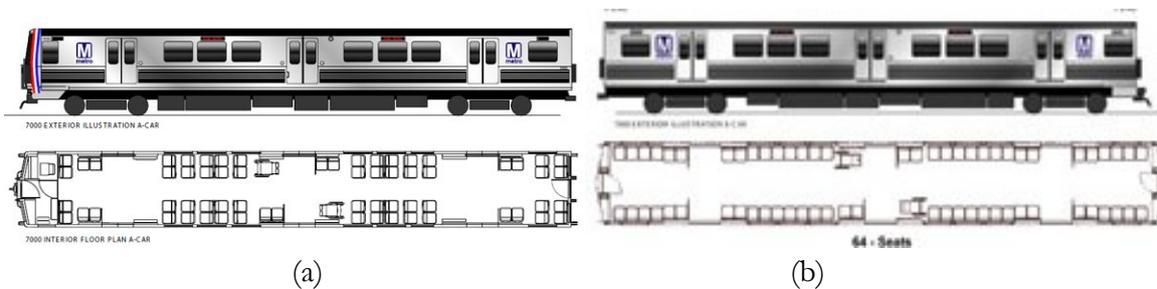


Figure 22. Architecture hybride proposée qui augmente la capacité d'un véhicule et assure la sûreté à bord.

### 3.3.3.2 Analyse vidéo

Lau et al. ont évalué la charge véhiculaire grâce aux enregistrements vidéo CCTV (*Closed Circuit TeleVision*) [LAU 05]. Les chercheurs du *Washington Metropolitan Area Transit Authority* ont également utilisé des enregistrements vidéo pour comparer la configuration nouvelle et originale et ses effets sur les mouvements des passagers. De même, Cheung & Lam [CHE 98] ont utilisé les enregistrements vidéo pour la compréhension des choix des usagers (ascendants ou descendants) quant à la prise d'escaliers ou d'escalateur ainsi que la quantification du débit des flux pour chacune, et ceci dans les stations de *Hong Kong Mass Transit Railway (MTR)*.

### 3.3.3.3 Recueil de données sur place

Berkovich et al. [BER 13] ont distingué les critères des sélections de sièges et les ont quantifiés. Ils ont recueilli des données sur la position des usagers via un formulaire pour chaque voiture. La position assise ou debout de chaque client a été enregistrée, ainsi que les données démographiques observables. Les données ont été recueillies sur plus de 60 véhicules. Ces données ont permis d'inférer des préférences en corrélation avec le niveau de remplissage du train.

De même, des opérations de comptages manuelles se font afin d'estimer la charge dans les véhicules. Les avancées technologiques comme le WI-FI et le Bluetooth sont des nouveaux moyens pour le comptage des passagers mais, actuellement, ne constituent pas une méthode qui peut être systématiquement déployée. En revanche, les systèmes de bus disposent d'un système de comptage automatique de passagers avec un haut niveau de précision (*APC : on-board Automatic Passenger Counting*) [JIA 15].

La SNCF est en cours de réalisation d'un projet analogue sur la gare intelligente, nommé « *Smart Gare* ».

### 3.3.3.4 Données de validation :

Les données origine-destination sont des données de traçabilité de validation de carte magnétique (i.e. *Carte Navigo*) lors de l'entrée et, éventuellement, de la sortie de la gare. Ces données sont d'une grande utilité, dans l'estimation du nombre de personnes qui empruntent une gare ou une ligne. Elles servent à identifier les gares les plus fréquentées en fonction du temps. A partir des validations aux *portiques de contrôle automatique (CAB)*, il est possible d'inférer le chemin emprunté pour atteindre un endroit en gare. Grâce à ce type de données, Jia et al. [JIA 15] ont développé une application permettant de mieux investiguer les déplacements à l'intérieur de la gare.

### 3.3.3.5 Simulation

#### 3.3.3.5.1 A échelle réelle

Fernandez et al. ont conduit des études sur une maquette taille réelle d'un bus (Figure 23) pour la société *Transantiago*. L'avantage de ces méthodes de simulation est de pouvoir faire varier certains paramètres pour en étudier les effets ; ce qu'il est difficile de faire dans l'environnement réel. Ces maquettes ont servi, par exemple, à tester différentes largeurs de porte et d'en inférer la largeur optimale et utile d'une porte (Figure 12) [FER 15] et de relier les temps de montée et de descente à la densité à bord du train (Figure 17) [FER 11].

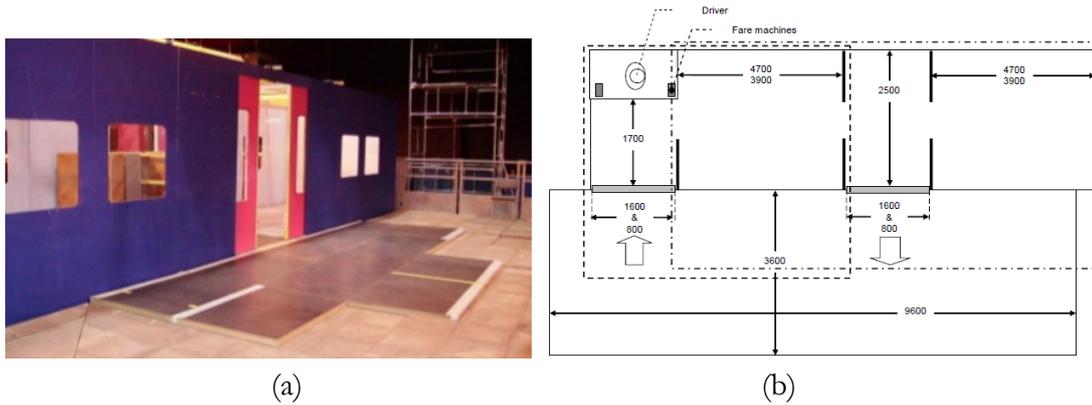


Figure 23. PAMELA - *Pedestrian And Movement Environment Laboratory* – (a) Vue de l'extérieur (b) agencement interne et externe, Fernandez [FER 11]

### 3.3.3.5.2 A échelle virtuelle

Autre exemple, dans une étude conduite au Japon [YAM 13], une autre méthode basée sur un modèle et une simulation multi-agents a été utilisée. Elle vise à prédire les comportements des voyageurs en fonction de différentes largeurs de portes et différents taux de congestion. Les résultats montrent un gain de 3 secondes sur le temps d'échange, lorsque la largeur de la porte passe de 1300 mm à 1800 mm, avec un taux de congestion<sup>6</sup> de 100%. En effet, plus une entrée est large et plus le flux de personnes (exprimé en Personnes(p) / Seconde (s)\* Mètre (m)) est important, plus la durée des échanges est réduite. Notons toutefois que des portes plus larges font augmenter les durées d'ouverture et de fermeture des portes, qui sont également incluses dans le temps total d'arrêt des trains à quai.

Ahn et al. [AHN 16], proposent de tester plusieurs scénarios hypothétiques sur la distribution des passagers sur le quai, et ceci à travers un système multi-agents. La modélisation prend en compte 3 types de prise de décision (1) calcul de choix de portes selon l'entrée sur le quai et par rapport aux portes du train de la zone (2) désignation des portes de devant pour les montants et des portes arrière pour les descendants (3) positionnement des passagers par rapport à l'information train.

Dans une autre étude, Thompson et al. [HIR 11] utilisent un exercice de remplissage de siège par écrit (*carriage-filling exercise*) durant lequel le participant est encouragé à expliquer pourquoi il avait choisi cet endroit spécifique dans la voiture (Figure 24).

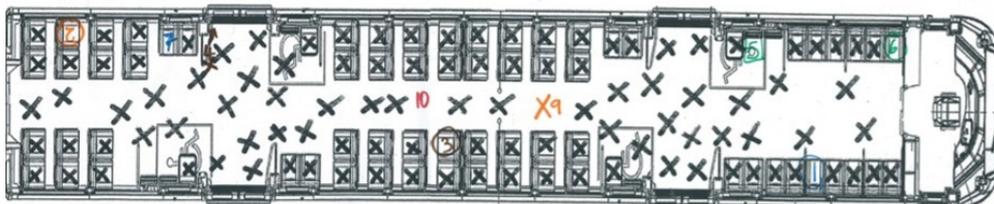


Figure 24. Recherche expérimentale sur les raisons de choix de positionnement dans le train [HIR 11]

<sup>6</sup> Le taux de congestion est défini à travers le nombre de personnes présentes dans une superficie donnée par rapport au nombre de personnes autorisé et prévu théoriquement.

### 3.3.4 Contre-mesures prises pour la fluidification

Lau et al. [LAU 05] note que les sociétés de transports ont rarement recours à des changements radicaux concernant ce que les passagers sont prêts à tolérer : au lieu de cela, de tels changements sont venus progressivement. Nous présentons dans ce qui suit quelques contre-mesures prises et énoncées dans la littérature. Ces contre-mesures peuvent nous servir à deux niveaux : (i) identifier des comportements réactionnels à ces contre-mesures (ii) s'inspirer de ces contre-mesures et des résultats pour les conceptions futures des gares.

#### 3.3.4.1 Changement au niveau des portes et de la configuration interne

Parkinson et al. [PAR 96] rapportent qu'élargir les portes n'est pas une mesure aussi efficace que d'en avoir plusieurs. Les auteurs démontrent que les portes prévues pour faire passer deux flux se transforment en porte faisant passer qu'un seul flux. Il faudrait au moins 72 à 96 inch (1828 à 2438 mm) pour faire passer trois ou quatre flux c'est pour cela que BART (*California's San Francisco Bay Area Rapid Transit District*) a opté pour l'installation de plusieurs portes.

Par exemple, à Tokyo, *JR East* a introduit des voitures de six portes sur sa ligne de train de *Yamanote* (Figure 25), avec des bancs escamotables pour trois personnes qui se replient automatiquement en position verticale pendant la période de pointe pour maximiser la capacité [RAI 04].

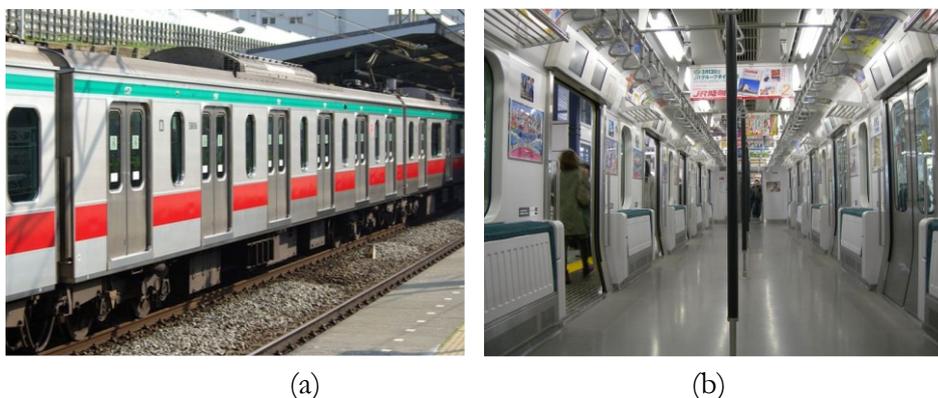


Figure 25. Train de la ligne Yamanote (a)<sup>7</sup> à 6 portes par véhicule (b)<sup>8</sup> sièges repliés

Au cours des 25 dernières années, *Kowloon-Canton Railway Corporation East Rail*, société de transport en commun à Hong Kong qui effectue près d'un million de voyages par jour, a reconfiguré ses sièges de 2+3 transversaux à 2+2 transversaux (Figure 26), plus récemment, en sièges longitudinaux (OA Tomeh, document non publié, 2000). La différence entre sièges longitudinaux et transversaux est présentée dans la Figure 11.

<sup>7</sup> © Tokyu série 5000 6 voitures (5806) / Yaguchi

<sup>8</sup> © Intérieur d'une voiture à 6 portes avec sièges repliés EMU SaHa E230-500 de la série JR East Yamanote Line E271-500 /Rsa

A New York, Berkovich et al. [BER 13] ont suggéré d'améliorer l'agencement de l'intérieur des trains pour réduire l'encombrement à proximité des portes. De même, l'agencement de l'intérieur du train a été investigué par le *Chicago Transit Authority (CTA)* [OMA14].

Lau et al. [LAU 05] recommandent 18 inch (45,72 cm) pour les sièges transversaux afin d'avoir de plus petits sièges et un couloir plus large pour les personnes debout. Ceci peut permettre de faciliter le déplacement à l'intérieur des couloirs.



(a) (b)  
Figure 26. Configuration de l'intérieur d'un véhicule (a) 2+2 et (b) 2+3<sup>9</sup>

#### 3.3.4.2 La lacune

Le *FRA manual on Managing Gap Safety* [FED 07] a évoqué les comble-lacunes comme des solutions potentielles pour diminuer les effets des lacunes. Les comble-lacunes sont des parties mobiles qui sont automatiquement mises en place lorsque le train s'arrête (Figure 27). D'autres tentatives de sensibilisation par des affichages, aux risques liés à l'espacement (Figure 28) ont été réalisées.



Figure 27. Comble-lacune (Z50000) - France

---

<sup>9</sup> © SNCF – Blog du RER C



**Prenez garde  
à l'espace** entre le quai  
et le train dans certaines  
stations en courbe.

Figure 28. Sensibilisation par rapport à la lacune – RATP – France

### 3.3.4.3 L'équi-répartition sur le quai et de la charge inter-véhiculaire

Ahn et al. [AHN 16] proposent un système d'information voyageur (*PIS : Passenger Information System*) qui affiche les niveaux d'occupation des voitures, pour les passagers en attente du train, et ceci avant son arrivée. Le système proposé influe sur le processus de prise de décision des passagers quant à l'attente sur la plate-forme en leur permettant de prendre en compte le taux d'occupation de chaque véhicule. Les participants se montrent assez réceptifs face à cette idée proposée « *Est-ce que vous vous repositionnez pour atteindre un véhicule de taux d'occupation plus bas ?* ». Les réponses étaient 37% très probable, 39% probable, 16.5% neutre, 5.2% peu probable et 2.1% très peu probable.

Les compagnies ferroviaires ont conscience de la relation entre la distribution sur le quai et son impact sur la charge véhiculaire. La SNCF a instauré une politique d'incitation des passagers à se répartir sur toute la longueur du quai. C'est parmi, l'une des directives données par les régulateurs de flux (personnes en charge de réguler les flux sur le quai, voir Figure 29)



Figure 29. Régulateurs de flux en gare du Nord<sup>10</sup>

De même, la RATP déploie aussi le même type d'incitation à travers les régulateurs de flux et des indicateurs sur le sol du quai (Figure 30).

<sup>10</sup> © Transilien : les dessous de l'heure de pointe à Gare du Nord / SNCF

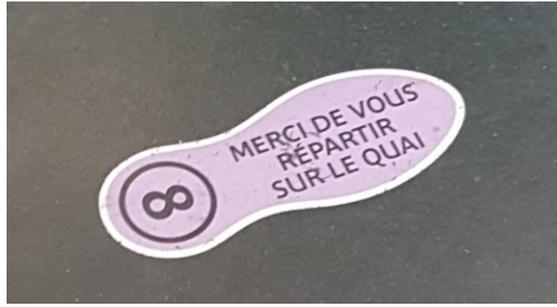


Figure 30. « Merci de vous répartir sur le quai » – RATP – Ligne 8

#### 3.3.4.4 L'équi-répartition par type de siège

Pour encourager les clients à occuper des sièges du milieu, certains véhicules de la *MBTA* (*Massachusetts Bay Transit Authority*) qui opèrent à New York et au Connecticut, ont installé des sièges de 3 + 2 avec le siège du couloir plus petit et sans repose-tête et ceci afin d'encourager les clients à occuper les sièges intermédiaires en premier (Figure 31).



Figure 31. Minimiser le confort siège couloir afin de maximiser l'occupation du siège milieu [BER 13]

#### 3.3.4.5 Concevoir des quais plus larges

Certaines compagnies de transports disposent de gare avec des quais centraux très larges ce qui fait réduire fortement la densité dans ces derniers (Figure 32).



Figure 32. Quai centraux larges (a) Autriche, Vienne – Station Flughafen Wien (b) Suisse, Zurich – Gare centrale de Zurich Ligne S10 (c) Francfort, Allemagne – gare centrale ligne S1

### 3.3.4.6 Laisser descendre avant de monter

Cette politique a pour objectif d'organiser les flux : les personnes qui descendent puis les personnes qui montent. Ceci permet d'éviter à avoir des flux mixtes et des entrecroquements entre les flux, ce qui peut causer des retards dans la circulation des trains. Voir Figure 33.

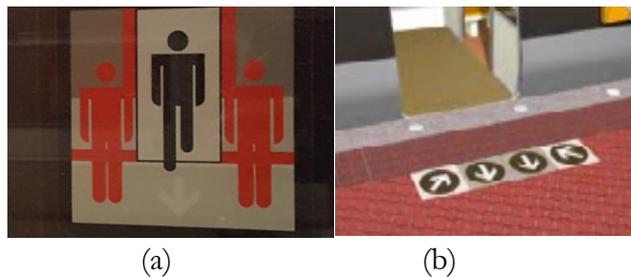


Figure 33. Laisser descendre avant de monter (a) Bilbao - Ligne 1 (b) Opérateurs Nord Américains (Source: Washington Metropolitan Area Transit Authority).

### 3.3.4.7 Blocage des portes

En 2009, la SNCF s'est lancée dans une campagne publicitaire (Figure 34) avec des affiches et des dépliants visant à sensibiliser les passagers au fait que le blocage des portes est préjudiciable au service ainsi qu'à leur entourage. Des études montrent [SIL 99], en effet, que la présence ou l'absence d'avertissements peut influencer le comportement.



Figure 34. Campagne de sensibilisation sur les préjudices de blocage de portes

Les installations de portes palières automatiques (*PSD : Platform screen door*) (Figure 35) ont commencé en 2005 et se poursuivent depuis. L'une des motivations de l'installation provient d'un rapport sur le métro parisien indiquant que le nombre de retards causés par les passagers a été réduit de 69% après l'installation des *PSD* [AND 15]. Ces portes n'ont pas d'effet significatif négatif sur les variations des temps de montée et de descente [SAN 13].



Figure 35. Portes palières automatiques (a)<sup>11</sup> Métro de Taipei (b)<sup>12</sup> Métro de Paris ligne 13

### 3.3.4.8 Zones non desservies du quai

Cela rappelle deux problématiques: (i) les trains courts laissant des zones non desservies, en longueur (ii) pour les quais centraux, l'information de la voie desservie.

(i) La problématique des trains courts implique la non couverture de l'ensemble de la zone du quai. Les voyageurs qui ne sont pas informés de la zone couverte, se retrouvent contraints de courir afin de rattraper le train. Certaines compagnies affichent sur les tableaux d'information les portions couvertes du quai (Figure 36.a. Portion 3b encadré en bleu). La SNCF a déployé des solutions pour cette problématique à Paris Gare de Lyon. Afin d'éviter de courir pour rattraper le train, un marquage au sol indique la zone des trains courts. En effet, une signalétique lumineuse par LED a été installée sur les murs face aux quais : des flèches lumineuses s'allument à l'approche d'un train court. Les flèches sur les murs s'allument avec un mouvement de balayage insistant sur le sens du déplacement. (Figure 36.b).



<sup>11</sup> © Mailer Diablo

<sup>12</sup> © Porte palière de grande hauteur à la station Miromesnil sur la ligne 13 du métro de Paris / *Greekski*

Figure 36. Information sur les zones desservies par le train (a)<sup>13</sup> Autriche, Vienne – Station Flughafen Wien (b) Signalétique lumineuse par LED pour la problématique des trains courts sur le quai, France, Paris – Station Gare de Lyon du RER D

(ii) Pour ce qui est de l'information de la voie desservie pour un quai central, on note généralement la difficulté de passer d'une voie à une autre, car il s'agit de quai à dynamique particulière (Voire Section 3 Type de quai). Pour éviter que les voyageurs aient à transiter tardivement d'un bord à un autre, cela peut passer par des messages audios, des affichages sur l'écran de l'infogare ou par des moyens plus intuitifs comme la signalisation par bande lumineuse au bord du quai (Figure 37).



Figure 37. Hongrie, Budapest Station Rákóczi tér ligne 4

#### 3.3.4.9 Exploiter la capacité maximale d'un escalateur

L'une des normes les plus connues quand une personne est engagée sur un escalateur : « *se mettre à droite si on ne souhaite pas avancer, sinon prendre la file à gauche pour avancer plus rapidement* ». Cette norme permet d'offrir un compromis entre le confort et l'augmentation de la capacité d'un escalateur (qui se traduit par le nombre de personnes entrants /sortant du quai par seconde). Voir Figure 38.



Figure 38. Création de deux files, une d'attente et une autre de mouvement - Suisse, Zurich – Gare centrale de Zurich

<sup>13</sup> © CAT city airport train à Vienne / Raphaëlle

# Chapitre 4

## 3.4 La transférabilité

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre de l'étude de transférabilité intercontextuelle des connaissances acquises sur un phénomène. Nous définissons la notion de la transférabilité des connaissances tout en essayant de lever l'ambiguïté avec la notion de généralisabilité. Nous clarifions le contexte d'apparition de la notion en passant en revue un court historique de l'évolution des termes en lien avec les problématiques rencontrées lors de leurs usages. Par la suite, nous énumérons les critères relevés dans la littérature qui contribuent à cette transférabilité.

### 3.4.1 Définition générale

Selon la définition de Lincoln et Guba [LIN 85], la transférabilité consiste en l'étude de l'applicabilité des résultats d'une étude de recherche à d'autres contextes, situations, moments et populations. Dans cette optique, on peut se demander ce qui différencie la transférabilité de la généralisabilité. Nous apporterons une définition claire de chaque concept et de son contexte d'usage.

En premier lieu, nous pouvons définir la généralisabilité comme l'extension des résultats des recherches et des conclusions d'une étude menée sur un échantillon de population à la population dans son ensemble. Baskerville [BAS 96] rapporte deux types de généralisation : (1) la généralisation *nomothétique*, qui implique la recherche de lois générales de la nature et ne permettent pas de véritables exceptions (2) la généralisation *idiographique*, qui implique l'étude de cas particuliers et fait émerger des théories contexte-dépendantes. De ce fait, certaines sciences semblent être mieux corrélées avec la généralisation nomothétique comme les sciences naturelles (i.e. chimie, physique), tandis que les sciences comportementales et sociales sont plus alignées avec le côté idiographique [FIN 10]. Les sciences naturelles ont montré l'intérêt des généralisations, tandis que les sciences sociales et comportementales ont en souligné les faiblesses.

S'agissant d'investigations comportementales de l'individu au sein d'un groupe, les connaissances sont issues d'un monde social dont le « non-déterminisme est inhérent » [DEN 83]. Il est vrai que le monde social peut démontrer certaines invariances dans les comportements humains. Néanmoins, ces derniers demeurent peu prévisibles et très spécifiques en raison de leur dépendance avec divers facteurs [LEE 03][FLY 06]. C'est à ce moment-là que la notion de généralisabilité suscite des interrogations majeures. La critique quant à l'objectivité par rapport aux mécanismes opérants dans le monde social fait relever dans la littérature un rejet de la notion traditionnelle et reçue de la généralisation par la science qualitative et interprétative. De ce fait, elle fait apparaître la notion de *généralisabilité « moderatum »* dont la portée de ce qui est revendiqué est modérée. Ainsi, elle n'a pas pour but de produire des déclarations sociologiques radicales [WIL 00a] et elle est modérée, dans le sens d'une vision ouverte au changement [PAY 05]. D'autres auteurs rapportent le concept de la *validité externe* [CAM 79] qui pose la question de la généralisabilité à d'autres cadres. Lincoln et Guba [LIN 85] rapportent une notion équivalente à la validité externe. Cette notion explore dans quelle mesure les résultats pourraient être appliqués et représentés par la notion de *transférabilité*.

La transférabilité est un nouveau concept de généralisation qui se base sur l'ajustement relatif des jugements établis et qui sont contexte-dépendants, entre deux ou plusieurs cas effectués par le chercheur. Elle est considérée comme la notion analogue de la *validité externe* développée par Cook et Campbell [CAM 79]. Le terme est destiné à capturer des principes corrects d'interprétabilité afin d'évaluer comment les résultats d'un contexte s'appliquent à un autre, sans pour autant faire une forme valide universellement et axiomatique. Elle est définie et illustrée à travers les interrogations suivantes des Lincoln et Guba [LIN 85] :

*“How can one tell whether a working hypothesis developed in Context A might be applicable in Context B? We suggest that the answer to that question must be empirical: the degree of transferability is a direct function of the similarity between the two contexts, what we shall call “fittingness”. Fittingness is defined as the degree of congruence between the sending and receiving context. If Context A and Context B are sufficiently congruent, then working hypotheses from the sending originating context may be applicable in the receiving context [LIN 85:p124]”.*

Leung [LEU 15] rapporte que l'approche pragmatique de l'évaluation de la généralisabilité pour les études qualitatives consiste à adopter les mêmes critères de validité. La transférabilité peut être considérée comme une forme spécifique et précise de généralisabilité [TED 07]. De ce fait, en plus de ses propres critères, elle hérite ceux de la généralisabilité.

En outre, la transférabilité peut être une mesure de la qualité pour la recherche qualitative. En effet, Kitto et al. [KIT 08] ont établi six critères pour évaluer la qualité globale de la recherche qualitative : (i) clarification et justification, (ii) rigueur procédurale, (iii) représentativité de l'échantillon, (iv) rigueur interprétative, (v) rigueur réflexive et évaluative et (vi) transférabilité / généralisabilité (repères évaluatifs au *Medical Journal of Australia*).

## 3.4.2 Les critères vers la transférabilité

### 3.4.2.1 La validité

Pour que des connaissances soient transférables, elles doivent être avant tout valides. La validité « interne » des connaissances fournit une plateforme sur laquelle la généralisation peut être construite [PAY 05].

Avec la prolifération des termes : validité interne, validité externe, validité logique, etc. il est important d'éviter la confusion entre ces termes. La *validité interne* se réfère à la question de savoir si dans l'expérience concernée, la manipulation du traitement produit une variation dans le résultat, tandis que la *validité externe* désigne si une relation constatée dans une expérience peut être généralisée à d'autres situations [HAM 13] [TRO 01 : p66].

Trochim [TRO 01 : p28] (Figure 39) rapporte la validité comme : « *la meilleure approximation disponible de la vérité d'une proposition, d'une inférence, ou conclusion* ». Il la présente comme une question cumulative et propose quatre types de validité, dont chacune adresse une question méthodologique spécifique :

- La validité fondée sur des conclusions : est-ce qu'il existe une relation entre les deux variables ?

- Validité interne : s'il y a une relation dans cette étude, est-elle causale ? La validité interne signifie que nous avons la preuve que ce que nous avons fait dans l'étude (c'est-à-dire le programme) a provoqué ce que nous avons observé (c'est-à-dire le résultat).
- Validité conceptuelle : en supposant qu'il existe une relation causale dans cette étude, pouvons-nous prétendre que le programme implémenté reflète bien notre construction du programme et que notre mesure reflète bien notre idée de la construction de la mesure ? en d'autres termes, avons-nous bien opérationnalisé les idées de la cause et l'effet ?
- Validité externe : en supposant qu'il existe une relation causale dans cette étude entre les constructions de la cause et de l'effet, pouvons-nous généraliser cet effet à d'autres personnes, lieux ou moments ?

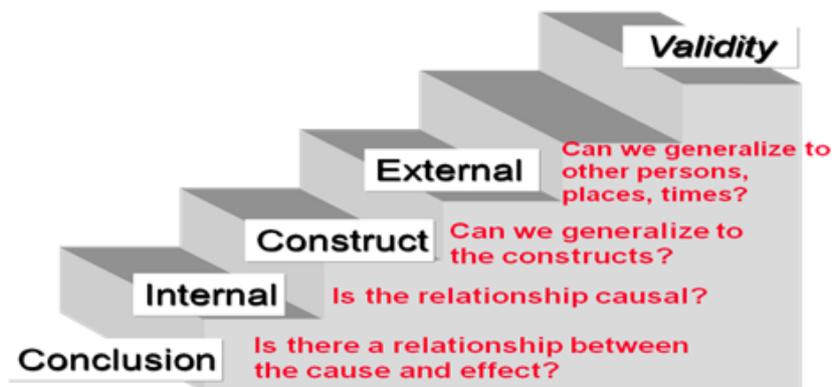


Figure 39. La question de la validité est cumulative [TRO 01 : p31]

La validité intervient alors à divers moments à travers des hypothèses, des expérimentations, des analyses et des théories englobant certaines menaces qui relèvent aussi bien de la réflexion humaine (différents biais, erreurs) que de l'outil informatique dans la traduction des constats (bug, temps de calculs, erreurs de codage).

### 3.4.2.2 La méthode de recueil de données

#### 3.4.2.2.1 Biais et erreurs

La fiabilité des connaissances est aussi importante car c'est l'une des conditions sur laquelle la généralisation peut être construite [PAY 05]. La fiabilité est en lien avec la qualité de la mesure. La fiabilité peut désigner la «cohérence» ou la «répétabilité» des mesures [TRO 01]. La fiabilité ne garantit pas la validité, c'est une condition nécessaire mais non suffisante. Nous présentons dans ce qui suit quelques méthodes expérimentales et des biais et erreurs à éviter afin de favoriser la validité de la démarche.

**L'observation en milieu naturel** : si on souhaite comprendre le processus d'un comportement particulier, le meilleur moyen est d'observer le comportement dans son contexte naturel. Cette démarche doit obéir à certaines règles afin de ne pas biaiser les constats. Par exemple, il est essentiel que l'observateur soit non-obstructif au déroulement du phénomène et aussi discret que possible afin de ne pas induire des changements comportementaux. Un autre problème potentiel, réside dans la non-objectivité vis-à-vis de l'analyse de la situation. La foule est vécue quotidiennement ce qui induit forcément une perception subjective de la situation et certaines

conclusions qui peuvent être valides ou non. Ces observations personnelles peuvent nous amener souvent à formuler une hypothèse spécifique, mais nous ne pouvons pas utiliser des observations personnelles limitées et des évidences anecdotiques pour tester rigoureusement notre hypothèse. Au lieu de cela, pour savoir si les données du monde réel supportent notre hypothèse, nous devons mener une expérience.

Cette problématique peut être représentée par le biais de l'observateur. L'observateur est en général impliqué dans le processus de recherche et peut inconsciemment biaiser ses observations en fonction de ses attentes ou de ses objectifs de recherche. Les biais sont inhérents à toutes les entreprises humaines, par conséquent, le scientifique y est exposé [LEW 11]. L'une des techniques les plus fiables est de comparer les observations d'un même événement par plusieurs autres observateurs [MAR 86], ce qui offre un haut degré de pertinence des informations collectées et leur validité.

**Les questionnaires :** les enquêtes permettent de recueillir des données à partir de larges échantillons représentant un sous-ensemble d'individus d'une population et reflétant sa diversité. A travers cela, il est possible de généraliser les résultats à la population. Les questionnaires se présentent aussi comme une source précieuse d'informations qualitatives, notamment sur le recueil des opinions, des habitudes ou des comportements. Cependant, la personne interrogée peut ne pas saisir le sens exact de la question, ne pas se rappeler de faits d'intérêt ou peut se sentir gênée par exemple, par des questions contentieuses, ou qui risquent de nuire à son estime de soi (i.e. comportements anti-sociaux, superficiels, opportunistes). La formulation ou la présentation des questions est aussi importante, car à travers sa formulation cela peut induire divers biais (i.e. effet de formulation de question, effet de l'ordre si plusieurs choix parmi d'autres, etc.) [KAL 04].

**Le modèle et la simulation :** un modèle est tout d'abord un outil d'acquisition de données [SCH 08]. Il s'agit donc à la fois d'un des processus de la méthode scientifique et de son produit. Ainsi, la validité requise dans la méthode scientifique est au service, à la fois, de la validité du modèle et de sa transférabilité.

#### **3.4.2.2.2 Réplicabilité et reproductibilité de la méthode**

La reproductibilité requiert un ou plusieurs changements tandis que la réplicabilité évite tout changement de la situation. Autrement dit, la reproductibilité se réfère à un phénomène qu'on peut prédire de se produire même quand quelques conditions expérimentales varient à quelque degré, alors que la réplicabilité décrit la possibilité d'obtenir des résultats identiques quand l'expérience est conduite dans des conditions identiques [DRU 09]. La reproductibilité et la réplicabilité ont une importance dans la construction des connaissances scientifiques [POP 05] [BRA 14].

Dans ce contexte, fournir des méthodes de mesure et des modèles répliquables et reproductibles est une condition nécessaire pour tester la transférabilité du système.

### **3.4.2.3 La méthode d'interprétation et de description**

#### **3.4.2.3.1 Variables endogènes versus exogènes**

En général, dans la démarche scientifique nous prenons un contexte type qui englobe l'objet de l'étude. Ce contexte est une bonne base car elle nous permet l'observation, les recueils d'informations et la compréhension. Cependant, chaque contexte est spécifique, très riche et contient des éléments superflus. Plus un contexte est spécifique et riche, plus il faut s'attendre à des comportements plus nombreux et diversifiés. Pour revenir aux objectifs principaux de la modélisation qui est la représentation simplifiée de la réalité, on peut catégoriser les variables recueillies comme endogènes ou exogènes au phénomène. Une variable endogène est l'effet d'au moins une autre variable du système. Elle cause ou peut être causée par le phénomène. En revanche, une variable exogène a une valeur donnée qui n'est pas causée par les variables du système. C'est pour cela qu'elle ne fait pas partie du modèle. En apportant cette catégorisation, nous soulignons les éléments clés du phénomène ou accessoires qui sont liés à la spécificité de la situation. Dès lors, nous disposons d'une ébauche du phénomène.

#### **3.4.2.3.2 L'opérationnalisation**

L'opérationnalisation permet le passage d'un concept abstrait à des variables concrètes et mesurables [BRI 27]. Trochim [TRO 01] illustre l'opérationnalisation par ce qui suit : il existe deux domaines impliqués dans la recherche : la théorie et l'observation. Du premier découle l'établissement des théories sur comment le monde se comporte. Du second nous traduisons nos idées sur le monde réel par l'utilisation de moyens techniques tels que l'observation, les mesures, les traitements, la programmation. Une recherche implique des allers-retours entre ces deux domaines : ce que nous pensons du monde et ce qui s'y passe réellement. On y fait souvent des analyses de cause à effet entre les acteurs du phénomène. Dans les deux cas, la cause ou l'effet doit d'être traduit d'une manière concrète comme à travers les programmes, traitements, mesures ou méthodes d'observation. Pour décrire l'acte de traduire une construction en une manifestation, on fait appel à l'opérationnalisation. En d'autres termes, nous prenons nos idées pour les traduire en séries d'opérations ou de procédures. Nous passons ainsi d'une idée représentée mentalement en une entité publique que n'importe quelle personne peut examiner.

S'agissant d'un concept difficile à définir, l'opérationnalisation est une étape inévitable, elle nous permet de délimiter les variables d'intérêt de notre problématique.

#### **3.4.2.3.3 Description « épaisse » du phénomène**

Partant des recommandations de Lincoln et Guba [LIN 85], les auteurs suggèrent de fournir une description « épaisse » du phénomène. Spécifiquement, la description épaisse (*thick description*) est une technique dans laquelle un chercheur qualitatif fournit un compte rendu robuste et détaillé de ses expériences au cours de la collecte de données. Un chercheur qualitatif établit des liens explicites avec les contextes culturels et sociaux entourant la collecte de données.

De même, d'autres recommandent la délimitation des concepts et leurs descriptions détaillées [SCO 00] [RUD 06].

#### 3.4.2.3.4 La description intégrative et différentielle

Nous avons évoqué l'émergence qui concerne la compréhension de phénomène social complexe comme la foule. En bref, il s'agit de « *l'apparition de nouvelles structures, modèles et propriétés à travers l'interaction de plusieurs éléments distribués* » [WIL 15 : p6]. Il existe deux manières d'aborder l'émergence : intégrative et différentielle [WIL 15 : p7]. Dans ce cadre, la littérature nous fournit des recommandations pour la bonne compréhension de l'émergence : opter pour une description à deux niveaux (individuel et collectif) et « glisser » d'une manière vigilante entre les niveaux afin d'attribuer les propriétés de l'agrégat aux éléments individuels et vice versa [WIL 99a].

#### 3.4.2.3.5 Raisonnement

Afin de comprendre un phénomène, il existe diverses méthodologies de raisonnement pour aboutir à la conclusion [AXE 97] :

- Inductive : consiste à inférer à partir d'une base probabiliste de données d'un fait particulier vers la théorie générale
- Déductive : part de principe ou de prémisses et prouver les conséquences pouvant être dérivées de ces principes, autrement dit, de la généralisation vers une conséquence particulière

En plus de l'approche inductive et déductive, Axelrod évoque aussi une troisième approche sur laquelle se base la modélisation et la simulation. C'est l'approche générative qui utilise des principes (comme en déduction) pour générer une base probabiliste afin d'induire une théorie générale.

En d'autres termes, les approches génératives modélisent d'abord la structure du système, génèrent un ensemble de données à partir des règles spécifiées et la conclusion est tirée d'une manière inductive. A la différence de l'induction classique qui tire ses conclusions de données du monde réel.

C'est exactement le rôle d'une simulation. Le plus intéressant c'est que l'approche générative nous permet d'avoir des données qui sont comparables statistiquement à ceux de l'environnement. À travers cette comparaison, il nous est possible de calibrer et de valider notre modèle.

#### 3.4.2.3.6 Types de liens

**De cause à effet** : établir des liens de cause à effet comme un moyen de raisonner d'un cas à un autre en termes de catégories dérivées causalement. Ce lien fait appel aux catégories comme étant en correspondance (causale) avec une réalité plus générale. Quand le chercheur explore ces liens, ils font intervenir deux variables d'intérêts : la cause et l'effet. Nous disposons d'une théorie implicite de ce qu'est la cause (la construction de la cause) et de ce que nous essayons d'affecter ou de mesurer (la construction de l'effet) [TRO 01]. Les déclarations causales et explicatives peuvent être utilisées comme sources de prédiction vis-à-vis de la nouvelle situation afin d'en évaluer sa transférabilité [HEL 08].

La causalité est une notion assez complexe à expliquer. Aristote classe la causalité sous différents angles. Il présente (i) la cause matérielle ; la matière qui constitue une chose (ii) la cause formelle ; l'essence de cette chose (iii) la cause motrice ou efficiente : cause du changement, ce qui produit ou modifie la chose (iv) et la cause finale ; axé sur le but [VON 90].

Álvarez [ALV 09] rapporte que l'application systématique des quatre causes est certainement inhabituelle en psychologie. Tinbergen [TIN 63], présente la notion de cause proximale et de cause ultime d'un comportement donnée. Les causes proximales englobent les facteurs externes (i.e. facteurs externes du milieu susceptible de faire réagir l'être à cette modification) et internes (i.e. modification de l'organisme jouant un rôle dans le comportement étudié, qu'elle soit d'ordre sensoriel, nerveux, hormonal ou musculaire, etc.). Les causes ultimes recherches dans les fonctions profondes des comportements sur plusieurs niveaux (i.e. à quoi sert le comportement, quelle est son rôle dans la survie).

**Des rapports de finalité :** de son côté, Nagel [NAG 61 :p449] avait aussi souligné le non-déterminisme du monde social et avait proposé des explications moins puissantes que les liens de causes à effet, telles que des explications probabilistes et téléologiques établissant des rapports de finalité, et ceci dans le but de les transférer. Ceci soutient le choix de l'approche motivationnelle. En effet, les motivations peuvent être vues comme des rapports de finalité.

Russel [RUS 13 ; p86-87] rapporte que l'expérience a montré que la question mécaniste (la compréhension de comportement des composantes d'un système) mène à la connaissance scientifique, contrairement à la question téléologique.

A ce titre, l'explication proximale rejoint la structure de la motivation qu'on souhaite avoir, elle cherche dans des causes plus ou moins immédiates que l'approche distale et nous affranchit des recherches sur l'origine ultime d'un comportement

#### **3.4.2.3.7 La réfutabilité**

La réfutabilité est la possibilité de prouver par une observation qu'un énoncé ou une théorie puisse être fausse. La théorie de Freud sur la psychologie de la personnalité est très pertinente dans ce contexte, bien qu'intéressante pour expliquer les différents comportements humains, une critique majeure de ces théories tient au fait que beaucoup de ces idées ne sont pas réfutables; par exemple, il est impossible d'imaginer des observations empiriques qui pourraient réfuter l'existence de l'ego ou de l'inconscient.

Pour Popper [POP 74], la vérification n'est pas suffisante pour affirmer la validité et sa scientificité d'une connaissance. La science doit englober en elle-même les moyens de sa propre réfutabilité, elle se doit d'être réfutable pour prétendre à la scientificité. Pour ce qui concerne l'étude de la foule, la science est bien réfutable (i.e. mener une expérience pour voir comment se comporte la foule). Par ailleurs, toutes les expérimentations ne sont pas permises dans ce type d'étude dû à leurs influences à grande échelle et les risques encourus. Dans ce cas, il est nécessaire de définir le type d'intervention sur l'environnement et l'évaluation des impacts probables. De plus, l'historique des événements (littérature, expériences rapportées, etc.) ainsi

que des modifications imposées de l'environnement peuvent constituer des cas de comparaison et de vérification.

#### **3.4.2.4 L'outil informatique**

Dans nos travaux, les connaissances acquises seront formalisées à travers des règles comportementales dans un outil de simulation informatique. On peut considérer que les connaissances acquises vont passer par deux phases (i) formalisation des relations entre les variables sous forme de règles brutes (ii) formalisation des règles en langage informatique.

Nous avons traité la question de formalisation de règles brutes à travers la validité des méthodes de recueil ainsi que d'interprétabilité. Hormis la bonne traduction des constats en langage informatique, la validité computationnelle dépend majoritairement de la vulnérabilité de l'outil (bug, temps de calculs, erreurs de codage). Il s'agit aussi du niveau d'abstraction qui représente les événements [ZHO 10]. De ce fait, la transférabilité d'une simulation dépend en plus de sa robustesse.

Le terme « flexibilité » d'un simulateur a été rencontré dans la littérature [ZHO 10], selon la définition des auteurs : « la flexibilité fait référence à la capacité d'un modèle à s'adapter à différentes situations. Un modèle est flexible s'il est capable de s'adapter à des changements internes ou externes potentiels en fonction de diverses situations, en particulier lorsque les changements sont incertains ». Les auteurs soulèvent un problème majeur et nombreux modèles de foules existantes : ces modèles sont trop étroitement associés à certaines situations spécifiques. Par exemple, ils peuvent adopter des règles de décision spécifiques à une situation donnée, ce qui rend difficile leur adaptation à d'autres situations.

Dans ce sens, le terme flexibilité rejoint la notion de transférabilité déjà présentée.

#### **3.4.2.5 Choix du second site**

Fingeld [FIN 10] rapporte que le degré de transférabilité entre deux contextes est en relation directe avec leurs similarités. Par exemple, l'auteur présente la transférabilité de méta-analyses comme dépendante des métaphores théoriques employées et leur validité entre les situations, de l'identification des allégories de cause à effet qui existent entre deux contextes [HEL 08]. Ainsi, l'adéquation se révèle à travers les points de comparaison entre les deux situations. C'est pour cela qu'il faut avoir une bonne connaissance des deux situations entre lesquelles les connaissances vont être transférées.

# Chapitre 5

## 3.5 La modélisation et la simulation

Dans ce qui suit, nous allons discuter des approches de modélisation et de simulation.

### 3.5.1 La modélisation

#### 3.5.1.1 Définition

Un modèle, selon J. Holland [HOL 95], est une description abstraite d'un processus ou d'un événement qui exagère certains aspects de la réalité au détriment d'autres, qu'il faut éliminer, afin de répondre à la problématique posée. D'après R. Shalizi [SHA 01] un modèle doit être, idéalement, aussi simple que possible, et doit être prédictif autant que possible.

Les recommandations de modélisation se basent sur le principe connu sous le nom de « *rasoir d'Ockham* » qui stipule que nous ne devrions pas avoir plus d'entités dans notre système au-delà de ce qui est nécessaire. L'un des principaux avantages de cette démarche est qu'un modèle simple fournira une meilleure compréhension d'un phénomène qu'un modèle complexe.

Ainsi, un modèle se doit d'être le plus simple possible et met en exergue les aspects étudiés du système. On peut voir le modèle de base comme étant un modèle très simple permettant de renseigner sur les axes majeurs de la question, s'enrichissant au fur et à mesure de l'observation et de la compréhension de la question jusqu'à l'aboutissement d'un modèle valide.

#### 3.5.1.2 La modélisation et l'émergence

L'émergence est définie comme étant une interaction entre de petites entités qui fait apparaître des entités plus grandes ayant de nouvelles propriétés non existantes chez les entités les plus petites. L'étude de la foule est concernée par ce principe étant donné que son observation au niveau microscopique et macroscopique fait révéler des patterns différents (page 38)

La compréhension de l'émergence, présente deux défis fondamentaux et distincts. La première difficulté réside dans la tentative de déterminer le modèle agrégé quand on sait comment les éléments individuels se comportent, donc de passer de l'individuel au collectif. La seconde difficulté se pose lorsque le modèle global est connu et qu'on essaie de trouver le comportement des éléments qui pourraient générer le modèle, donc de passer du collectif à l'individuel [WIL 15].

Ces difficultés sont parallèles à celles rencontrées avec la compréhension de la foule et sa modélisation : le passage de l'individuel vers le collectif et vice-versa. C'est en partie ce qui a mené à l'apparition de diverses échelles de modélisation et de simulation, selon la compréhension pour laquelle on opte et qui reflète souvent le niveau de réalisme attendu de la simulation.

### 3.5.1.3 Les modèles par échelle

On distingue les trois échelles : macroscopique, mésoscopique et microscopique et hybrides. Dans ce qui suit, nous caractérisons les modèles de différente échelle et distinguons la manière dont chacune décrit la foule

#### 3.5.1.3.1 Modèle macroscopique

Par les approches macroscopiques, seul le comportement d'un groupe peut être observé sans pouvoir apprécier l'interaction entre les éléments constituant ce groupe.

**Modèles continus :** le modèle de Hughes [HUG 02] [HUG 03] représente les piétons sous forme d'un champ de densité continue et présente deux équations différentielles partielles décrivant la dynamique de la foule. De plus, le système est piloté par une fonction potentielle qui guide le champ de densité de façon optimale vers son objectif. L'approche continuum a été étudiée par Treuille et al. [TRE 06]. L'approche de Treuille et al. calcule la fonction potentielle pour un groupe une seule fois, ensuite, il dérive des chemins optimaux pour tous les membres du groupe simultanément. Les personnes dans ce système ont des mouvements plus fluides que ce qui avait été déjà rapporté par Hugues et al. [HUG 02].

**Modèles de flux :** ces modèles représentent les déplacements collectifs à travers les lois physiques de la dynamique des fluides et de la cinétique des gaz [HEN 71][HEN 74][HEL 92a]. Souvent, dans ce genre d'approche, le système agrégé est décrit en termes de densité(s) de masse, de flux et de vitesse [SCH 08].

Il existe un fait qui attire notre attention dans le modèle macroscopique d'Henderson [HEN 72 73 74]. L'auteur décèle des variabilités de comportements selon le genre. L'auteur passe d'une description des comportements observés par des lois généralisées vers la tentative d'affinement du modèle pour la représentation de ces variabilités.

Sauf dans le cas où les attentes de la simulation ne requièrent pas autant de précisions (ce qui met en exergue une des faiblesses des modèles macroscopiques) : il est difficile de généraliser quand un système se comporte différemment selon les caractéristiques de ses composantes, d'où la nécessité d'affiner davantage. Un système complexe englobe une multitude de dépendances. Par conséquent, une représentation plus fine du système semble être plus adéquate. De plus, il a été souligné que les modèles macroscopiques ne peuvent pas couvrir toutes les caractéristiques du comportement de la foule, ce qui limite encore son applicabilité [XIO 10].

**Autres modèles :** plusieurs autres modèles macroscopiques sont proposés comme celui de Bellomo et Dogbé [BEL 08] Predtechenskii et Milinskii [PRE 78] et les modèles d'évacuation [TOK 55][PAU 84] et bien d'autres qui ne seront pas présentés dans le cadre de cette thèse.

#### 3.5.1.3.2 Modèle mésoscopique

L'échelle mésoscopique se situe entre les deux échelles macroscopique et microscopique, on y observe l'agrégat de composants locaux et les comportements de groupe d'individus. Ces modèles n'identifient pas chaque piéton individuellement mais reportent les caractéristiques de

chaque piéton d'une manière agrégée. Ces modèles consistent à simplifier la dynamique avec moins de données et combinent à la fois des aspects microscopiques (i.e. comportement individuel) et macroscopiques (i.e. dynamique du flux). Les travaux de Teknomo et al. ont adopté l'approche mésoscopique pour la modélisation des comportements des piétons [TEK 07]. L'un des buts principaux de ces travaux est d'opter pour une méthode moins coûteuse en termes de calculs.

### 3.5.1.3.3 Modèle microscopique

Les approches microscopiques impliquent de traiter chaque individu dans le modèle comme une entité unique avec ses propres objectifs, ses caractéristiques comportementales et possédant sa capacité d'interagir avec d'autres entités dans le modèle. Ces approches ont été lancées au milieu des années 80 [ZHA 09] avec les progrès rapides des technologies informatiques.

**Système de particules :** le système de particules de Reeves [REE 83] est présenté comme méthode pour modéliser des objets « flous », n'ayant pas forme déterministe (i.e. le feu, nuages, etc.). Sur une période de temps, les particules y sont générées, se déplacent, puis disparaissent. Durant leurs vies, elles produisent certains comportements stochastiques qui peuvent induire des changements dans leurs propriétés (i.e. couleur, opacité, localisation, vitesse, etc.). Dans ce modèle, les entités créées dans le même milieu n'ont pas d'influence l'une sur l'autre.

**Boids :** « *Boids* » est une contraction de « *Bird Object* ». L'objet de l'étude de Reynolds [REY 87] porte sur la modélisation de la dynamique de nuées d'oiseaux. A travers son modèle, l'auteur tente d'illustrer les interactions dans la nuée sur la base de règles comportementales simples :

- Éviter la collision : Ne pas entrer en collision avec les autres oiseaux ou d'autres obstacles.
- S'aligner : Suivre la même vitesse.
- Se centrer dans la nuée : Rester proche l'un de l'autre.

Les deux règles concernant l'évitement de collision et l'alignement sont complémentaires. Ensemble, ils permettent aux membres de la nuée de circuler librement sans qu'il n'y ait de collision. D'un autre côté, chaque oiseau dispose d'une perception localisée du monde. Par le centrage de la nuée, un oiseau vise à atteindre le centre du groupe d'oiseaux à proximité, d'où l'obtention d'une densité de population à peu près homogène d'une zone à une autre.

Nous relevons la fiabilité du fonctionnement à base de règles. Le modèle « *Boids* » montre que bien qu'il suive peu de règles, il a permis de générer des comportements complexes. Ce modèle prouve la possibilité d'obtenir une coordination entre les éléments d'un système, sans plan centralisé et à partir de décisions individuelles et locales. Cela permet d'aboutir à un agrégat émergent et à une dynamique complexe qui montrent certaines régularités à travers le temps.

**Système multi-agents :** la modélisation et la simulation à base d'agents est une approche de modélisation de systèmes complexes composés d'agents autonomes et en interaction. On peut définir un agent comme faisant référence à un composant de logiciel capable d'agir avec

précision pour accomplir des tâches au nom de son utilisateur [NWA 96]. Les agents disposent de comportements propres et peuvent être influencés par les comportements d'autres agents.

Dans ce type de système, on peut observer tous les effets de la diversité des attributs et les comportements propres des agents dans la construction de la réaction globale [MAC 10].

On cite dans ce contexte les simulateurs à base d'agents comme SWARM [MIN 96] et NetLogo [WIL 15]. Ces modèles et simulateurs s'enrichissent au fur et à mesure et travaillent en commun avec les sciences sociales qui renseignent aussi bien sur les comportements individuels que collectifs [WIL 15 : p432].

Comme souligné dans le modèle « *Boids* », l'approche bottom-up semble intéressante. Elle requiert la création d'éléments individuels ainsi leurs des règles d'interaction. C'est en effet le rôle des systèmes multi-agents, il nous est possible de créer ces éléments individuels et les règles comportementales associées. Les systèmes en sciences sociales ne peuvent pas être modélisés d'une manière judicieuse à travers des équations mathématiques [AXT 00] [OSU 04]. En effet, les systèmes multi-agents sont rapportés comme étant les meilleurs systèmes qui capturent la dimension sociale de tel phénomène (i.e. la foule) [BOE 15].

**Automate Cellulaire (AC) :** les AC peuvent être définis comme étant des modèles qui simplifient la problématique d'obtention d'informations concernant les zones avoisinantes, en divisant l'espace en une grille. Par conséquent, l'espace est découpé en carré et les entités peuvent se déplacer en fonction de l'état des carrés avoisinants : libres ou occupés.

Les premières utilisations des AC apparaissent dans le « Jeu de la vie » de Conway [CON 70] et se déploient rapidement vers la modélisation des phénomènes sociaux comme le modèle de ségrégation de Schelling [SCH 71].

Cette approche présente l'avantage majeur de rendre la simulation très rapide mais en contrepartie, elle présente plusieurs inconvénients :

- Le système évolue par unité de temps voire par événement, séquentiellement, par conséquent le temps est discrétisé.
- Les collisions physiques entre entités ne sont pas modélisées dans la mesure où les entités ne convoitent jamais une cellule occupée.
- Des règles d'interaction identiques et locales et les décisions qui peuvent être prises sont limitées en nombre.
- La variabilité d'utilisation de formes géométriques est faible pour les environnements discrets.

D'un côté, l'étude de la foule est l'étude d'un système complexe qui comporte une grande variété de décisions prises et dépend de plusieurs facteurs résultant d'interactions entre les entités. Dans ce contexte, une interaction n'est pas seulement que physique ou spatiale entre les personnes (collision, évitement, etc.), mais peut être de l'ordre de la communication entre les individus qu'elle soit verbale ou non verbale (normes sociales, prédictibilité de la réaction d'autrui,

expressions faciales, etc.) à partir desquelles on peut voir émerger des comportements en réponse à ces indices perçus. D'un autre côté, un AC ne représente même pas l'interaction physique entre les entités mais plutôt une occupation de cellule et il est constitué de quelques règles afin que les entités évitent les cellules occupées. De ce fait, les situations d'évitement, les risques de collision, les comportements entrepris afin de remédier à une collision ou d'en minimiser les effets, ne seront jamais représentés dans ce genre de modèle. Aussi, un AC ne décrit l'état de l'entité qu'en terme d'occupation, il est donc difficile de transmettre d'autres types d'indices entre entités afin d'y voir une communication entre ces derniers.

En ce qui concerne l'étude de la foule, la navigation dans un contexte spatio-temporel continue ou finement échantillonnée, est une condition clé pour la reproduction et l'appréciation de divers phénomènes se produisant, en un lieu et un instant donnée, comme se produit dans la réalité. De même, l'usage de l'espace ne peut pas être étudié avec un tel déterminisme de l'occupation spatiale d'une entité, c'est-à-dire, juger qu'un espace donné est d'une forme spécifique, ne peut être occupé que par une seule entité ne reflète pas la réalité : en effet, des phénomènes d'auto-organisation peuvent émerger comme par exemple, la formation en quinconce (i.e. *Zipper Effect*) qui vise à mieux exploiter l'espace quand ce dernier est dense.

Les automates cellulaires sont certes plus performants en temps d'exécution et rapidité mais décrivent très peu la richesse de l'environnement étudié et ne semblent pas adaptés pour le but de l'étude qui est de comprendre un phénomène social complexe, notamment aux deux échelles microscopique et macroscopique. Les AC ont certes largement inspiré les simulations de processus sociaux se basant sur l'interaction locale, comme la ségrégation résidentielle décrite par Schelling [SCH 71]. Cependant, les AC capturent difficilement la multidimensionnalité des phénomènes sociaux [BOE 15] car l'état des cellules est unique, c'est-à-dire qu'il peut représenter plusieurs variations d'une seule caractéristique de l'individu.

En outre, la représentation 3D est très souhaitable pour améliorer l'interprétabilité de la simulation et son analyse, bien que ce genre de représentation soit très coûteux en termes de performance machine.

**Modèles stochastiques - Helbing :** afin de décrire les comportements des piétons, Helbing [HEL 92b] rapportait des régularités observées dans les comportements (i.e. maximisation d'utilité) et a utilisé la formulation stochastique sur la base de ces régularités [HEL 93].

**Modèles de forces sociales – MFS :** Helbing [HEL 95], présente les piétons comme soumis à des forces. Les travaux de Helbing se sont inspirés de ceux de Lewin [LEW 51] qui représentent les changements de comportements comme guidés par des « champs sociaux » ou « forces sociales ». Les forces qui guident les piétons peuvent être internes et résultantes de leurs perceptions de l'environnement externe, traitées par leurs objectifs personnels. Ces objectifs sont choisis parmi un tas d'alternatives, grâce à la maximisation d'utilité, conduisant à une décision finale et à une motivation d'agir, d'où et donc à une réaction comportementale. Pour détailler, le modèle identifie des forces suivant certains scénarios :

- Accélération du mouvement et de la vitesse désirée : le piéton cherche à atteindre une destination précise tout en maximisant son confort. Par conséquent, le chemin du piéton sera optimisé, il prendra par exemple un chemin court, sans effectuer de détour avec une vitesse désirée. Si cette dernière ne peut pas être atteinte à cause de la densité par exemple, il se produit une décélération vers une vitesse imposée par le contexte, poursuivie, après un temps de latence, par une tendance à atteindre encore une fois la vitesse désirée.
- Distance entre les piétons et les bordures : le mouvement du piéton est influencé par les autres piétons, la présence d'obstacles et de bordures. Un piéton conserve une certaine distance avec les autres piétons qui dépend de la densité actuelle et de la vitesse désirée. Cette distance est qualifiée de « sphère privée » propre à chaque piéton et faisant référence à l'effet territorial [SCH 76]. Le non-respect de ces distances peut augmenter l'inconfort ressenti et générer des effets de répulsion.
- Forces attractives : les piétons peuvent être attirés par d'autres personnes ou objets et sont donc soumis à des forces attractives (i.e. vitrines commerciales, animations de personnes, etc.)

Helbing s'est aussi intéressé au cours de ses travaux à des situations de panique de la foule [HEL 00a] et au phénomène d'auto-organisation [HEL 01] en utilisant un système de particules basé sur un modèle de forces.

D'un autre point de vue [VAS 09], les MFS peuvent être définis comme l'exact opposé des automates cellulaires dans la mesure où ces méthodes ont comme but de modéliser l'interaction entre les agents et les obstacles en détails. Le système à base de forces est contrôlé par la distance entre ses composantes et a pour but d'obtenir des agents qui prennent des décisions successives et naviguent dans un espace continu. De plus, cette technique permet une grande flexibilité en termes de géométries utilisées dans l'environnement. En revanche l'approche de l'espace continu est très coûteuse pour déterminer la situation dans l'espace avoisinant de chaque agent. Les limites et avantages des modèles discrets ont été évoquées (i.e. mauvaise représentation des événements, rapidité de calculs, etc.), en les comparant aux modèles continus, il en émerge des tentatives de trouver le juste équilibre entre ces deux approches afin de pouvoir respecter les performances techniques (calcul de machines) et de représenter le niveau de granularité visé dans la simulation, comme par exemple, les approches hybrides entre les AC et les MFS et bien d'autres approches.

**Approche hybride entre les AC et MFS** : certains autres outils développés ont une approche hybride qui vise à prendre les avantages des deux modèles à base de forces sociales (MFS) et des automates cellulaires (AC)[VAS 09]. D'une manière générale, ces systèmes ont pour but d'exploiter l'efficacité des ACs et la flexibilité des MFS. Fondamentalement, un modèle hybride utilise une géométrie continue du MFS et exploite la rapidité des calculs des ACs.

Parmi les simulateurs d'évacuation se basant sur ce type d'approche hybride, on trouve AENEAS [PET 03], Evi [VAS 03], SESAMO [LOP 03], ASERI [SCH 03] et IMEX [PAR 03]. Ces modèles prennent en compte des comportements comme la communication et l'interaction entre les personnes évacuées ainsi que les personnes leur venant en aide. Les personnes dans ce

type de simulation montrent aussi des comportements comme la prédiction des collisions et l'évitement. Il est à noter qu'une bonne partie des simulateurs d'évacuation ne simulent pas correctement les mouvements en l'absence de visibilité (obscurité, fumée).

**Modèle psychologique :** Pelechano et ses collaborateurs [PEL 05] décrivent une nouvelle architecture, qui intègre le modèle psychologique *PMFserv* [SIL 06a] [SIL06b] dans leur système de simulation *MACES* [PEL 06].

*MACES (Multi-agents Communication for Evacuation Simulation)* se base sur le modèle de forces sociales de Helbing [HEL 00a]. Le simulateur décrit les mouvements des agents et le processus d'orientation qui leur permet d'explorer et d'apprendre l'architecture interne d'un bâtiment. Afin d'élargir l'éventail des comportements humains émergents et les rendre plus réalistes, les auteurs utilisent le système *PMFserv*.

*PMFServ* est un système qui expose une large librairie d'équations *PMFs (Performance Moderator Function)* et des représentations comportementales humaines (*Human Behavior Representations*) utilisées par des architectures cognitives déployées dans une variété d'environnements de simulation. *PMFServ* est en partie basé sur les travaux de Gillis et Hursh [GIL 99] qui ont introduit la notion de modérateurs comportementaux. En effet, les *PMFs* sont des équations dérivées de résultats empiriques qui prédisent la performance humaine due à des facteurs de performance spécifique qui influencent fortement le comportement humain (i.e. la fatigue, la surcharge cognitive ou l'inconfort thermique). Il existe approximativement 500 fonctions et il peut y avoir des interdépendances entre elles. Par exemple, le niveau de compétence d'une personne peut être basée sur l'entraînement, ce qui peut réduire la surcharge cognitive car la tâche devient de plus en plus automatique et requiert moins de traitements cognitifs.

Pour résumer, le travail se base sur une variété d'approches et combine :

- Le comportement de navigation et la représentation de carte cognitive à travers le système *MACES*. Ce système permet l'apprentissage de lieux inconnus.
- Le mouvement local des agents est géré par des forces sociales (MFS) afin de reproduire des phénomènes réalistes comme la formation d'arcs [PRE 71] et l'effet « *Faster is slower effect* » décrit par Helbing [HEL 00a].
- Le système multi-agents permettant la communication entre agent pour le partage de connaissances au cours de l'exploration de l'immeuble.
- L'intégration de certains rôles pour la représentation de comportements individuels à travers des équations dérivées de résultats empiriques prédisant la performance humaine.

Le modèle est appliqué surtout pour des situations d'évacuation durant laquelle, il y a exploration massive des lieux, propagation des connaissances et prise de décision selon l'état émotionnel dû à la non-habitude au contexte.

**Modèle comportemental :** *ViCrowd* est un modèle comportemental de foule de Musse et al. [MUS 01]. Les auteurs proposent plusieurs façons afin de représenter les comportements de la foule qui peuvent être de type (i) programmé : inné et scénarisé (ii) réactif ou autonome : règles

en utilisant des événements et des réactions (iii) guidé : en fournissant un contrôle externe qui guide le comportement de la foule en temps réel.

Dans ce modèle, le comportement de foule correspond à un ensemble d'actions appliquées selon les intentions des entités (i.e. aller à la banque), leurs croyances qui représentent leur état interne (i.e. état émotionnel), et leur connaissance de l'environnement virtuel la foule est simulée (i.e. localisation d'obstacle). Les travaux de Musse et al. [MUS 01] offrent la possibilité d'augmenter la complexité de comportement d'agents / groupe pour un problème à simuler, ainsi qu'une structure hiérarchique à plusieurs niveaux formée par la foule, les groupes et les agents.

**Animation de groupe par des lois dynamiques :** les travaux de Brogan et Hodgins [BRO 97] visent à reproduire les comportements d'un groupe de créatures se déplaçant avec une dynamique typique. Les auteurs décrivent un algorithme qui contrôle les mouvements des créatures. Ce dernier est évalué à travers la simulation de trois systèmes : robots mono-patte, cycliste et un système de particules ponctuelles. L'algorithme comprend un modèle de localisation déterminant les positions désirées en fonction du modèle perceptuel donnant la position des créatures et les obstacles visibles pour chacune d'entre elles. Dans ce modèle, la position et la vitesse de chaque agent ne sont connues que par l'agent. Les autres membres du groupe peuvent l'estimer en fonction de l'observation du comportement de l'agent. Naturellement, l'algorithme se montre plus performant pour la simulation d'une particule ponctuelle. Son utilisation dans ce contexte aide à comprendre l'effet de la dynamique sur la performance de l'algorithme. Le robot mono-patte et le cycliste sont des simulations d'une dynamique importante car elles impliquent le contrôle d'équilibre, la direction et la vitesse de déplacement ainsi que l'emplacement au sein du groupe. Au cours de cette étude, il a été question de créer un système multi-agents qui réplique la complexité et la variabilité d'un groupe naturel via la perception, la communication simple, la coopération et la coordination des stratégies.

Cette approche peut servir à bâtir un modèle qui prend en compte l'aspect biomécanique. Dans notre cas, cela peut s'avérer être très utile compte tenu que les mouvements humains et leur limite contribuent au ralentissement des flux (i.e. effet des lacunes sur le mouvement (Section 3.1.8.)). Par contre, cette méthode présente un haut coût computationnel. Il reste à évaluer la représentativité de cette variable par rapport à d'autres.

**Modèle cognitif :** Terzopoulos et Shao [SHA 07] ont modélisé des piétons autonomes de l'ancienne gare de Pennsylvanie qui a été démolie, et ceci à travers un système multi-agents. L'approche « vie artificielle » utilisée par les auteurs pour modéliser les piétons, couvre :

- La locomotion : mouvement et apparence, la simulation emploie le package *DI-Guy* [KEO 98] qui fournit une forme humaine en 3D avec les mouvements de base d'un individu.
- La perception : hauteur du sol, objets statiques et mobiles, localisation d'objets et interprétation de situations complexes
- Le comportement : réactif (i.e. évitement d'obstacles), navigation, motivationnel, état mental (i.e. besoins physiologiques, psychologiques ou sociaux)

- La cognition : la connaissance du monde virtuel, la planification de trajet et la mémoire

Le milieu virtuel est représenté par une collection hiérarchique de cartes. Le modèle comprend :

- Une carte topologique de la surface marchable.
- Une carte de perception permettant d'identifier les objets de la zone.
- Une carte de navigation incluant les trajets globaux et exécutant plusieurs variantes de l'heuristique A\*.

Les auteurs rapportent que l'une des perspectives de ce travail est d'opter pour l'activation de routines de comportements de façon parallèle plutôt que séquentielle, pour l'amélioration du rendu comportemental.

**Modèle comportemental des piétons :** Daamen [DAA 04] rapporte que les individus prennent des décisions différentes selon trois niveaux hiérarchiques: le niveau stratégique, tactique et opérationnel. En premier lieu, dans le niveau stratégique, chaque piéton planifie son but. Il s'agit d'un processus de décision préliminaire. Puis, au niveau tactique, chaque piéton commence à collecter des informations à propos du contexte et prend des décisions à court terme (i.e. navigation, choix d'itinéraire précis, etc.). Enfin, le niveau opérationnel décrit le comportement instantané et réel de marche des piétons (i.e. accélération, évitement obstacles et collisions immédiates, etc.). Son modèle se base sur le MFS de Helbing [HEL 95].

**Le Scale Based Model – SBM :** tenant compte des effets de la foule sur les comportements individuels, Tschirhart [TSH 13] propose le Scale Based Model qui se fonde sur un concept d'échelle où chaque échelon représente un ensemble spécifique de normes comportementales selon lesquelles le comportement de chaque individu peut se conformer. Son modèle est basé sur le profil psychologique des individus pour construire des foules de natures différentes, des foules qui auront ensuite une influence sur leurs propres membres. Cette approche, nouvelle, permet d'obtenir des foules, un comportement plus proche de la réalité, et utilisable dans la création artistique.

#### 3.5.1.3.4 Modèle hybride

Nous avons évoqué les avantages et inconvénients des échelles de modélisation macroscopiques et microscopiques. En effet, les échelles macroscopiques proposent la représentation des propriétés de la foule comme étant une entité à part entière. Cette échelle permet une grande réduction computationnelle contre une perte de détail. Cette perte peut être à l'origine de la limitation quant à l'applicabilité du modèle. Les modèles microscopiques, en revanche, soulignent les implications des caractéristiques individuelles. Cette approche est plus coûteuse en termes de ressources et de temps d'exécution mais présente le grand avantage d'être plus flexible et peut être utilisée dans la simulation de la foule dans des environnements dynamiques [XIO 10] [RAB 16].

Certains auteurs passent en revue les propriétés de chacune et proposent de combiner les deux échelles afin de bénéficier des avantages de chaque méthode et de remédier à ses inconvénients.

Xiong et al. [XIO 10] proposent une approche où les deux échelles coexistent dans une même simulation et fonctionnent d'une manière collaborative. Une telle approche se base sur un processus appelé *agrégation* qui collecte des éléments comme la densité et la vitesse de la simulation multi-agents et les transfère comme paramètres d'entrées vers la simulation macroscopique. Par la suite, cette opération est suivie par le processus de *désagrégation* qui collecte la densité et la vitesse de la simulation macroscopique comme des paramètres alimentant la simulation microscopique. Les auteurs lancent une série d'expérimentations comparatives entre les modèles microscopiques (multi-agents), hybrides et macroscopiques (continus), pour un cas d'étude de circulation de piétons dans un couloir d'étréitesse variable.

Les simulations multi-agents et hybrides répliquent l'effet qualitatif nommé le « *shadow effect* » [STI 00]. Après le passage des piétons dans un couloir étroit, la densité des piétons dans les zones près du bord de l'environnement sera maintenue presque nulle, c'est le *shadow effect*. Cet effet n'apparaît cependant pas pour les modèles continus. Pour ce qui est des mesures du coût de la simulation, l'approche hybride semble être un bon compromis entre les valeurs des modèles macro et hybrides. En somme cette méthode permet à la fois de fournir une bonne finesse de simulation et de réduire la consommation des ressources. Elle a en plus l'avantage de résoudre le problème d'applicabilité de la simulation macroscopique en l'alimentant avec des données de la simulation microscopique.

# Chapitre 6

## 3.6 Outils de simulation

Nous décrivons dans cette partie, les divers outils de simulation de foule appliqués au contexte ferroviaire. Nous les classons en trois grandes catégories : les simulateurs à base de modèles physiques, les simulateurs à base de grille et les simulateurs multi-agents.

Certains auteurs rapportent une des difficultés rencontrées lors de l'étude de ces simulateurs : l'obtention de détails techniques concernant certains simulateurs [ZHO 10]. Dans ce qui suit nous recensons les informations principalement de la littérature.

### 3.6.1 Modèles physiques

#### 3.6.1.1 SimWalk Transport

SimWalk [PRI 14] est un simulateur multi-agents qui se base sur le modèle de forces sociales de Helbing [HEL 95]. Le modèle suppose que les déplacements des voyageurs dépendent de leurs motivations et de leurs perceptions de l'environnement [STE 07]. L'image de l'ensemble du système est construite à partir de comportements des individus et des interactions entre eux. Le simulateur prend en charge les situations d'évacuation, les mouvements des piétons dans les transports en commun et est utilisé aussi pour évaluer les effets de réaménagement [PRI 14]. SimWalk Transport [SIM] (Figure 40) modélise les mouvements des passagers, les temps d'arrêt et l'optimisation des horaires. Ceci est intéressant pour notre problématique, mais s'agissant de zones très denses (jusqu'à 2000 agents présents dans un train et sur le quai), l'approche continue du modèle de force sociale peut être limitée notamment dans la consommation des ressources machines [ZHO 10] et la limitation des variabilités des comportements inter-agents.

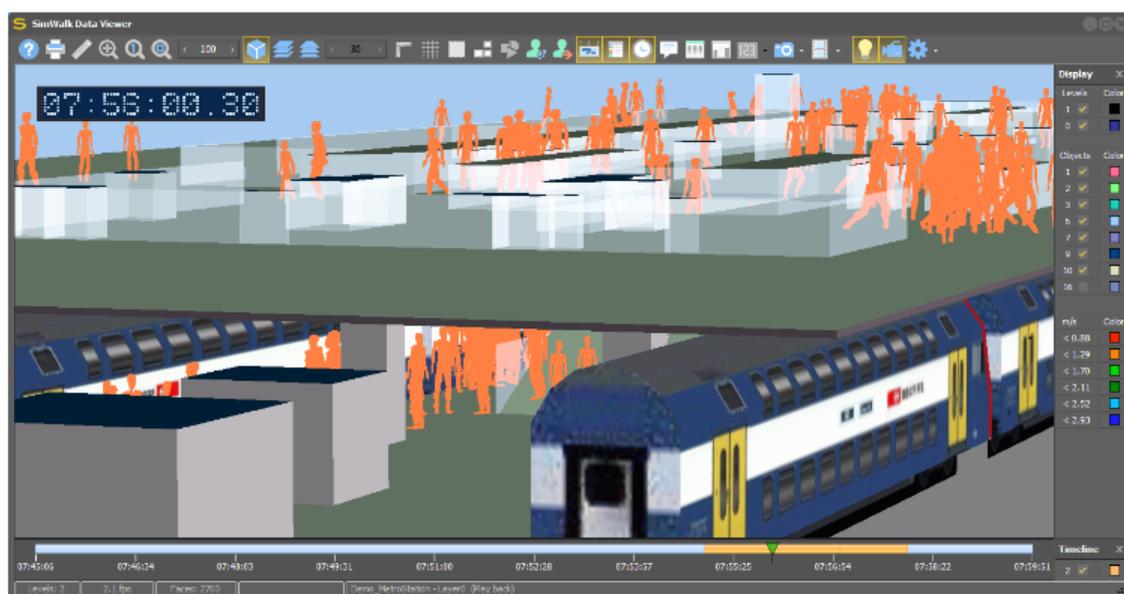


Figure 40. Capture d'écran de l'outil SimWalk

### 3.6.1.2 PTV VISSIM

VISSIM [WIE 74][HOY 97] est un modèle microscopique, qui se base sur un MFS, développé pour analyser des opérations dans le transport public. VISSIM peut modéliser des réseaux routiers intégrés se trouvant dans un corridor typique, ainsi que divers modes de transport à usage général (i.e. bus, train, camions, piétons et cyclistes). Le modèle a été développé à l'Université de Karlsruhe, en Allemagne, au début des années 1970. La distribution commerciale de VISSIM a débuté en 1993 par PTV Transworld AG [PTV 00]. Le modèle se base sur le MFS de Helbing qui contrôle le niveau opérationnel et une partie du niveau tactique. Tandis que le niveau stratégique est défini en entrée par l'utilisateur du modèle [PRI 14] (Pour la définition des trois niveaux, cf. Section 5 Modèle comportemental des piétons). VisWalk est un module indépendant qui se centre sur le comportement de la marche humaine. Voir Figure 41.

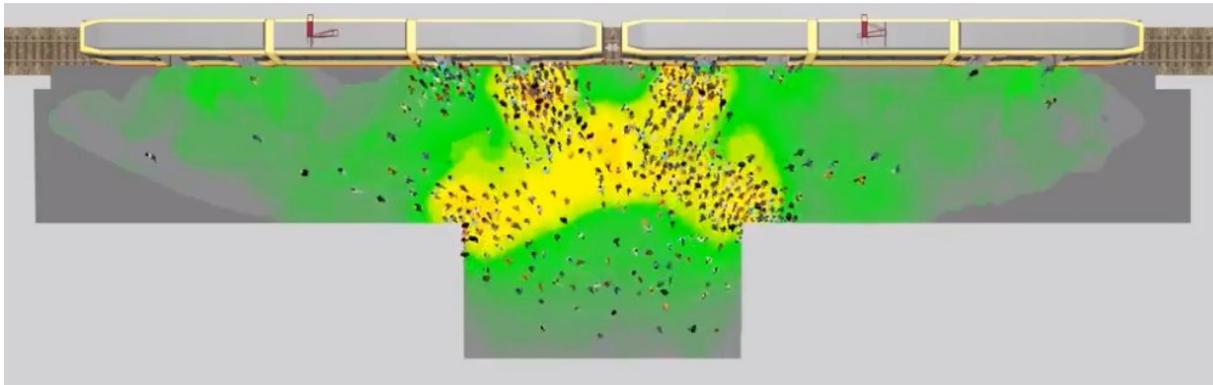


Figure 41. Simulation de PTV VisWalk et VISSIM. Vue de dessus des échanges quai-train  
(Source : Youtube)

### 3.6.1.3 Modèle RBAS (Realistic Behavior Agent Simulation)

Le modèle RBAS [BAI 14] se base sur le *Modèle de Force Sociale* de Helbing. Le modèle a pour but de reproduire le comportement réaliste de la foule en y incluant des paramètres cognitifs impliqués dans les choix d'itinéraires et les comportements d'évitement, d'attention et la notion d'espace personnel et de culture [HAL 66], ainsi que des paramètres physiologiques comme la taille d'un agent.

Le choix d'itinéraire des agents est essentiellement lié à la perception visuelle de l'espace, ainsi les piétons planifient leurs trajets en regardant autour d'eux et en estimant les mouvements des autres piétons. Les auteurs renforcent leurs travaux en se basant sur les résultats d'expérimentations en oculométrie [KIT 10]. Ces expérimentations révèlent que les piétons accordent plus d'importance aux objets qui sont devant eux plutôt qu'à ceux qui leur sont latéraux. De plus, ils font plus attention aux objets situés dans leur champ de vision central (angle de  $90^\circ$ ). Aussi, les agents semblent accorder une plus grande importance aux obstacles statiques que dynamiques. Les auteurs distinguent plusieurs types de collisions entre agents (i) collision frontale, (ii) collision arrière, (iii) collision latérale. Selon les travaux de [SAK 05] les agents prennent en priorité les trajets qui leur évitent tous types de collisions, mais si une collision a lieu, cette dernière serait plutôt une collision latérale.

Les auteurs proposent l'intégration d'un modèle de perception des émotions d'une foule [BAI 15] (i.e. tracking de trajets de personnes dans une simulation et attribution d'émotion selon le trajet).

Dans les travaux de Baig et al. [BAI 14], le nombre d'agents testé varie entre 10 et 150 agents. Nous ne disposons pas de plus d'information concernant la capacité de calcul et de génération d'agents pour ce modèle qui se base sur un MFS. Voir la Figure 42.

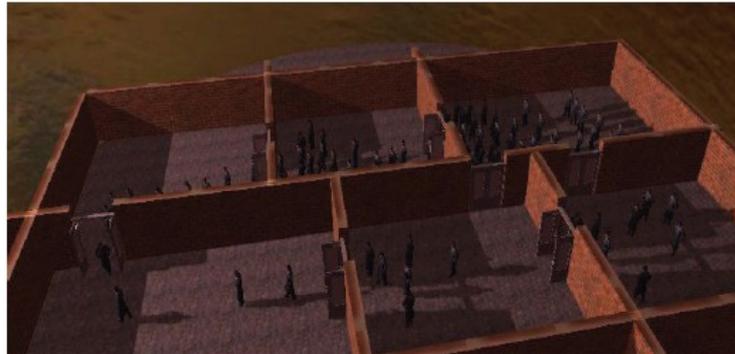


Figure 42. Simulation de RBAS

#### 3.6.1.4 Legion

Le simulateur Legion [LEG] est un système multi-agents développé initialement par Still [STI 00] et remplacé ultérieurement par une nouvelle version développée par le *Maia Institute*. Berrou et al. [BER 07] décrivent le simulateur représentant chaque piéton sous forme d'une entité circulaire bidimensionnelle qui se déplace dans un espace continu 2D. Le modèle permet de représenter des formes géométriques diverses comme les escalators, les rampes et les ascenseurs. Le modèle fonctionne selon le principe du moindre effort qui calcule l'insatisfaction à travers les trois composantes suivantes qui impliquent des coûts énergétiques différents : (i) le dérangement (i.e. marcher plus que nécessaire pour atteindre une destination donnée) (ii) la frustration (i.e. la violation de la vitesse désirée) (iii) la gêne (i.e. proximité physique avec personnes et obstacles).

Le simulateur (Figure 43) a été testé dans le contexte ferroviaire (i.e. entrant, sortant, montant les escaliers ou descendant, marchant sur tapis roulant, escalateur, quai) [BER 07] et ceci pour plusieurs types de piétons (i.e. passagers, touriste, etc.) et dans plusieurs régions (i.e. Europe, UK, USA, extrême orient, etc.). Selon ces profils de population, les paramètres suivants varient : (i) dimension de chaque entité reprise de la distribution de tailles publiées par Pheasant [PHE 98] (ii) la vitesse préférée selon des mesures effectuées par Berrou et al. [BER 07] (iii) l'espace personnel selon Hall [HAL 66] et Fruin [FRU 87].

L'approche du moindre effort peu être intéressante pour notre étude. Nous prévoyons des effets d'optimisation et de gain qui se concrétisent à travers les comportements des voyageurs (i.e. se positionner par rapport à la position de la sortie). Cependant, certains auteurs rapportent le coût en termes de temps et de performance machine de la simulation [CHA 09].

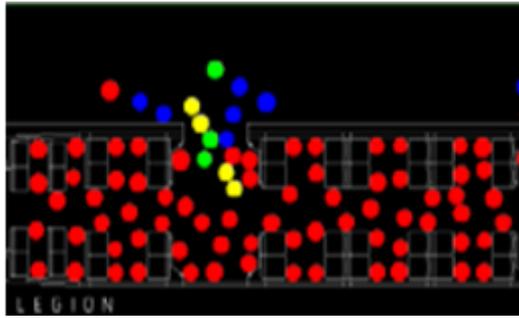


Figure 43. Capture d'écran d'une simulation de Legion [LEG][MAN]

### 3.6.1.5 Myriad II

Myriad II (Figure 44) a été créée par Still et al. [STI 00] à « *Crowds Dynamics* ». L'outil analyse les mouvements de personnes dans une foule et a pour but de déceler des défaillances d'un système donné afin de prendre des mesures préventives. Myriad est un système multi-agents, permettant l'interaction entre les individus, et aussi multi-échelle, intégrant trois outils de modélisation dans un seul environnement, ce qui rend le simulateur flexible à différentes situations.

L'outil modélise différents aspects déterminant l'environnement global : (i) le système d'analyse de réseau : pour la simulation des mouvements de la foule dans des espaces larges et complexes (ii) le système d'analyse spatiale : pour simuler comment la foule utilise l'espace dans un environnement particulier. Cette analyse se base sur des métriques spatiales, de probabilité de conflit, de gestion de l'espace. (iii) le système d'analyse multi-agents : pour représenter des agents autonomes en interaction et ayant des perceptions et des buts propres.

Dans Myriad, l'influence sur le comportement de la foule s'exprime de quatre manières : objectif, mobilité, contrainte et assimilation [CHA 09][STI 00].

De ce point de vue, Myriad est un outil qui se distingue [HEP 11 :p396] des autres par son architecture multi-échelle. Cette architecture a pour objectif principal de favoriser la flexibilité du modèle. Dans notre contexte, on peut considérer que cela rejoint notre notion de transférabilité.

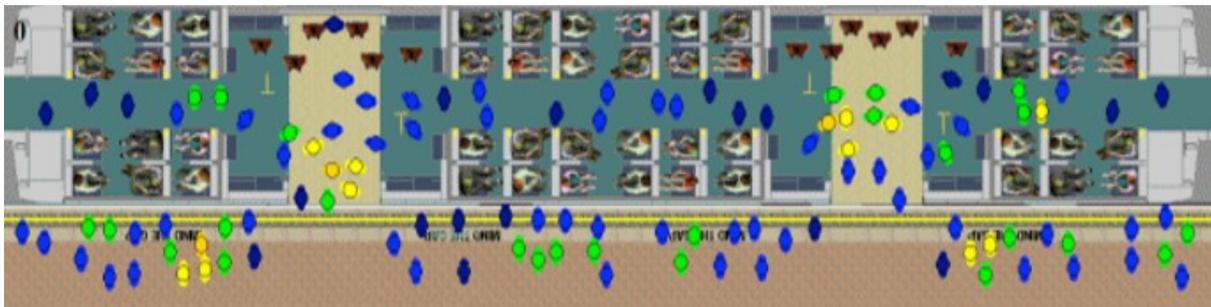


Figure 44. Capture d'écran d'une simulation multi-agents de Myriad II<sup>14</sup>

<sup>14</sup> © Simulation multi-agents de Myriad II / <http://www.crowddynamics.com/technical/>

## 3.6.2 Modèles en grille

### 3.6.2.1 EXODUS

EXODUS (Figure 45) est utilisé pour la simulation de l'évacuation et l'analyse de la dynamique des piétons. Le simulateur a été développé afin de répondre à des normes de sûreté dans les domaines de la construction maritime, ferroviaire et aéronautique [EXO]. Le modèle EXODUS comprend cinq modules en interaction qui représentent (i) les occupants (ii) leurs mouvements (iii) leurs comportements (i.e. dépassement, attente en file, la redirection, l'évitement de collision, fuite) (iv) la toxicité et (v) le hasard [OWE 96]. Dans ce modèle, l'espace est discret et les collisions physiques entre individus ne sont pas modélisées dans la mesure où les individus ne convoitent jamais une cellule occupée [VAL 13].



Figure 45. Capture d'écran d'une simulation d'EXODUS

## 3.6.3 Modèles à base d'agents

### 3.6.3.1 MassMotion

Mass Motion a été développé en 2005 par Erin Morrow à ARUP [ARU], qui est un bureau d'études et de conseil en ingénierie britannique spécialisé dans la construction. Mass Motion est utilisé dans divers secteurs comme la planification des transports, l'évacuation d'urgence, la modélisation de processus (i.e. la sécurité et l'enregistrement dans les aéroports), les stades sportifs... L'outil est souvent utilisé dans des scénarios du type « Et qu'est-ce qui se passerait si ? », et ceci dans le but de conception et d'anticipation.

Mass Motion (Figure 46) est un système multi-agents 3D. Les agents disposent de décisions indépendantes pour atteindre un but. Ils possèdent une position, une orientation, une vitesse et un but. Chacun de ces agents est identifié par son type (touriste, habitué, etc.). Les agents perçoivent les contraintes physiques autour d'eux (murs, obstacles, etc.) et ont un cône de vision dans lequel ils sont capables de reconnaître d'autres agents. Un agent effectue une meilleure estimation de son itinéraire cinq fois par seconde, c'est-à-dire, presque continuellement.

Le système intègre deux types de règles (i) le premier est de niveau supérieur : dans lequel les agents tentent d'aller vers une cible globale et de s'adapter, en cas de congestion, en déviant leurs trajectoires pour aller plus vite (ii) le second est de bas niveau : les règles utilisées sont plus

réfléchies et impliquent des décisions locales afin de déterminer le meilleur moyen de se déplacer dans l'environnement [CHA 09].

L'outil a été utilisé pour l'étude de l'influence des taux de congestion sur les temps d'arrêts dans les transports Canadiens [KIN 14]. Les auteurs ont défini quelques propriétés et comportements des agents afin de rendre les mouvements plus réalistes (i.e. diamètre du corps, marcher à droite comme pour la conduite, etc.).

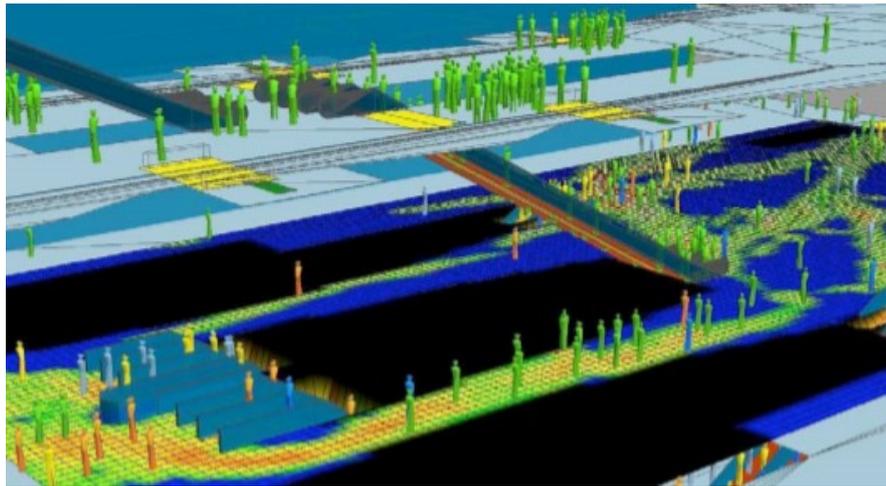


Figure 46. Capture d'écran d'une simulation de foule de Mass Motion au terminal de Transbay à San Francisco [CHA 09][ARU]

### 3.6.3.2 Voxelia

L'outil s'appelait JaSIM et a été développé au sein du laboratoire de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard (UBTM) sur la base d'outils et de technologies existantes : Java, plateforme JANUS, plate-forme de réalité virtuelle. En 2009, les modèles et outils ont fait l'objet d'une collaboration active et d'un contrat de transfert technologique au profit de la société Voxelia [VOX] [GAL 13] (Figure 47).

JaSIM se base sur l'approche influence / réaction. En d'autres termes, les agents ne peuvent pas directement modifier l'environnement. Par la suite, dans cette théorie, un agent n'effectue pas d'action mais produit des influences qui ne modifient pas directement l'environnement mais forment des points de vue. Le modèle comporte deux phases : la phase d'influence durant laquelle les influences sont collectées et les résultats de leurs combinaisons dans la phase de réaction. Cette dernière est gérée par l'environnement qui modifie son état selon les résultats des combinaisons [MIC 07].

Le modèle JaSIM [GAL 09] peut représenter l'environnement en 1D (modèle de graphe) 2D ou 3D. La plateforme a simulé les mouvements de 3000 agents dans l'aéroport d'Orly – France. La simulation est centrée sur la perception des différents agents. Le terme perception dans ces travaux désigne principalement la vision, les autres sens n'étant pas encore implémentés. La perception visuelle garantit la partialité et la localité de la perception à travers le : (i) frustum

culling : élimination des objets hors de cône de vue (ii) occlusion culling : élimination des objets cachés.



Figure 47. Simulation d'une station de Métro tirée de l'outil SIMULATE<sup>15</sup>

### 3.6.3.3 SimTRap Prototype (Simulation of exchanges between TRain and Platforms)

SimTRap est un modèle à base de règles est utilisé par la RATP. Le simulateur a pour but d'optimiser les échanges quais-trains et par la suite d'améliorer la fréquence des trains et de réduire les risques dus à des situations de congestion [FIE 09]. L'environnement du modèle est assez détaillé et décrit l'agencement des quais et des trains. L'environnement inclut des objets dynamiques comme les trains en circulation, l'ouverture et fermeture des portes, ainsi que le rabattement des strapontins. SimTRap est construit sur le système multi-agents NetLogo [WIL 99b] et l'extension GIS pour une reproduction plus fidèle des formes des objets. Un agent est représenté par une forme ovale représentant le corps et les épaules. Deux largeurs différentes sont assignées, selon le genre.

De plus, le modèle prend en compte des caractéristiques individuelles de l'agent (i.e. voyageur montant, descendant du train, sa destination, sa direction, sa vitesse, sa position, son champ de vision). La densité locale perçue d'un agent influence sa destination, vitesse et direction. La modélisation des comportements des agents reprend le modèle d'éco-résolution de problème de Ferber [FER 89] selon lequel les agents : (i) tentent de trouver un état de satisfaction (ii) fuient des états qui les rendent insatisfaits.

L'approche d'éco-résolution peut être adaptée au contexte ferroviaire : dans un espace semblable le calcul de gain et de perte, et les stratégies régulatrices sont très fréquentes. Néanmoins, l'approche motivationnelle plus générale est flexible, compte tenu que l'on ne dispose pas actuellement d'une connaissance complète des comportements émergents dans ce contexte. Voir Figure 48.

---

<sup>15</sup> © Voxelia



Figure 48. Simulation de passagers montants et descendants du train dans SimTRap

### 3.6.3.4 GOLAEEM

Dans le cadre d'une étude conduite à la SNCF - Direction Innovation et Recherche, les auteurs [SOU 11] (Figure 49) s'intéressent à la modélisation des flux de passagers au moment de l'arrêt du train. Dans l'outil, des comportements sont intégrés comme le choix de l'emplacement sur le quai suivant une connaissance de la position des portes, des règles de politesse pour laisser descendre les autres passagers avant de monter, la distance sociale qui sépare les agents. Les agents sont motivés par un but, l'espace du modèle est continu.

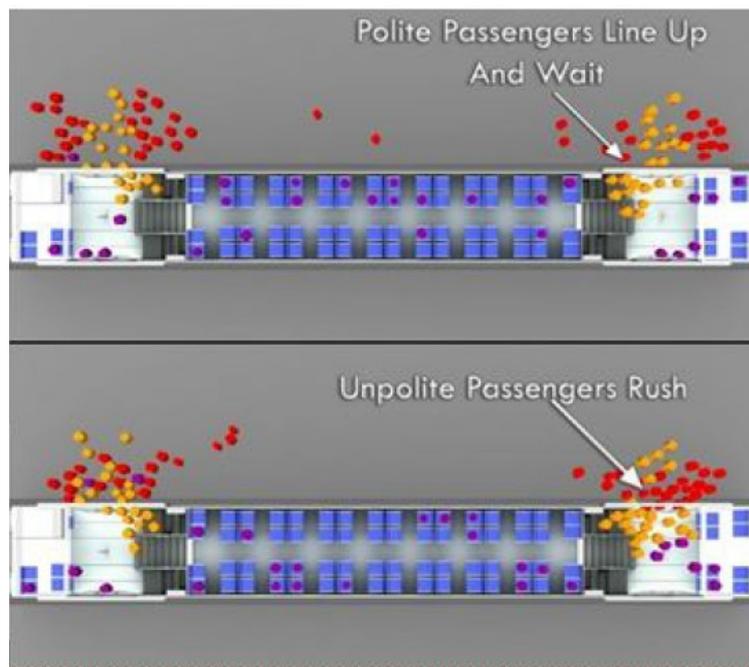


Figure 49. Capture d'écran d'une simulation du niveau de politesse des passagers - GOLAEEM [SOU 11]

### 3.6.3.5 SIMULEM

L'outil SIMULEM [PAR 10] est un système multi-agents qui permet de modéliser la prise de décision des personnes en interaction avec l'environnement et ses composants (équipements dans les gares, architecture de la gare, etc.). SIMULEM se différencie de Legion et Myriad par le fait que ces outils se centrent plus sur la navigation et considèrent que ce type de situation ne requiert pas une grande capacité de décisions. Cependant, les auteurs [PAR 10] argumentent qu'en gare, la situation requiert une grande capacité de décision. En effet, plusieurs actions sont

réalisées dans la gare et peuvent influencer la navigation comme : acheter un ticket, consulter les panneaux d'affichage pour les prochains départs, se joindre à une queue et attendre, éviter des obstacles, etc.

En outre, le modèle comportemental de SIMULEM se base sur une approche cognitive qui adopte la boucle perception-décision-action. Le processus décisionnel est multi-couches et peut être comparé facilement à la pyramide de Newell [NEW 90]. La couche des comportements sociaux n'est pas l'objet de l'étude et n'y est pas représentée [PAR 10]. Les autres couches sont représentées : (i) rationnelle : concerne les décisions logiques (ii) cognitive : affine la couche rationnelle et prend en charge des décisions contextuelles (iii) réactive : des comportements physiques comme la navigation, la perception et les actions sur les objets (iv) physique : gère la physiologie de l'agent.

Dans SIMULEM, seulement la locomotion et l'animation des agents sont prises en compte par le modèle *MKM* [KUL 05]. Par la suite, le concept d'interaction se basant sur le modèle *BIIO* (*Behavioural Interactive and Introspective Object*) [PAR 06] distingue deux objets physiques : l'effecteur qui participe à l'interaction sans pour autant en être l'initiateur, et l'interacteur qui représente un agent autonome pouvant réaliser une interaction et gérer des tâches comme l'évitement. Dans ce cas, la personne qui a initié l'évitement est l'interacteur. Voir Figure 50.



Figure 50. Simulation 3D de SIMULEM. (a) vue libre (b) vue de dessus

### 3.6.3.6 Direct IA (Direct Intelligent Adaptation)

DirectIA est un moteur de modélisation comportementale développé par MasaGroup [MAA]. Le système se base sur des agents motivationnels et a pour but un rendu microscopique [COM 05]. Le système [CHI 03] comporte trois couches. Les deux couches décisionnelles (i) graphe motivationnel (ii) graphe comportementale, déclenchent l'activation de la troisième couche (ii) d'action à travers laquelle l'agent sélectionne l'action la plus appropriée au contexte.

Les auteurs expliquent le fonctionnement du :

- Graphe motivationnel : DirectIA a été développé à partir de recherche en éthologie et reprends quelques idées et concepts de cette science de comportements. De ce point de vue, une motivation peut être vue comme une variable interne qui compte pour l'état interne de l'entité et les stimuli qu'elle reçoit [MCF 93]. La motivation définit des buts

possibles pour l'entité et l'utilise pour déclencher des comportements. En atteignant les buts recherchés, l'entité essaie de maintenir la variable en un état acceptable, c'est-à-dire « satisfaire la motivation ». De plus, l'entité est capable de gérer plusieurs buts simultanément et de combiner des alternatives compétitives.

- Graphe comportemental : alors que chaque nœud du graphe décrit une règle comportementale traitant de ses sous-objectifs, les feuilles du graphe définissent les actions finales. L'évaluation des règles se fait couche par couche, faisant propager une valeur de force pour les nœuds ou les actions finales. Cette évaluation itérative du graphe évite le goulot d'étranglement lié aux stratégies de backtracking.
- Graphe d'action : une fois que l'évaluation du graphe comportementale est faite, l'agent sélectionne l'action la plus appropriée selon la propagation de force de comportement [TYR 93]. Les actions élémentaires sont directement liées aux agents effecteurs physiques afin d'interagir avec l'environnement.

Chaque agent de la foule hérite d'un modèle comportemental commun de DirectIA. Cependant, chaque entité est individuellement instanciée, ce qui permet d'implémenter des comportements et des personnalités hétérogènes. L'outil a été utilisé pour simuler des situations normales dans des stations de métro et des situations de stress et d'évacuation dans une station métro. Le système utilise une approche macroscopique appelée COHUE (*CO*mportements *HU*mans *E*mergents) qui prend en compte le concept de l'émergence. Voir Figure 51.

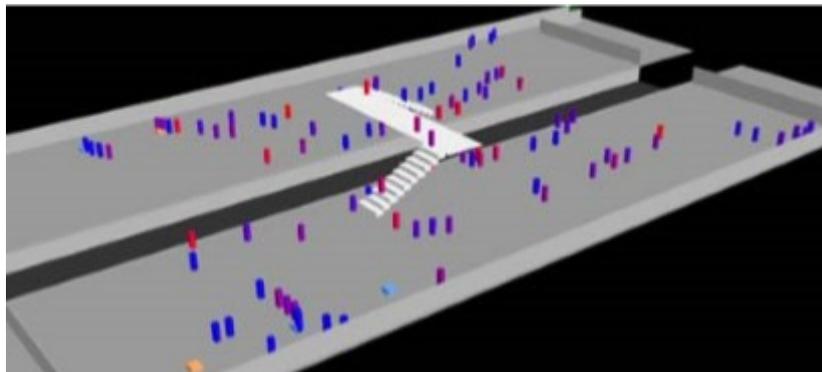


Figure 51. Modèle DirectIA dans une gare. La motivation de l'agent est satisfaite pour les agents en bleu, non satisfaite pour les agents en rouge

### 3.6.3.7 SpirOps Crowd

SpirOps Crowd [BUE 03] est un système multi-agents qui se base sur l'approche motivationnelle. SpirOps Crowd permet la génération d'un grand nombre d'agents ainsi qu'une simulation représentant les parcours des agents dans un espace-temps finement échantillonné. Un agent peut être vu comme percevant son environnement à travers des « senseurs » et agit sur son environnement à travers des « *actuateurs* » [RUS 02]. Un ensemble de *drives* représente les motivations à l'origine des actions [STE 10].

Le graphe de navigation est calculé par *SpirOps PathGenerator*. Ce graphe détermine les zones accessibles et comment elles sont connectées. Le système de navigation contient trois couches :

- Une couche qui sélectionne un chemin selon l'heuristique A\*.

- L'algorithme Platter Lift « lisse » le chemin sélectionné par A\* en connectant plus directement les points de ce chemin. Cette technique permet de rendre les déplacements plus réalistes.
- Le plus bas niveau de ces couches est conduit par les comportements implémentés dans SpirOps AI Editor. Ces comportements traitent des problématiques comme l'évitement de collision.

Pour l'amélioration des comportements, le cœur de SpirOps Crowd a intégré des comportements dérivés de la notion de la proxémie [HAL 66]. Par cette notion, trois drives définissent les comportements des agents :

- Conserver l'espace personnel
- Eviter les obstacles statiques et dynamiques, et notamment les regroupements de personnes

Plus récemment, les développements ont porté sur l'ajout de nouveaux comportements, en se basant sur des laboratoires de recherches partenaires en sociologie ou psychologie. Ces comportements regroupent notamment :

- Les files d'attente : ces comportements permettent de gérer les queues linéaires ou la notion de scène (les gens se pressent contre les bords d'une scène virtuelle ou non).
- Les groupes : les personnes se déplacent en groupe et s'attendent mutuellement. Elles peuvent se séparer pour se retrouver plus tard.
- Les déplacements dans un environnement inconnu : c'est-à-dire sans connaissance préalable des lieux, les personnes s'orientent alors en se basant sur des indications ou des cartes qu'elles peuvent croiser.
- Les comportements de panique : ils permettent de simuler des situations de panique avec des degrés de stress plus ou moins importants.

L'approche poursuivie par SpirOps consiste à créer de nouveaux comportements pour augmenter le nombre et la qualité de leurs comportements, ainsi que leurs réalismes. Cette approche incrémentale est rendue possible par une technologie propriétaire nommée *Drive Oriented* qui permet de créer un système décisionnel par ajouts successifs de nouvelles motivations sans se préoccuper des motivations existantes.

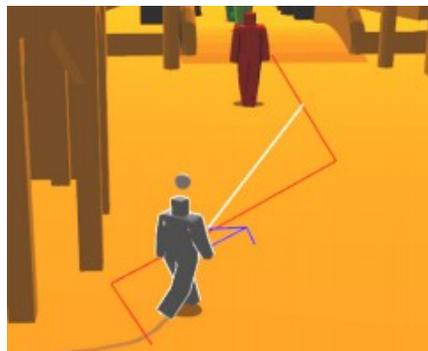


Figure 52. Simulation de SpirOps montrant le système de navigation à trois couches, le chemin A\* (en rouge), le Platter Lift (en blanc), et l'évitement des obstacles (flèche bleue)

### 3.6.3.8 MASSIVE Software (Multiple Agent Simulation System in Virtual Environment)

Massive (Figure 53) est utilisé pour générer des effets visuels pour l'industrie cinématographique. Il est possible de créer facilement des milliers ou des millions d'agents qui agissent tous comme des individus. Pour leur premier cas d'étude, qui consiste en la visualisation de personnes dans un quartier pauvre, des auteurs [BUR 08] utilisent « *Rhinoceros 4.0* » pour la modélisation 3D et choisissent l'agent « locomotion ». Le second cas d'étude est la visualisation de personnes dans une salle modélisée en 3D sous « *FormZ* » et les agents choisis sont les agents dits « ambiants ». Dans Massive, l'agent de locomotion dispose d'environ 100 mouvements typiques de qualité cinématographique (i.e. position assise, la position debout, la marche, le jogging et la course, etc.), qu'il est possible de calibrer et en plus d'introduire des transitions naturelles entre les mouvements. Le mouvement de marche inclut des variations émotionnelles : joyeuses, neutres ou tristes. De plus, les agents sont capables d'éviter les collisions entre eux et les obstacles et de suivre les champs d'écoulement. L'agent de locomotion a également un sens de l'espace personnel, et effectuera des mouvements divers pour maintenir cet espace personnel. D'un autre côté, l'agent ambiant est capable d'avoir des conversations et dispose d'une beaucoup plus grande variété de mouvements assis. L'outil dispose de type d'agents ambiants, décontractés et formels. Les agents dans Massive peuvent percevoir à travers la vision, l'audition, exprimer des émotions basiques, avoir des niveaux d'énergie et sont guidés par leurs buts [MAS].



Figure 53. Comportement des personnes dans un bidonville dans Massive<sup>16</sup> (Auteur : Andres Herzog).

### 3.6.3.9 Modèle d'échanges quais-trains multi-agents 3D

Coxon et al. [COX 15] présentent un modèle de l'interaction entre les agents ainsi que leurs motivations sous forme d'arbre décisionnel. Les auteurs se sont intéressés à une modélisation 3D visant à aider l'interprétabilité d'une simulation donnée, vu les avancées récentes et notables en temps de traitement d'informations graphiques complexes. Leur simulation met en avant les propriétés de chaque agent (i.e. le genre, l'âge, le style vestimentaire et l'action : marche, occupé par son téléphone, assis, etc.).

---

<sup>16</sup> © Comportement des personnes dans un bidonville dans Massive / Andres Herzog

### 3.6.4 Autres outils

D'autres outils et simulateurs sont utilisés pour la simulation de comportement de groupe comme *Swarm*, *REPASt* (the *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*), *MASON* (*Multi-agents Simulation Of Neighborhood*), *StarLogo*, *NetLogo*, etc... Pour ce qui est des outils de simulation d'évacuation : *BuildingEXODUS*, *EGRESS*, *PAXPORT*, *SIMULEX*, *STEPS*, *TermSIM*...

### 3.6.5 Discussion

En ce qui concerne, les modèles physiques principalement basés sur les MFS, la problématique de modéliser l'espace d'une manière continue en utilisant le MFS implique une consommation accrue des ressources, situation qu'il faut éviter compte tenu du niveau de granularité visé et du nombre d'agents à générer (zones très denses). Nous rapportons aussi la difficulté de modéliser des phénomènes sociaux et la dimension comportementale avec des équations mathématiques. Pour ce qui est des ACs, il s'agit de modèles à espace discret. Comme argumenté dans la partie sur les automates Cellulaires (page 105), l'approche espace discret ne semble pas être la meilleure pour répondre à notre problématique. S'agissant de comportements de foule et ses effets sur les temps d'arrêts, ceci requiert un haut niveau de finesse dans la représentation des événements, du temps (i.e. de l'ordre de quelques secondes) et de l'espace (i.e. de l'ordre de quelques centimètres).

Les remarques précédentes renforcent notre idée d'utilisation des systèmes multi-agents et nous orientent vers un système qui échantillonne très finement l'espace et le temps afin de pouvoir reproduire les événements des échanges quai-train qui se produisent pendant quelques secondes, et permet à la fois un bon compromis entre l'utilisation des ressources computationnelles et le réalisme attendu de la simulation.

De plus, l'adéquation et la possibilité de développements spécifiques ont fait l'objet d'études internes à la SNCF [SOU 09]. Compte tenu des caractéristiques requises du simulateur pour traiter notre problématique, le simulateur de SpirOps Crowd [BUE 03] semble être le plus approprié. En effet, ce simulateur est un système multi-agents qui se base sur l'approche motivationnelle. Il permet un rendu microscopique, finement échantillonné, et un graphisme 3D réaliste pour l'interprétabilité des événements. Il permet aussi une grande flexibilité et adaptabilité du modèle à notre contexte.

**Deuxième partie**  
**Problématiques et questions de recherche**

## 4 Problématiques et questions de recherche

### 4.1 Positionnement

Le problème posé par SNCF Réseau peut être généralisé de la façon suivante : comment prédire le comportement d'une foule dans un contexte donné, en fonction de faibles variations de ce contexte ?

Comme pour tout problème, la solution requiert la résolution d'un processus qui comporte une phase d'observation, une modélisation, une validation du modèle avec une simulation et une mesure de la transférabilité de la solution vers un autre contexte cible de même nature en considérant le contexte initial comme un contexte source.

Un aspect essentiel de la simulation qui permet la validation du modèle dans le contexte initial est de montrer sa capacité prédictive à d'autres contextes cibles ; en considérant le contexte initial comme la source de ces prédictions et d'analyser les limites de cette capacité. Il s'ensuit que cette simulation doit être dotée d'une validité interne et externe.

### 4.2 La méthode proposée

Pour résoudre le problème posé, nous détaillons les étapes du processus d'application de la méthode :

#### Etape 1 - Recueil et validation des données

La méthode de modélisation-simulation se base sur l'identification d'un premier contexte source. Dans le cadre de notre exemple, celui-ci se décompose spatialement en plusieurs lieux (quai, train, interfaces quai-train).

Etape 1.1 - Pour chaque lieu, est conduite une série d'observations et d'études psycho-cognitives afin de recueillir les comportements individuels des passagers et l'incidence de ces comportements sur le déplacement de l'ensemble des passagers. Par exemple, on peut observer que le stationnement en un point du quai de passagers qui attendent leur train provoque une gêne à la descente des passagers du train arrivé en gare.

Etape 1.2 - Les études sont conduites sur la base de variables fournies par la littérature, par une phase d'observation ainsi que par les échanges avec les professionnels du métier (i.e. régulateurs de flux sur le quai, conducteurs) qui ont une connaissance de comportements fréquents. On en déduit un ensemble de causes qui sont, par hypothèse, à l'origine de ces comportements. Par exemple la position du stationnement sur le quai peut résulter de la position de la sortie dans une station qui est une destination fréquente.

Etape 1.3 - Dans cette étape, on tente de valider par tous les moyens disponibles les hypothèses précédentes à partir du lien de causalité. Par exemple, on compare la position relative de stationnement à celles de toutes les stations qui sont des destinations fréquentes.

## **Etape 2 - Choix et pondération des comportements**

Il s'agit ici d'estimer la fréquence relative des comportements. Pour cela, les variables sont pondérées afin de définir leur représentativité dans le comportement du système gare-trains-voyageurs. Le degré d'occurrence d'un comportement peut, dans certains cas, être un indicateur de sa représentativité. Néanmoins, dans le cadre de la fluidité des échanges, il suffit qu'une seule personne ne suive pas le mouvement général pour générer des dysfonctionnements notables. Ainsi, pour toute donnée recueillie, nous recherchons toute association d'événements non habituels ou connus qui pourraient influencer la fluidité.

## **Etape 3 - Construction du modèle de simulation**

Les comportements sélectionnés et pondérés, nous poursuivons par une phase de formalisation du comportement en fonction des liens de causalités établis, des possibilités du langage de simulation, de l'outil informatique ainsi que de son niveau d'abstraction. La formalisation des règles doit être flexible, avec un minimum de paramètres d'entrée.

La modélisation microscopique multi-agents permet le passage des motivations et des comportements individuels à l'émergence du fonctionnement global du système qui est représenté par la foule. L'échelle microscopique offre le niveau de granularité adéquat à cette problématique. Elle est centrée sur le calcul des motivations par agent en se basant sur des préférences de nature et de poids multiples. Ces préférences sont en concurrence, ce qui permet de générer une variabilité de choix flexibles à ce qu'offre le contexte. Ainsi, dans une architecture en parallèle, le système évolue indépendamment de tout enchaînement spécifique et déterminé à l'avance, en dehors des grands événements de la gare prévus théoriquement (i.e. arrivée et départ d'un train, temps prévu de stationnement à quai, etc.). Contrairement aux architectures séquentielles, si ces enchaînements ne sont pas respectés, cela peut conduire à un dysfonctionnement du système. Ainsi, l'architecture en parallèle permet une auto-organisation du système tout comme dans la réalité. En effet, si les choses ne se déroulent pas comme prévu, il existe d'autres solutions alternatives même si elles ne conviennent pas tout à fait aux motivations des agents.

D'un autre côté, l'approche motivationnelle permet une vision proximale qui lie les causes plus ou moins immédiates et de s'affranchir de la question de l'origine « ultime et profonde » de la motivation, que nous considérons comme non essentielle à notre problématique. La formalisation des liens de cause à effet des comportements, permet d'avoir une meilleure connaissance scientifique d'un phénomène et de ses paramètres ; ce qui permet de favoriser la transférabilité vers un contexte cible.

L'aspect de la prise de décision en temps réel trouve son origine dans la perception visuelle des agents. Dans la simulation, les agents se perçoivent mutuellement tout comme cela se passe en réalité. Ainsi, la prise de décision s'effectue en temps réel. Cela rejoint le point de vue de la cause proximale qui prend en compte les variabilités contextuelles externes et internes dans la modification du comportement de l'agent.

## **Etape 4 - Calibrage et validation du modèle de simulation**

Nous validons et calibrons le modèle. Pour cela, nous procédons à une étude comparative des comportements observés et de ceux obtenus par la simulation. On évalue le degré de ressemblance

entre les deux milieux par les micrométriques et macro-métriques obtenues empiriquement. Par exemple, nous prévoyons un effet de l'hétérogénéité de la répartition sur le quai comme une cause de la distribution des temps d'arrêt du train, à quai. La densité sur le quai peut être considérée comme la résultante des comportements et donc des motivations. Nous sommes à même, d'une part, de mesurer la répartition sur le quai qui résulte d'une motivation et d'autre part, la même répartition résultante de la simulation multi-agents. En outre, en cumulant ces répartitions, nous obtenons une répartition globale sur le quai qui est mesurée et simulée. Dans ce cas, la répartition des distributions mesurée et simulée est une validation micro-métrique. Nous pouvons également mesurer la distribution des temps d'arrêt des trains en station de manière mesurée et simulée. Ces valeurs étant la résultante de l'ensemble du phénomène étudié, nous considérons que la comparaison des distributions de temps d'arrêt est une validation macro-métrique. On ne peut s'appuyer uniquement sur un type de données : la validation par les temps d'arrêt peut résulter de phénomènes indépendants de la dispersion, même validée, pouvant n'avoir qu'un impact limité sur les temps d'arrêts. La comparaison des métriques, aussi bien quantitativement que qualitativement, permet dans un premier temps d'ajuster les paramètres considérés comme exogènes. Si ce processus itératif converge, il aboutit à une validation du modèle. Nous verrons que nous avons trouvé une calibration qui fournit une modélisation conforme à l'expérience.

Cette phase de calibrage est essentielle, car outre le processus itératif de calibration du modèle, la comparaison entre les données observées et les données simulées fournit de nombreuses informations sur le fonctionnement du système.

### **Etape 5 - Le transfert du modèle**

La question de recherche posée est la suivante. Le modèle est-il transférable et, dans l'affirmative, à quelles conditions ? Si notre méthode est validée, nous devons alors vérifier les critères de transférabilité du modèle qui, dans la pratique, permettront d'estimer si la simulation d'un autre site à partir du même modèle sera encore valide.

Lors du traitement des données, le caractère endogène ou exogène (s'ils sont contexte-dépendants ou transférables) des paramètres du modèle a été défini. Pour les paramètres endogènes, des analyses statistiques avancées ont permis de lier l'occurrence de chaque comportement avec des variables individuelles et contextuelles. Cette connaissance permet de valider les conditions de transférabilité du modèle vers un site à étudier. Par exemple, on peut considérer que la fréquence d'un comportement est liée à la présence de bagages, qui est différente selon qu'une station est sur une ligne qui dessert ou ne dessert pas un aéroport.

Lors d'un transfert du contexte source A vers le contexte cible B, dans le meilleur des cas, le modèle est valide sans problème sur le second site B, il est donc transférable. Sinon, il y a trois cas types de problèmes de transfert :

- Une ou plusieurs des motivations de A n'existent pas dans B
- Une motivation de B n'existait pas dans A
- Les motivations n'ont pas la même pondération (représentativité) d'un contexte à un autre :
  - o Soit les paramètres utilisés pour le calcul de la pondération du comportement ont changé

- Soit le calcul ne tient pas compte d'un paramètre est nécessaire dans la situation B alors qu'il ne l'était pas dans la situation B

Si un de ces problèmes se présente, nous procédons à une analyse des critères qui ont défavorisé ce transfert dans le but de satisfaire les conditions de transférabilité.

### **4.3 Validation de la méthode**

Pour valider la méthode proposée, nous l'avons appliquée intégralement jusqu'à l'étape 4. Nous montrons ainsi la validité du modèle sur la gare source (Bibliothèque François Mitterrand).

Pour valider la transférabilité, il est nécessaire de pouvoir transférer le modèle conçu à partir d'une station source vers une station cible et de valider ce transfert en mesurant son applicabilité au site cible.

Nous avons choisi de tester la transférabilité du modèle vers une gare cible existante, en l'occurrence un sous ensemble des quais du RER de la gare du Nord de Paris. Cette gare a été choisie car elle conservait des caractéristiques de la gare source essentielles au modèle (trafic voyageur montant et descendant, architecture du quai, types de trains en circulation, etc.)

La même série d'études et de recueil de données est conduite sur la gare cible. Ces données servent à évaluer la validité externe du modèle développé et testé sur le premier site et qui est simulé sur le second site. Cette analyse sur le site cible se fait sur la base des métriques établies pour le site source.

La validation de la transférabilité se fait alors en comparant, comme pour la gare source, les observations et les paramètres mesurés in situ avec ceux qui sont obtenus avec la simulation.

**Troisième partie**  
**Expérimentations**

## 5 Expérimentations

Dans cette section, nous introduisons une série d'expérimentations en vue de comprendre les comportements des voyageurs lors de leurs passages quai-train et train-quai.

### 5.1 Choix de la première gare et contexte de l'étude

La gare d'étude est la gare « Bibliothèque François Mitterrand » de la ligne du RER C. Elle a été choisie, entre autres, parce qu'elle est considérée comme une gare très dense. Cette gare dessert les deux directions Nord et Sud sur les quais AB et EF respectivement.

**Caractéristiques de la ligne :** la ligne C du RER (Figure Annexe 3), comporte au total 7 branches, elle dessert 84 gares au total. Nous recueillons plusieurs types de missions (origine – terminus du train) dans les deux sens et allant vers les diverses branches. Certaines de ces missions sont plus fréquentes dans une journée et d'autres apparaissent spécifiquement aux heures de pointes.

**Caractéristiques des quais :** les quais sont des quais centraux, ils desservent de part et d'autre deux voies de même direction mais de missions différentes (branches différentes). De plus, ces quais présentent une courbure qui s'exprime de manières opposées sur un seul quai (concave, convexe). Quant à la courbure du quai, comme discuté dans la (page 61) fait apparaître des lacunes, qui peuvent causer des ralentissements de flux de personnes.

**Exploitation des voies d'un même quai :** cette gare présente aussi une autre spécificité quant à l'exploitation des deux voies desservant un même quai. Par exemple, pour le cas quai EF, théoriquement il y a certaines missions qui sont planifiées sur E et d'autres sur F : certaines missions passent plus souvent par la voie F et d'autres par la voie E. En pratique : il y a changement de voie si la voie planifiée est occupée. De plus, en général, il y a peu de temps entre deux trains, de l'ordre de deux minutes voire moins.

**Caractéristiques du matériel roulant :** il existe 4 types de matériels roulants sur la ligne C de la famille des Z2N: les Z5600, Z8800, Z20500, Z20900. Certains matériels roulants peuvent se combiner entre eux faisant ainsi rassembler plusieurs variabilités de paramètres pour un seul train. Les matériels roulants sur la ligne C présentent la caractéristique d'être à deux niveaux (bas, haut) ayant des différences entre leurs capacités d'accueil de passagers et de sièges assis (infra : Tableau Annexe 4) et ayant des agencements intérieurs différents selon le type : par exemple pour la Z20900 nous avons une disposition de type 2+2 sièges (supra, Figure 24), tandis que les autres, nous avons une disposition de sièges de type 2+3. Ces diverses combinaisons donnent lieu aussi à des variabilités de longueurs des trains rendant difficiles la localisation précise de l'emplacement des portes du train au niveau du quai (Tableau Annexe 1).

**Caractéristiques des flux sur les quais et dans le train :** les deux quais montrent une dynamique assez complémentaire sur une journée (les arrivées et les départs).

L'heure de pointe du quai AB se situe plutôt dans la matinée, entre 7h et 10h, avec beaucoup de descentes contre peu de montées et une occupation qui atteint les 1000 passagers à bord du train

(Figure 54.a). En revanche, pour le quai EF, l'heure de pointe commence à partir de 17h jusqu'à 20h avec beaucoup de montées, peu de descentes et une importante occupation qui atteint les 1500 passagers, pendant la période de pointe (Figure 54.b).

Les deux dynamiques semblent être liées ; un peu comme si toutes les descentes (personnes allant au travail) du matin sur le quai AB étaient les mêmes que les montées (personnes rentrant chez elles) le soir sur le quai EF.

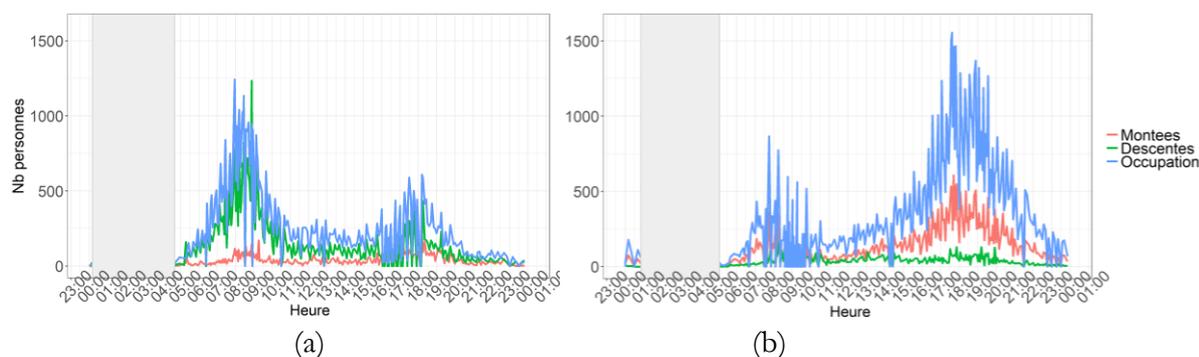


Figure 54. (a) Comptage quai AB, BFM, sens Nord, JOB, 2017 (b) Comptage quai EF, BFM, Sens Sud, JOB, 2017 (Source : Comptage SNCF Transilien)

Pour l'étude des comportements, habitudes et retours des usagers, le blog du RER C [BLO 12] fournit une bonne base qui décrit les comportements et les difficultés rencontrées dans la gare BFM. Nombreux commentaires des usagers rapportent les habitudes et exposent certains de leurs besoins (i.e. plus de sièges assis sur le quai, amélioration de la luminosité et de l'audibilité des annonces sonores, etc.). Cela est très utile notamment dans la compréhension de certaines conduites, erreurs d'interprétation ainsi que de l'inconfort résultant de la situation.

## 5.2 Observations :

La problématique proposée par la SNCF concerne les échanges entre le train et les quais. Ces échanges sont en partie influencés par le positionnement des usagers sur le quai et le positionnement des passagers dans le train, au moment de l'arrivée du train à quai. Nous avons ainsi décidé de diviser nos observations en 3 parties : les comportements de positionnement sur les quais, les comportements de positionnement dans le train et les comportements liés à l'échange des passagers à proprement parlé. A cet égard, nous effectuons des expérimentations sur les comportements et les événements qui se produisent dans ces trois contextes.

### 5.2.1 Expérimentations I : Phase quai

Dans ce qui suit, une série d'expérimentations est conduite en vue de comprendre les choix de positionnement des usagers sur le quai.

### 5.2.1.1 Expérimentation I.1 : Questionnaire de motivations de positionnement sur le quai

#### 5.2.1.1.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Nous constatons des hétérogénéités de distribution de voyageurs sur le quai. Comme évoqué dans la Section 3, ce phénomène a fait l'objet de contre-mesures pour répartition équilibrée sur le quai (amélioration de la qualité de l'attente) et par conséquent de la charge intervéhiculaire (exploitation équitable des capacités des véhicules). La modélisation requiert de mesurer cette répartition.

**Hypothèse.** Au lieu d'être homogène, la répartition des voyageurs sur le quai est hétérogène et résulte de motivations différentes.

Pour vérifier cette hypothèse et obtenir des données pour le modèle, nous avons procédé à une campagne de recueil de données subjectives via des questionnaires. L'objectif de ces questionnaires est d'obtenir des informations sur le choix du lieu d'attente des usagers, sur la longueur et la largeur du quai.

#### 5.2.1.1.2 Méthode

##### **Participants**

Les participants sont 545 passagers en attente du RER C (264 femmes et 281 hommes avec une moyenne d'âge de 39.13 (Écart-type= 12.9)), à BFM.

##### **Matériels**

Le matériel de l'expérimentation comprend un questionnaire de motivation, à remplir (Figure Annexe 4).

##### **Procédure**

Les enquêteurs sont munis du questionnaire de motivation. L'horaire de passation correspond à l'heure de pointe (densité de personnes plus importante). Pour l'étude de motivations de positionnement sur le quai, il est judicieux de choisir un lieu où on a plus de montants que de descendants. Pour cela nous avons sélectionné le quai EF aux heures de pointe. Le recueil de donnée a été réalisé du Lundi au Jeudi entre 17h à 20h durant la période du 26 Janvier 2016 au 22 Février 2016.

Le positionnement en largeur du quai se rapporte essentiellement à la caractéristique du lieu qui est un quai central. Le quai a été mesuré et divisé en petites parties, appelées zones. Chaque zone est limitée par des colonnes qui sont sensiblement équidistantes. Douze zones sur le quai ont été identifiées, discernables facilement pour l'enquêteur, afin de pouvoir recueillir dans chaque zone des réponses aux questionnaires (Figure 55).

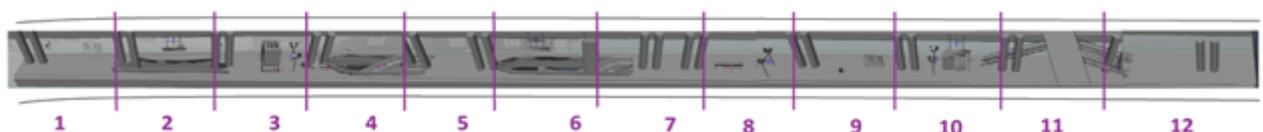


Figure 55. Identification des 12 zones sur le quai EF

L'enquêteur recueille plusieurs informations concernant le voyageur interrogé (genre, âge, type de voyageur, déplacement individuel ou en groupe), son trajet (destination, mission du train, motif du déplacement), ainsi que deux questions clés concernant le positionnement sur le quai.

- Longueur du quai : « *Le quai est long, pourquoi attendez-vous votre train à cet endroit précis ?* »
- La largeur du quai : « *Pourquoi attendez-vous votre train du côté de cette voie ?* »

L'emplacement de la personne interrogée est représenté par une croix sur le plan du quai, il est fourni avec le questionnaire. Pour plus d'information sur le questionnaire, voir l'Annexe (Figure Annexe 4).

### **Recueil et traitement des données**

Les réponses aux questions ouvertes sur le positionnement sur le quai sont recueillies sous forme de verbatim. L'ensemble des réponses a été traité et classé en catégories par deux personnes ; ceci afin de minimiser les biais de l'observateur [LEW 11] et d'offrir une fiabilité inter-évaluateurs [MAR 86]. Cette méthode assure un haut degré de pertinence et de validité des informations collectées.

#### **5.2.1.1.3 Résultats**

Pour les 12 zones, nous avons eu un nombre différent de questionnaires dû à l'hétérogénéité de la répartition sur le quai (min =26, max =53). Sur les 12 zones, nous avons au total 545 participants. Nous identifions parmi ces participants une majorité d'habités des lieux de 90.5% contre 9.5% de non habitués. Compte tenu de l'heure, nous identifions également une majorité d'utilisateurs dont le motif de déplacement est de rentrer à domicile 94.5% pour 5.5% répartis entre travail, rendez-vous et autres. Nous identifions des réponses variées à la question de positionnement sur le quai.

**Positionnement sur la longueur (cf. Figure 56) :** 97.4% des réponses rapportent un choix intentionnel de l'emplacement. On distingue donc 3 groupes des personnes avec des stratégies différentes : *Arrivée* (54%), *Quai* (36.1%) et *Train* (7.5%).

**Arrivée.** Certaines personnes se positionnent par rapport à la position de la sortie de la gare destination.

**Quai.** Les usagers se positionnent selon les contextes liés au quai. Cette catégorie inclut plusieurs sous-catégories : 37.3% se positionnement par rapport aux *entrées*, 27% par rapport à *moins de monde* à cet endroit sur le quai et 35.7% *autres* relatives aux propriétés du quai (i.e. infogares, sièges assis, etc.)

**Train.** Cette catégorie inclut majoritairement le positionnement des personnes par rapport au véhicule le moins rempli et quelques réponses de positionnement à des trains moins long (6V : 6 voitures).

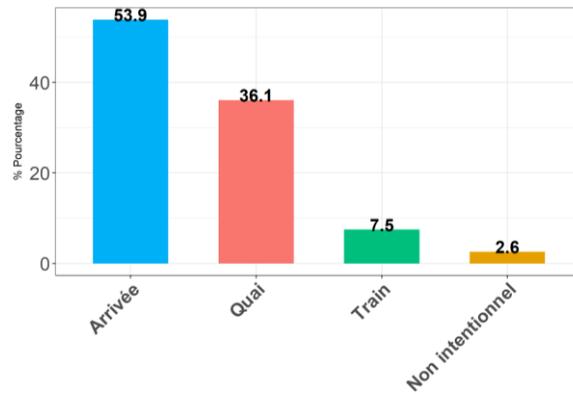


Figure 56. Catégories de réponses sur la distribution longitudinale des passagers

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Kim et al. [KIM 14], rapportant une hiérarchie : minimiser la distance à la sortie (69.7%), minimiser la distance à l'entrée (16.6%) et maximiser son confort durant le trajet (13.5%).

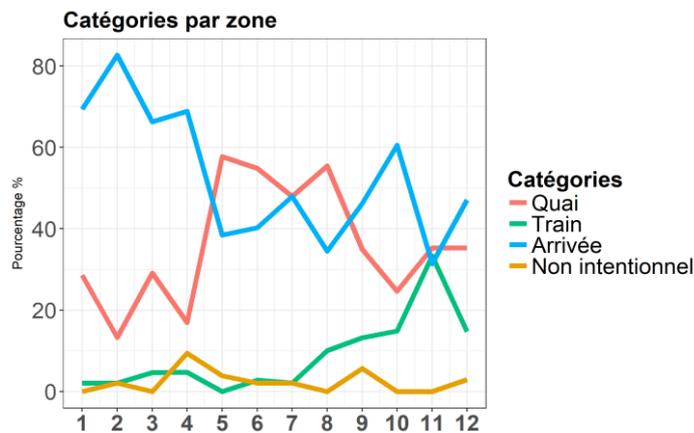


Figure 57. Évolution des catégories de positionnement en longueur par zone

L'évolution des catégories en longueur (cf., Figure 57) montre une corrélation négative entre les catégories « *Quai* » et « *Arrivée* » de  $r = -0.83$ . Ceci pourrait exprimer la répulsion entre l'agglutination créée par la catégorie « *Arrivée* » qui est évitée par une sous-catégorie de la catégorie « *Quai - Moins de monde* ». On note aussi une augmentation de la catégorie « *Train* » vers les zones 9-12.

Le test chi-square d'indépendance est significatif, ( $\chi^2(33) = 118.8, p < 0.001$ ), nous rejetons l'hypothèse nulle selon laquelle il n'existe pas de relation entre les variables comportements de positionnement en longueur et zones.

La Figure 58 représente la répartition des personnes interrogées sur le plan vu de haut, de BFM, et ceci selon leurs catégories de positionnement en longueur.

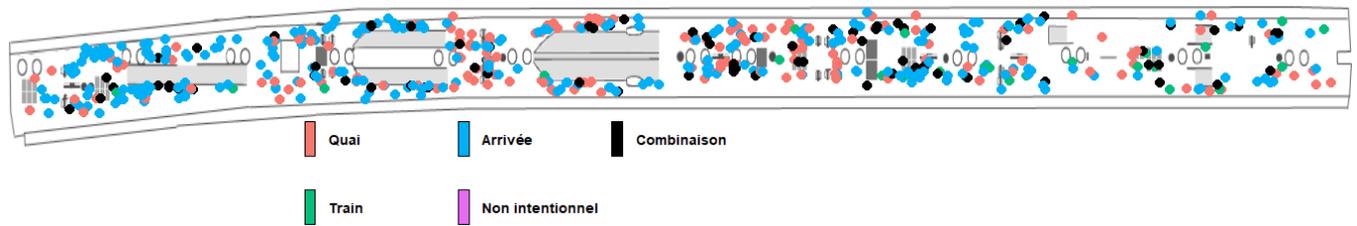


Figure 58. Répartition des catégories en longueur sur le quai de BFM

La Figure 59 représente la répartition des sous-catégories de la catégorie quai, pour rappel, nous retenons deux sous catégories majoritaires représentatives « *Moins de monde* : 35.7% » et à côté des « *Entrées* : 37.3% ».

Clairement, la figure permet d'émettre et de valider des liens de cause à effet des motivations en lien avec l'agencement du quai : par exemple, les points en jaune (sous-catégorie « *Entrées* ») sont rassemblés autour des entrées, sans se mettre pour autant dans les zones de transit, mais d'un point de vue qualitatif, la dispersion semble mineure par rapport aux entrées. D'un autre côté, nous remarquons l'apparition des points en bleu clair, dans des zones de moindre densité.

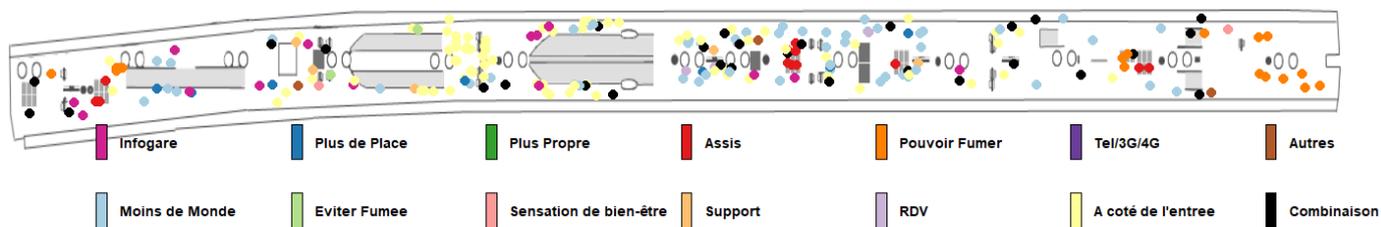


Figure 59. Répartition des sous-catégories « Quai » de BFM

**Positionnement sur la largeur (cf. Figure 60) :** cette étude concerne le positionnement en largeur sur le quai, qui est intimement lié avec une spécificité de cette gare : le changement de voie annoncée à la dernière minute. 94% des réponses rapportent un choix intentionnel de l'emplacement (Figure 60). Globalement, les réponses s'expriment par rapport à la situation sur le côté en question du quai (moins de monde à côté de cette voie, siège à côté), c'est la catégorie « *Quai* ». Les réponses s'expriment aussi par rapport à la voie annoncée sur l'infogare ou les annonces sonores, c'est la catégorie des « *Adaptatifs* », ou par rapport à des stratégies explicitées de prédiction, il s'agit des « *Stratégies* ». On distingue donc 3 groupes des personnes avec des stratégies différentes : *Adaptatifs* (72.5%), *Quai* (14.8%), *Stratège* (7.8%).

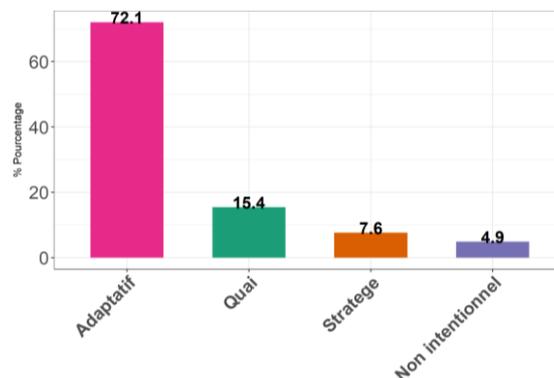


Figure 60. Répartition des catégories en longueur sur le quai de BFM

**Quai.** L'arrivée d'un train sur une voie provoque un effet de vague des personnes qui vont monter vers le train et un décalage des personnes qui attendent un autre train. Une grande portion de cette catégorie est constituée de personnes qui évitent cette agglutination en allant vers l'autre voie.

**Stratégie.** En général, il y a un délai de 2 minutes entre deux trains. Les usagers ont adopté un comportement d'anticipation et ont une réflexion sur la prochaine voie desservie en laissant de côté les informations affichées jugées « non fiables » : « certaines missions sont planifiées sur E et d'autres sur F. Si le train qui est à l'approche est sur la voie E, et que mon prochain train arrive dans deux minutes, cela laisse peu de marge pour la régulation sur une même voie, du coup je m'attends à ce qu'il y ait alternance des voies, sinon je m'attends à ce que la mission passe sur la voie planifiée en me fiant aux régularités que j'ai pu apprendre dans cette gare » (verbatim d'un usager).

Nous investiguons les circulations théoriques ou planifiées, versus réelles, sur les voies. En d'autres termes, il s'agit de comptabiliser le nombre de concordances entre les plannings prévus ou théoriques versus les plannings réels. On rapporte, 77.5% de concordance et 22.5% de non concordance au total. Ces enregistrements ont été extraits sur la période de 17h à 20h sur trois jours, en JOB, en situation normale. Le test de l'analyse de la répartition de la concordance (*oui, non*) par mission (ROMI, MONA, etc.) est faite avec un chi-deux qui se révèle significatif ( $\chi^2(8)=17.14, p<0.05$ ). Ceci veut dire que la répartition de la concordance n'est pas homogène entre les missions, donc que cette non-concordance est dépendante du type de mission. Le test post-hoc ne montre pas une différence entre les missions ( $p>0.05$ ).

**Adaptatifs.** Ce sont des personnes qui se fient à l'affichage des informations même en connaissant les limites.

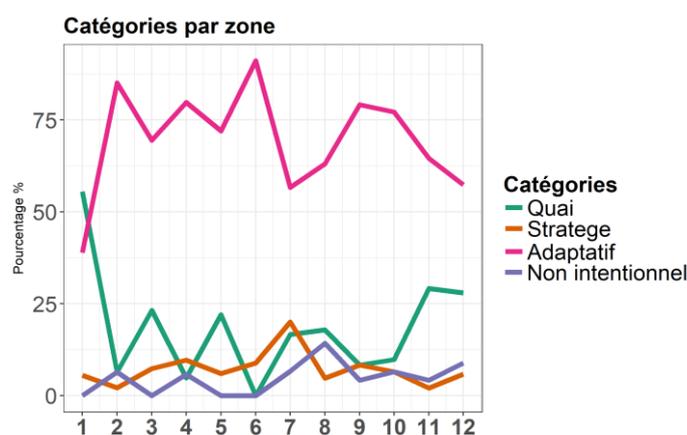


Figure 61. Répartition des catégories en longueur sur le quai de BFM

L'évolution des catégories en largeur (cf. Figure 61) montre une corrélation négative entre les catégories « Quai » et « Adaptatif » de  $r=-0.90$ . Ceci pourrait expliquer la répulsion entre l'agglutination créée par la catégorie « Adaptatif » qui est évitée par une sous-catégorie « Quai ».

Le test chi-square d'indépendance est significatif, ( $\chi^2(33) = 84.7, p < 0.001$ ), nous rejetons l'hypothèse nulle selon laquelle il n'existe pas de relation entre les variables comportements de positionnement en largeur et zones.

La Figure 62 présente la répartition catégories de positionnement en largeur, nous retenons une majorité des « *Adaptatifs* ». En outre, nous relevons d'un point de vue qualitatif un positionnement des personnes très proches de tous supports (escaliers, ascenseurs, panneaux, etc.). Cela peut s'expliquer par des questions de sécurité (ne pas dépasser la bande d'éveil de vigilance) ainsi que pour des questions de confort (exemple : durant l'attente, s'adosser sur un support est plus confortable).

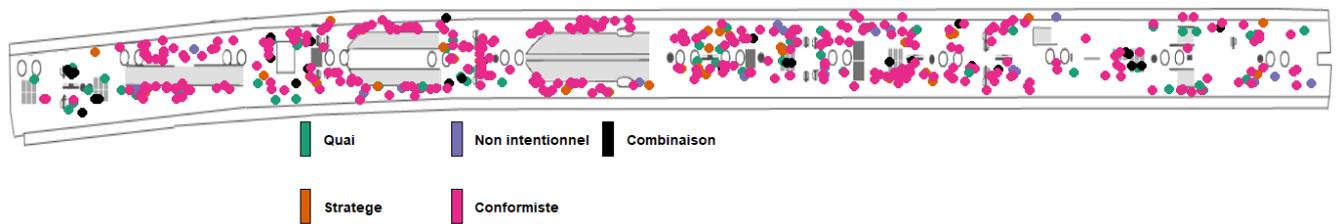


Figure 62. Répartition des catégories en largeur sur le quai de BFM

Il n'existe pas de différence significative entre la répartition des catégories en largeur, et ceci entre la voie E et F ( $\chi^2(3) = 1, p > 0.05$ ), voir Figure 63)

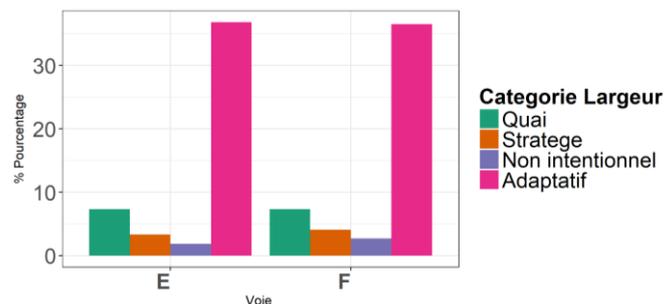


Figure 63. Répartition des catégories en largeur, entre les deux voies E et F

**Interaction entre les catégories de positionnement en longueur et en largeur (cf. Figure 64) :** nous avons étudié l'interaction entre les deux types de catégories « *longueur* » et « *largeur* ». La représentation en AFC « *Analyse Factorielle des Correspondances* » permet d'étudier l'association entre deux variables qualitatives. Elle permet de décrire l'attraction et la répulsion entre modalités. Par exemple, nous remarquons une attraction entre les deux modalités « Quai – longueur » et « Quai - largeur ». Cependant, le test chi-square d'indépendance n'est pas significatif ( $\chi^2(4) = 4.96, p > 0.05$ ). Nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les catégories en longueur et largeur sont indépendantes.

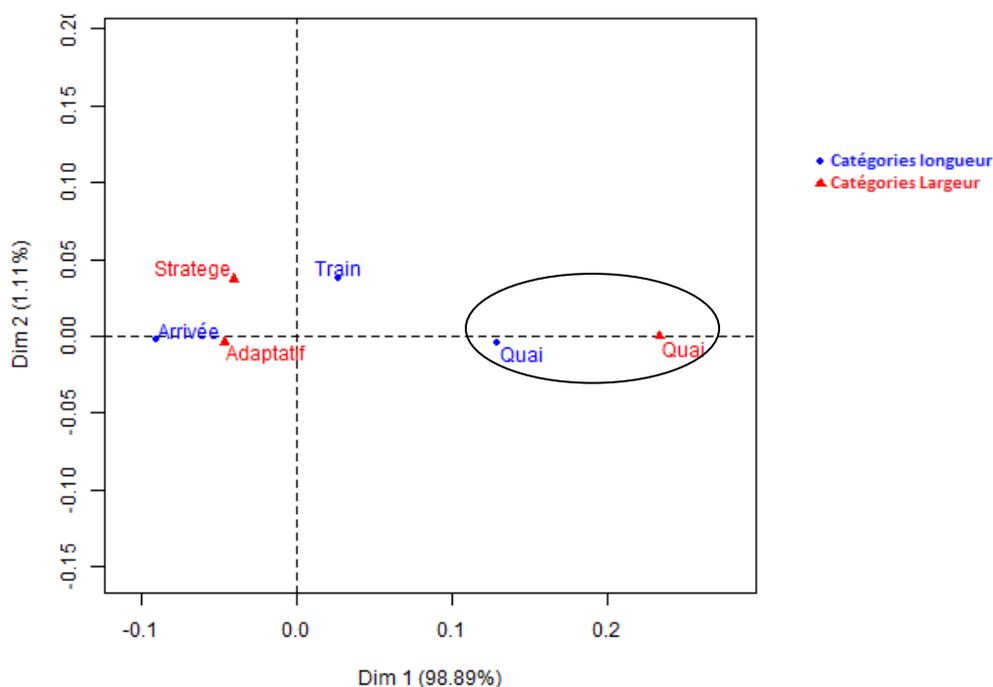


Figure 64. Analyse factorielle des correspondances entre les catégories « longueur » et « largeur »

#### 5.2.1.1.4 Discussion

Les choix de positionnement sur la longueur et largeur de quai sont gérés par des motivations propres au contexte. Ces motivations visent un gain (temps, effort, confort) et se basent sur diverses stratégies. Pour ce qui est du positionnement en longueur, la catégorie « *Quai* », qui est une catégorie diversifiée (plusieurs sous-catégories), assure majoritairement du confort à une personne donnée (i.e. à côté des entrées : minimiser la marche à l'entrée, moins de monde : minimiser le contact avec la foule). Il est possible aussi de rester à côté des entrées car la personne ne dispose pas encore d'information à propos d'éventuel autre gain. La sous-catégorie « *Entrée* » pourrait être investiguée avec plus de détail quant au type de voyageur (*habitué* versus *non habitué*) (voir page 138). La sous-catégorie « *Moins de monde* » peut être aussi du type stratégie régulatrice ou anticipatrice. En effet, la personne peut avoir une connaissance au préalable de l'état d'occupation habituel du quai ou bien la personne n'a pas cette connaissance. Dans le premier cas, il s'agit d'une stratégie anticipatrice et dans le second cas d'une stratégie régulatrice, se faisant de proche en proche par rapport au lieu d'entrée sur le quai. Pour ce qui est du type « *Train* », cette stratégie résulte d'une projection future d'anticipation vis-à-vis de la qualité du voyage et du confort attendu. Par la suite, le type « *Arrivée* » traduit une anticipation quant à un éventuel gain de temps, à l'arrivée, et qui est possible d'être accompli, en avance, sur le quai de la gare origine.

Dans les trains de type NAT (*Nouvelle Automotrice Transilien ou Z50000*, Figure 65) où les voitures d'une rame sont communicantes entre elles, il a été observé les mêmes comportements. Les voyageurs se pré-positionnent dans le train par rapport à la position de la sortie de la gare de destination. L'architecture du train rend l'exercice de cette stratégie possible. Les voyageurs saisissent donc cette opportunité de gain de temps, s'ils n'ont pas pu le faire sur le quai, ou bien si la circulation actuelle est plus simple dans le train.



Figure 65. Intérieur d'une NAT, les véhicules d'une rame sont communiquant

En ce qui concerne le positionnement en largeur, nous relevons la stratégie « *Quai* » des personnes qui se positionnent par rapport à la voie la moins occupée, les infogares et les sièges occupés. Cette stratégie relève aussi bien du confort que de l'information. Pour les « *Stratèges* » les usagers ont adopté un comportement d'anticipation et ont une réflexion sur la prochaine voie desservie en laissant de côté les informations affichées jugées « non fiables ». Il apparaît clairement un processus d'apprentissage des caractéristiques du lieu, ceci s'exprime par une stratégie explicite de prédiction [SEL 79]. Pour ce qui est des « *Adaptatifs* », ce sont des personnes qui se fient à l'affichage des informations même en connaissant les limites. En comparant avec les « *Stratèges* », il semblerait que ces personnes ne perçoivent pas les gains comme ayant le même poids face à l'effort fourni pour la stratégie, ou peut-être parce qu'ils n'arrivent pas à établir la règle pour cette situation. En général, les situations comme celles-ci peuvent laisser entendre un manque de contrôle vis-à-vis de la situation. Cet état peut être vu comme de la « *résignation apprise* » [MAI 76] qui définit un état dans lequel l'organisme a appris que les résultats sont incontrôlables par ses réponses. C'est un état qui induit chez la personne une passivité face aux événements aversifs qui peuvent arriver.

Concernant l'interaction entre des catégories de positionnement en « *longueur* » et « *largeur* », le chi-deux de l'AFC ne rapporte pas d'effet significatif et donc l'absence d'interaction entre ces deux catégories.

### 5.2.1.2 Expérimentation I.2: comptages aux entrées en gare

Nous procédons à des recueils objectifs de données en vue de vérifier les relations causales rapportées et de valider les motivations de positionnement en longueur.

#### 5.2.1.2.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Les personnes de la catégorie « *Quai – Entrées* » rapportent qu'ils se positionnent juste à côté de l'entrée empruntée. Afin de pouvoir valider cette catégorie, nous devons disposer de quantité ou proportion de personnes par entrée sur le total des entrées sur le quai.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que les catégories « *Quai – Entrées* » se positionnent à côté des entrées. Nous prévoyons une corrélation positive entre nos données de comptage aux entrées et notre catégorie « *Quai – Entrées* ».

#### 5.2.1.2.2 Méthode

##### **Participants**

Toutes les personnes (total : 1755 personnes) qui empruntent les entrées vers les quais E et F, et ceci pendant 15 minutes

##### **Matériel**

Les quatre enquêteurs sont munis d'un compteur manuel via une application Smartphone (Application *Counter* disponible sur *Playstore*) pour comptabiliser le nombre de personnes

##### **Procédure**

Nous nous intéressons à la situation à l'heure de pointe. Le recueil de donnée a été réalisé en deux temps : la soirée du 7 Mars 2016 de 17h15 à 17h30 et la soirée du 23 Mai 2016, de 17h15 à 18h30. Les chiffres ont été rapportés aux pourcentages de validation au *CAB*<sup>17</sup> des jours concernés, dans le but de rester sur une même échelle. De même, nous avons estimé, le pourcentage des personnes qui valident et qui se dirigent vers le quai AB et EF dont le quai EF qui est notre champ d'étude. Nous avons vérifié l'absence d'anomalie et nous nous sommes assuré que le trafic est régulier ce jour-là, à savoir : le fichier de circulation de train, les chiffres de validation au *CAB* et les retours des responsables sur la circulation sur la situation de ce jour-là. Plusieurs personnes sont positionnées au niveau des entrées sur le quai. Pour chaque entrée, est comptabilisé le nombre d'entrants pendant une durée précise. A chaque zone est associé un nombre d'entrants. Nous obtenons par entrée, le pourcentage d'entrants sur le total des entrées sur le quai pendant cette durée.

##### **Recueil et traitement de données**

Nous confrontons les résultats de comptages réels avec la répartition des motivations « *Entrée* »

#### 5.2.1.2.3 Résultats

Les données du comptage par entrée – zones se trouvent corrélés positivement à la sous-catégorie « *Entrée* » dans ces zones,  $r=0.93$  (Figure 66).

---

<sup>17</sup> CAB : Contrôle Automatique de Billet

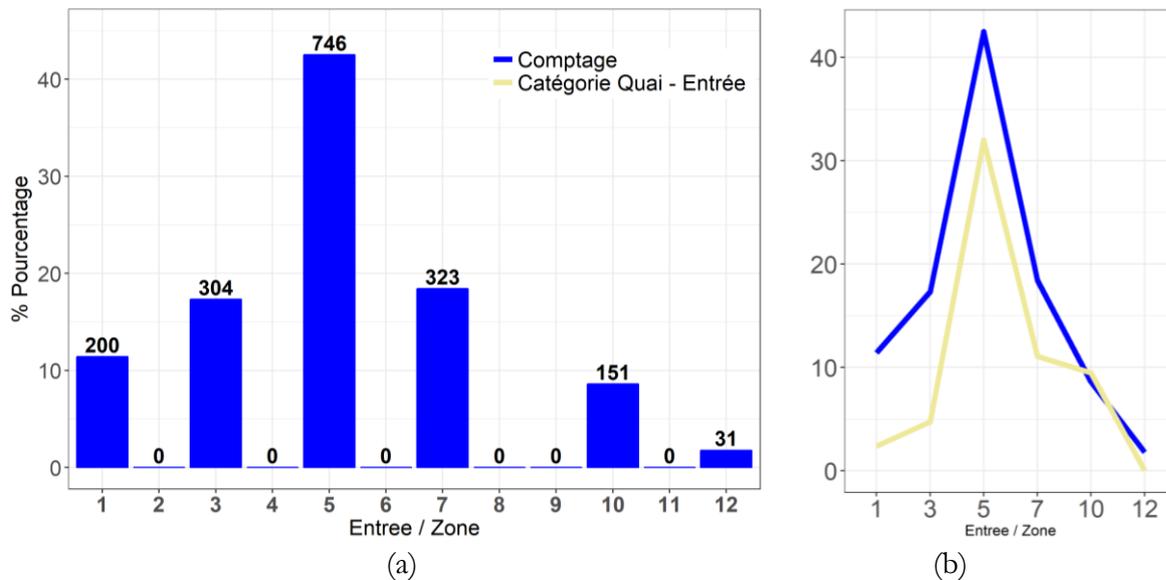


Figure 66. (a) Comptage par entrée (b) corrélation entre les pourcentages de comptage par entrée et l'occurrence de la catégorie « Entrée »

#### 5.2.1.2.4 Discussion

Ces résultats signifient que ces personnes restent positionnées à côté des accès aux quais. Tout comme ils l'expriment, ces personnes se positionnent sur le quai, sans s'éloigner de leur zone d'entrée sur le quai. C'est une stratégie qui pourrait avoir pour but la minimisation de l'effort. Ou, cela peut être un comportement en lien avec le manque de connaissances sur le lieu (i.e. la personne ne connaît pas le quai donc elle n'instaure pas d'autres comportements).

#### 5.2.1.3 Expérimentation I.3 : comptage sur le quai

##### 5.2.1.3.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Les personnes de la sous-catégorie « *Quai – Moins de monde* » rapportent qu'elles se positionnent par rapport aux zones les moins denses. Afin de pouvoir valider cette catégorie, nous devons disposer de quantité ou proportion de personnes par zone du quai.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que les personnes de catégorie « *Quai – Moins de monde* » se positionnent par rapport aux zones les moins denses sur le quai.

##### 5.2.1.3.2 Méthode

###### Participants

La population cible est toute personne en attente du train, sur le quai EF. Il s'agit donc, de montants ayant choisi leur emplacement sur le quai (la personne n'est pas en train de marcher). Le nombre total recueilli est de 600 personnes sur le quai.

###### Matériel

Chaque enquêteur est équipé de lunettes enregistreuses vidéo (cf. Figure 67) pour filmer la situation sur le quai.



Figure 67. Lunettes enregistrées vidéo

### Procédure

Le recueil de données a été réalisé le 26 Septembre 2016 entre 17h30 et 18h30. Deux personnes, chacune du côté d'une des deux voies, se déplacent lentement d'une zone à une autre et d'une manière synchrone, en filmant les usagers en attente du prochain train.

### Recueil et traitement de données

Des opérations de comptage de personnes par zone et par voie sont faites lors du visionnage des enregistrements vidéo. Nous confrontons les résultats de comptage instrumenté avec la répartition des personnes sur le quai.

#### 5.2.1.3.3 Résultats

La distribution des comptages de personnes obtenue entre les voies E et F, est assez homogène et symétrique par rapport aux zones par voie. Le coefficient de corrélation est positif et élevé  $r=0.85$ , le test chi-deux de l'indépendance des quantités par rapport aux voies et zones est non significatif ( $\chi^2(11)= 13.14, p>0.05$ ). Par conséquent, nous rejetons l'hypothèse nulle selon laquelle il y a dépendance entre la voie et la zone.

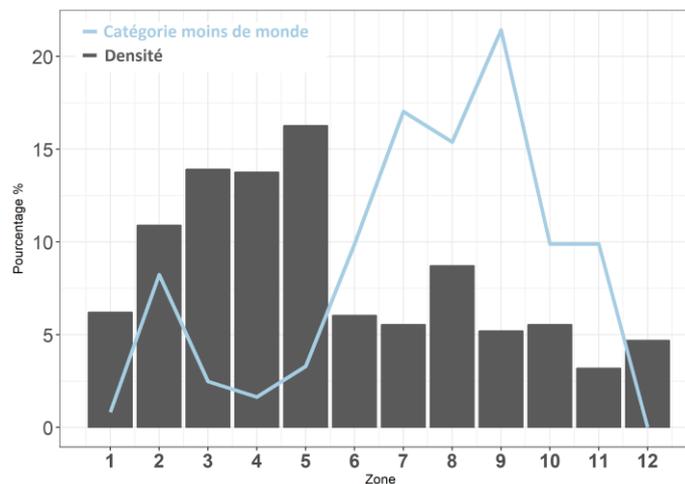


Figure 68. Densité de personnes versus distribution de la sous-catégorie «*Quai- Moins de monde*», par zone.

#### 5.2.1.3.4 Discussion

Les données du comptage par zone sont en effet corrélés négativement à la sous-catégorie «*Quai - Moins de monde* » de  $r=-0.43$  ce qui signifie que ces personnes se positionnent là où la densité diminue (Figure 68).

## 5.2.1.4 Expérimentation I.4 : comptage de la densité de personnes dans le train

### 5.2.1.4.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Les personnes de la catégorie « *Train* » rapportent qu'elles se positionnent sur le quai par rapport à la voiture qui va leur permettre d'avoir plus de chance d'obtenir un siège assis.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que les personnes de catégorie « *Train* » se positionnent par rapport aux véhicules les moins denses, lors de leur attente sur le quai.

### 5.2.1.4.2 Méthode

#### **Participants**

A son arrivée, le train a une charge hétérogène d'un véhicule à un autre. La population cible est les personnes à bord du train, à son arrivée en gare. Le nombre total recueilli est de 451 personnes, à bord du train.

#### **Matériel**

Aucun.

#### **Procédure**

Nous exploitons des données existantes de rames compteuses pour connaître ces quantités. Les rames compteuses sont des rames équipées de capteurs au niveau des portes qui permettent de compter le nombre de montants et descendants et de déduire l'occupation avant et après l'échange en effectuant des additions des montants et des soustractions des descendants de l'origine du parcours jusqu'à la gare cible de l'étude.

Compte tenu que toutes les rames ne sont pas forcément équipées de capteurs, le but est de trouver des détails sur la circulation de train long, c'est-à-dire de deux rames (8V), circulant ensemble en même temps, à *BFM* et aux heures de pointes (entre 17h et 20h). Ce travail va nous permettre de déduire la charge entière d'un train long. Pour cela nous avons repris les enregistrements des rames compteuses de la date du 20 Mars 2017 entre 17h et 20h qui contiennent les informations recherchées.

#### **Recueil et traitement de données**

Les données obtenues des rames compteuses sont des fichiers *XML* de circulations sur une journée de chaque rame. Ces données ne sont pas directement exploitables. En effet, un train peut effectuer plusieurs parcours dans les deux sens en une journée. Nous avons repris les données à l'origine (*Pontoise*) pour remettre l'occupation à zéro et remédier partiellement à l'accumulation des taux d'erreurs sur plusieurs trajets d'une journée. Les calculs sont effectués via une application développée par SpirOps (voir Figure Annexe 19).

Nous disposons de la répartition de la catégorie « *Train* » selon l'identification de 12 zones relatives aux caractéristiques du quai. Seulement, l'agencement du train est sur 8 véhicules et nous disposons de densité selon un conteneur qui est une densité par véhicule. La comparaison de ces données est donc assez difficile car il ne s'agit pas du même échantillonnage spatial. Nous

rééchantillonons de nouvelles zones sur le quai correspondant à une moitié de véhicule qui est la zone la plus susceptible de desservir la porte appartenant à cette moitié, et nous comptons les catégories correspondantes à ces nouvelles zones. Ainsi, pour 16 portes, nous obtenons 16 zones. Nous émettons l'hypothèse que lors de l'arrivée du train, c'est le principe du moindre effort qui est appliqué : « je me dirige vers la porte la plus proche » (cf, Figure 69).



Figure 69. Ré-échantillonnage en 16 zones du quai de BFM.

#### 5.2.1.4.3 Résultats

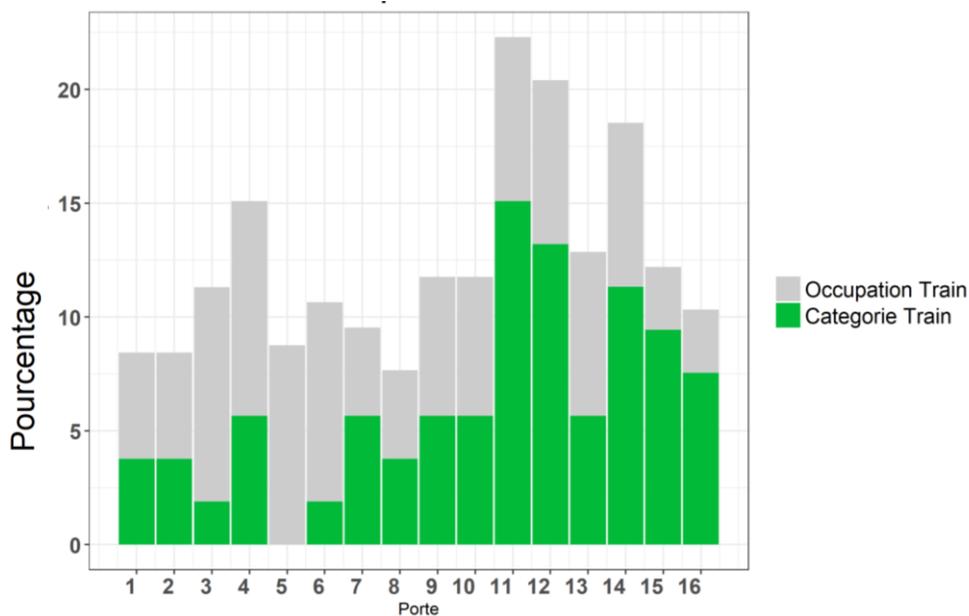


Figure 70. Densité dans le train versus catégorie « Train »

Nous comparons les chiffres occupation du train versus catégorie « Train » (Figure 70). La corrélation négative est assez faible  $r=-0.16$ .

#### 5.2.1.4.4 Discussion

Nous ne pouvons valider l'hypothèse selon laquelle les voyageurs se positionnent par rapport à une connaissance au préalable de l'état d'occupation des véhicules.

#### 5.2.1.5 Expérimentation I.5 : comptage montants, descendants train, comptage quai

##### 5.2.1.5.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Les personnes de la catégorie « Train » indiquent qu'elles se positionnent sur le quai par rapport à la voiture qui vont leur permettre d'avoir le plus de chance d'obtenir un siège assis. Nous n'avons pas obtenu d'effet significatif. Nous décidons d'investiguer d'autres variables comme : nombre montants, descendants, densité sur le quai.

A son arrivée, le train a une charge hétérogène d'un véhicule à un autre et par conséquent un nombre de descendants différents. De même, vue l'hétérogénéité de la répartition sur le quai, le nombre de montants est différent d'un véhicule à un autre, voire d'une porte à une autre. Les populations cibles se composent donc, des personnes à bord du train, à son arrivée en gare, du nombre de montants et de descendants, et de la densité sur le quai.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que le nombre de personnes montants et descendants, et l'occupation sur le quai ont une influence sur le choix de type « *Train* ».

#### **5.2.1.5.2 Méthode**

##### **Participants**

Le nombre total recueilli, des montants, est de 231 personnes, du quai vers le train. Le nombre total recueilli, des descendants, est de 45 personnes, du train vers le quai.

##### **Matériel**

Aucun.

##### **Procédure**

Nous ré-exploitions des données existantes de rames compteuses pour connaître les effectifs des personnes.

##### **Recueil et traitement de données**

Nous avons déjà la charge du train avant l'échange, nous nous intéressons au nombre de montants et descendants.

Quant à la densité sur le quai, nous ré-échantillons de nouvelles zones sur le quai qui sont plus susceptibles de desservir une porte, identiquement à la procédure relative à la catégorie « *Train* » (Figure 69).

Nous avons réuni les données requises pour cette analyse. Ces relations sont validées par un modèle linéaire généralisé (GLM : *Generalized Linear Model*) pour les données binaires [MCC 89]. Plus précisément, il nous permet de vérifier si une variable explicative ou indépendante améliore l'adaptation du modèle par rapport à un modèle nul, sans aucune variable indépendante. A partir de ce tableau, un prédicteur ayant une faible p-value constitue probablement un ajout significatif à notre modèle.

Dans ce cas, la variable dépendante est la catégorie « *Train* » et les variables explicatives ou indépendantes sont nombre montants, descendants, densité train et densité quai.

#### **5.2.1.5.3 Résultats**

Dans la Figure 71, est représenté le lien entre la catégorie « *Train* », et le nombre montants, descendants, densité train et densité quai.

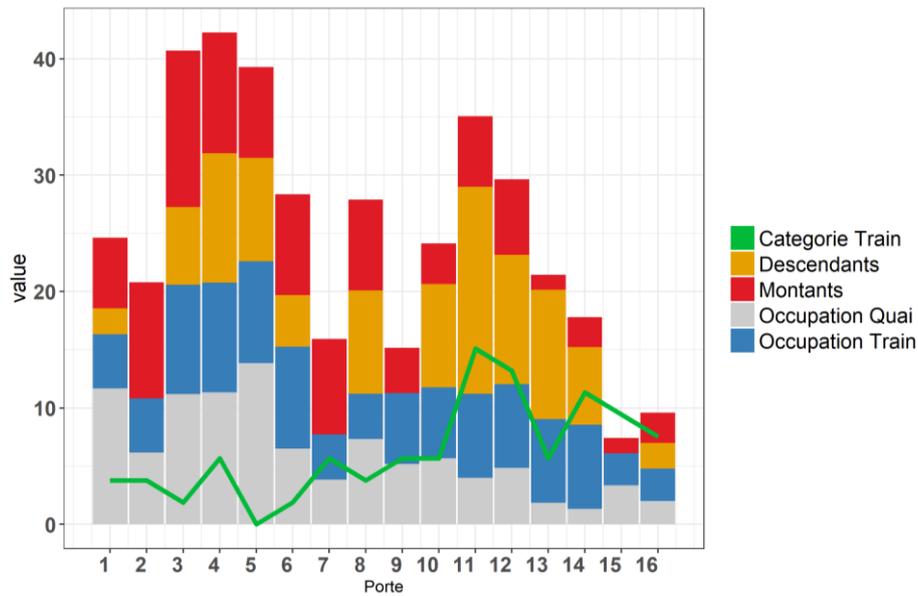


Figure 71. Lien entre la catégorie « Train » et le nombre montants, descendants, densité train et densité quai.

Nous relevons pour ce modèle des effets significatifs du nombre de montants ( $\chi^2(1)=13.46$ ,  $p<0.001$ ), de nombre de descendants ( $\chi^2(1)=6.76$ ,  $p<0.01$ ) ainsi que de l'occupation quai ( $\chi^2(1)=6.6$ ,  $p<0.01$ ). En revanche, le GLM rapporte un effet non significatif de l'occupation train ( $\chi^2(1)=1.3$ ,  $p=0.2$ ).

#### 5.2.1.5.4 Discussion

Ceci pousse à croire que les liens de cause à effet établis « je me positionne à ce niveau car c'est le véhicule le moins occupé et qui va me permettre d'avoir une place assise » est en lien avec la perception de la densité actuelle sur le quai par zone, et par conséquent avec le nombre de montants. L'effet des descendants implique une libération de places assises, cette quantité, ne pouvant pas être définie à l'avance lors du pré-positionnement dans le train. L'explication de l'implication de cette variable est complexe. Il se pourrait (i) que les descentes soient homogènes d'un train à un autre et que les passagers, par habitude, en ont appris les régularités ; (ii) durant le temps d'échange, le passager perçoit les descentes, et durant le temps dont il dispose (moyenne de 70s) il peut se décaler vers une autre porte avoisinante.

#### 5.2.1.6 Expérimentation I.6: Mesure des positions des sorties à l'arrivée

##### 5.2.1.6.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Les personnes de la catégorie « Arrivée » rapportent qu'ils se positionnent sur le quai par rapport à la position de la sortie de la gare destination. Nous ne disposons pas de connaissances qui pourraient valider cette catégorie.

**Hypothèse.** Les personnes de cette catégorie ont pour objectif de se positionner au plus proche de la sortie sur le quai à leur destination.

### 5.2.1.6.2 Méthode

#### Participants

Ces recueils concernent 286 participants de motivation « *Arrivée* ».

#### Matériel

Un télémètre laser.

#### Procédure

Nous effectuons des mesures des positions des sorties des 10 destinations les plus empruntées (représentant 62.6% du total des questionnaires). Les sites de recueil sont donc les dix destinations les plus empruntées de BFM (Figure Annexe 5).

Pour chacune de ces dix destinations, on mesure la position des sorties, leurs types (escalier, escalator, ascenseur) ainsi que des pancartes *TT* précisant la position de la Tête de Train pour chaque station. Les mesures sont faites grâce à un télémètre laser sur le terrain. Par la suite, nous avons représenté ces mesures (pancartes-sortie) sur le quai de BFM par rapport à sa propre pancarte *TT*. Ainsi, nous obtenons les positions des sorties des gares les plus empruntées sur le quai de la gare étudiée.

#### Recueil et traitement de données

Le but est de comparer à nos distributions de la catégorie « *Arrivée* » pour les 10 destinations, une par une et par zone.

### 5.2.1.6.3 Résultats

Les analyses qualitatives montrent, en effet, une agglutination des catégories « *Arrivée* » au niveau de la zone correspondante à la sortie destination ainsi qu'au niveau des zones avoisinantes (voir Figure Annexe 6 et Figure Annexe 7). Nous rapportons une représentativité importante du top dix des destinations les plus empruntées. En effet, la motivation « *arrivée* » des top dix des destinations représente 60% du total des catégories « *arrivée* » de toutes les destinations. La corrélation entre la distribution des catégories « *arrivée* » du top dix versus de toutes les destinations présente une très forte corrélation  $r = 0.97$  (cf. Figure 72).

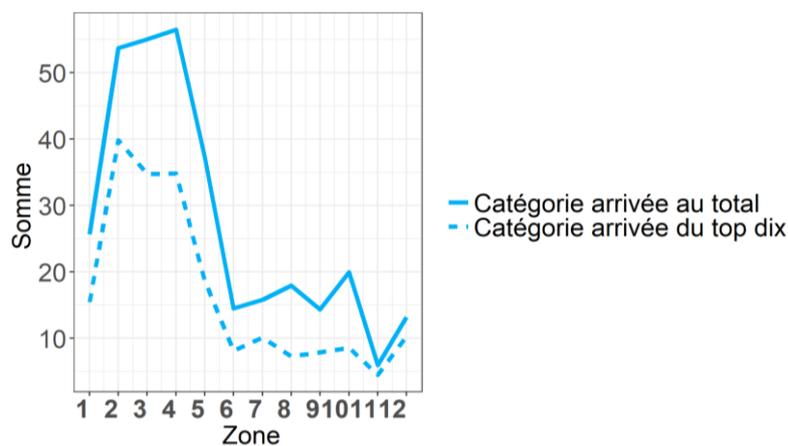


Figure 72. Représentativité des dix destinations des catégories « *arrivée* » par rapport au total des catégories « *arrivées* »

#### 5.2.1.6.4 Discussion

La motivation « *arrivée* » est validée par rapport aux motivations des dix premières destinations et aux emplacements des sorties. Nous notons un cas unique intéressant pour la station « *Juvisy* ». Malgré la présence de plusieurs sorties dans la gare, nous notons l'absence de plusieurs distributions autour de ces zones et un comportement qu'on peut plus qualifier de préférence de sortie. Il paraît que certaines sorties sont plus préférées que d'autres, cela relève de plusieurs facteurs comme la sortie qui rapproche le plus de la zone cible à atteindre après la gare. Les observations dans cette gare nous ont amenées aussi à une autre conclusion : certaines sorties (escaliers ou escalateurs) sont éloignées mais se regroupent dans le niveau souterrain, vers le même point. D'où l'inutilité d'aller vers la sortie la plus éloignée, car cette dernière ramènera au même niveau que les autres.

#### 5.2.1.7 Analyses statistiques étendues : phase quai

Par les diverses expérimentations faites pour la compréhension du positionnement par rapport au quai, nous disposons de données de 545 voyageurs correspondant aux variables individuelles et contextuelles pour expliquer l'occurrence des stratégies de positionnement.

##### 5.2.1.7.1 Stratégies de positionnement en longueur

###### Variables individuelles et propre au parcours

Nous avons codé les données des voyageurs comme suit : Genre (Homme=0, Femme=1), Type (Non habitué = 0, Habitué = 1), Motif (Maison =1, Autre=0), Volume (Groupe=0, Seul=1).

Pour chaque catégorie et sous-catégorie de positionnement sur le quai, nous calculons pour les voyageurs concernés la moyenne d'âge et le temps de trajet (avec l'écart-type), la proportion des participants par genre *femme* versus *homme*, par type *habitués* versus *non habitués*, voyageant *seul* ou en *groupe*, et par motif à la *maison* versus *autre*. Nous mentionnons le nombre *N* des passagers afin d'analyser les liens de ces motivations avec les propriétés des passagers (voir Tableau 2).

Tableau 2. Relations possibles entre les variables, les catégories en longueur et la description de données correspondantes

Variables \ Catégories	Quai	Sous catégories quai		Train	Arrivée
		Entrées	Moins dense		
	38.2	37.7	40.5	43.1	39.5
<b>Age</b>	( <i>sd:13.3</i> )	( <i>sd:13</i> )	( <i>sd:11.3</i> )	( <i>sd:11.3</i> )	( <i>sd:12.6</i> )
<b>Genre: Femme</b>	0.47	0.53	0.45	0.5	0.5
<b>Type : Habitué</b>	0.86	0.80	0.90	0.94	0.94
<b>Motif : Maison</b>	0.93	0.94	0.93	0.95	0.98
<b>Volume : Seul</b>	0.95	1.00	0.98	1.00	1.00
<b>Temps de trajet (Minutes)</b>	22.2	17.8	21.4	24.5	22.04
	( <i>sd:12.5</i> )	( <i>sd:11.1</i> )	( <i>sd:12.4</i> )	( <i>sd:10.4</i> )	( <i>sd:13.2</i> )
<b>Fréquence de desserte</b>	23.5	25.26	23.5	19.8	20.31
	( <i>sd:12.71</i> )	( <i>sd:12.8</i> )	( <i>sd:12.5</i> )	( <i>sd:10.8</i> )	( <i>sd:11.37</i> )
<b>N</b>	191	71	70	40	286

A priori, il y a une relation entre l'augmentation de l'âge et le choix de la catégorie « *Train* », la catégorie « *Quai* » est moins choisie par les *habitués* et ceux qui rentrent à la maison.

Nous explorons ces liens [ELL 18] avec un Modèle Linéaire Généralisé (GLM : *Generalized Linear Model*) et le LRT (*Likelihood Ratio Test*) [AGR 07] pour les données binaires [MCC 89].

**Stratégie « Intentionnelle » versus « Non intentionnelle ».** La majorité des réponses se rapporte à un choix intentionnel de positionnement, qui peut être expliqué par le contexte spécifique de cette étude : comme indiqué, le recueil a été effectué en fin de journée. Une bonne majorité de ces voyageurs sont des habitués, qui rentrent à la maison. Tout comme se rendre au travail, rentrer à la maison semble aussi générer diverses stratégies afin de réduire les inconvénients (effort) et augmenter les gains (temps et confort).

**Stratégie « Quai ».** Les voyageurs qui choisissent cette stratégie sont moins susceptibles d'être habitués ( $\chi^2(1)=9.26, p<0.01$ ), plus susceptibles d'être en *groupe* ( $\chi^2(1)=11.8, p<0.001$ ) et d'avoir une destination ayant une *fréquence* de desserte plus élevée que d'autres ( $\chi^2(1)=6.9, p<0.001$ ) ; ceci en comparaison avec les autres catégories de positionnement. La distribution du type du voyageur (*habitué* versus *non habitué*) et celle du volume du déplacement (*seul* ou *en groupe*) sont représentés par la Figure 73.

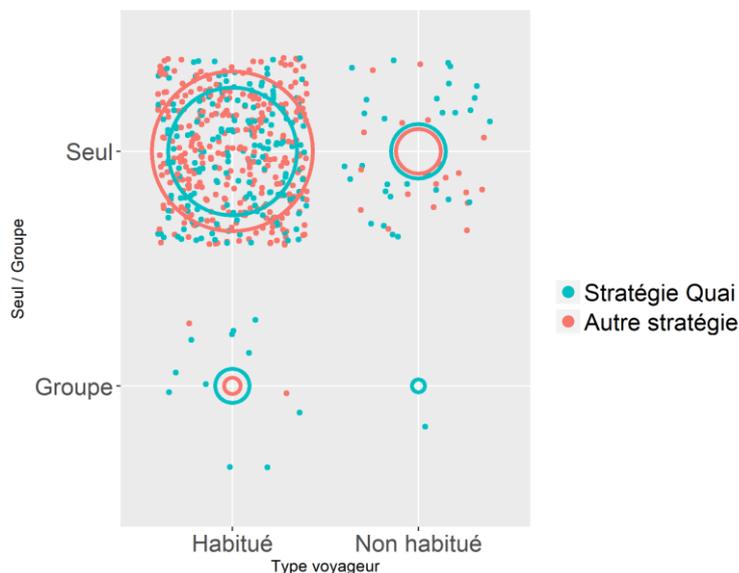


Figure 73. Le regroupement des passagers en fonction des habitués et des déplacements *individuels*, avec une légère prédominance de la stratégie « *Quai* » dans tous les regroupements non habitués et habitués / groupes.

Il subsiste une légère prédominance de la catégorie « *Quai* » pour les *non habitués*, et la combinaison *habitués/en groupe*. Ces résultats peuvent être attribués au fait que quand un voyageur n'est pas un *habitué* des lieux, il ne dispose pas de connaissances supplémentaires lui permettant de développer d'autres stratégie que celle de positionnement sur le quai. Du moins, il s'agit d'une stratégie plus régulatrice (réguler la position par rapport à l'entrée, de proche en proche) que planifiée (choisir à l'avance un emplacement spécifique sur le quai). De plus, le fait d'être accompagné par d'autres personnes peut diminuer l'attention du voyageur en fonction du

possible avantage de telle ou telle position sur le quai, car ce dernier est engagé dans une interaction sociale.

**Stratégie « Quai - Entrée ».** Les voyageurs avec la stratégie « *Entrée* » ont plus tendance à être des *non habitués* ( $\chi^2(1)=8.55, p<0.01$ ) et ils ont des temps de trajet plus courts ( $\chi^2(1)=1.4, p<0.01$ ) en comparaison avec les autres stratégies (cf. Figure 74). Ceci peut être expliqué par le fait que les non habitués n'ont pas encore établi de tactiques concernant ce qu'ils peuvent gagner (autre que la distance par rapport à l'entrée). De plus, des temps de trajet réduits peuvent décourager les voyageurs à faire un effort pour établir une stratégie, étant donné que leur temps de trajets n'est pas important.

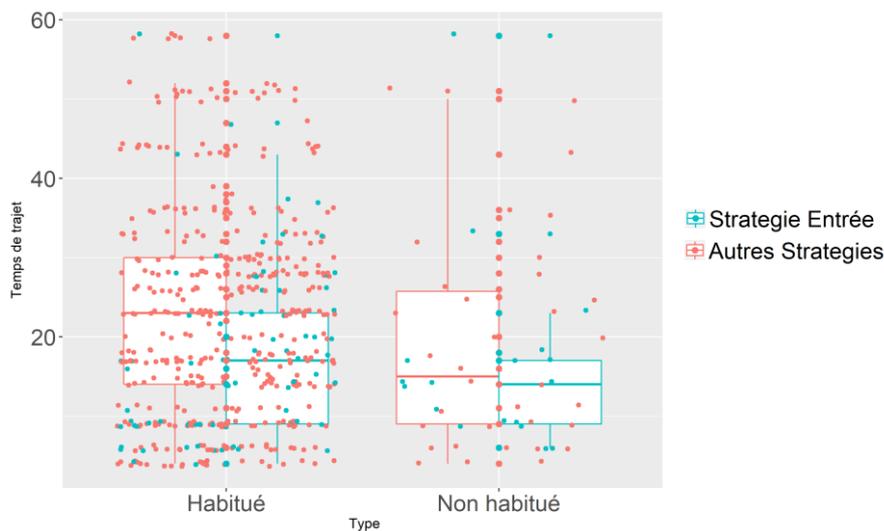


Figure 74. Pour les habitués et non habitués, les voyageurs avec stratégie « Entrée » ont des temps de trajet plus réduits.

**Stratégie « Quai - Moins de monde ».** Les analyses statistiques ne montrent que des liens marginalement significatifs pour « *Volume* » avec  $p=0.05$  et « *Fréquence* » ( $p=0.06$ ).

Pas d'autres liens avec les paramètres individuel et propre au trajet ( $p>0.05$ ).

**Stratégie « Train ».** Les voyageurs qui choisissent cette stratégie sont plus âgés, et ceci en comparaison avec les autres catégories : l'âge peut augmenter la motivation de rechercher plus de confort. La moyenne d'âge est plus élevée pour les personnes de stratégies « *Train* » (Moyenne = 43.13, Écart-type = 11.34) que les autres stratégies (Moyenne = 38.7, Écart-type=13) (cf. Figure 75). Nous mettons aussi en lien le temps de trajet correspondant à chaque voyageur. Les analyses ne montrent pas d'effet significatif de la durée du trajet ( $\chi^2(1)=2.11, p>0.05$ ). Il n'existe pas non plus d'effet de la connaissance des lieux (*habitué* versus *non habitué*) sur le renforcement de cette stratégie ( $\chi^2(1)=0.84, p>0.05$ ). Car la connaissance de l'état d'occupation des voitures est une connaissance au préalable.

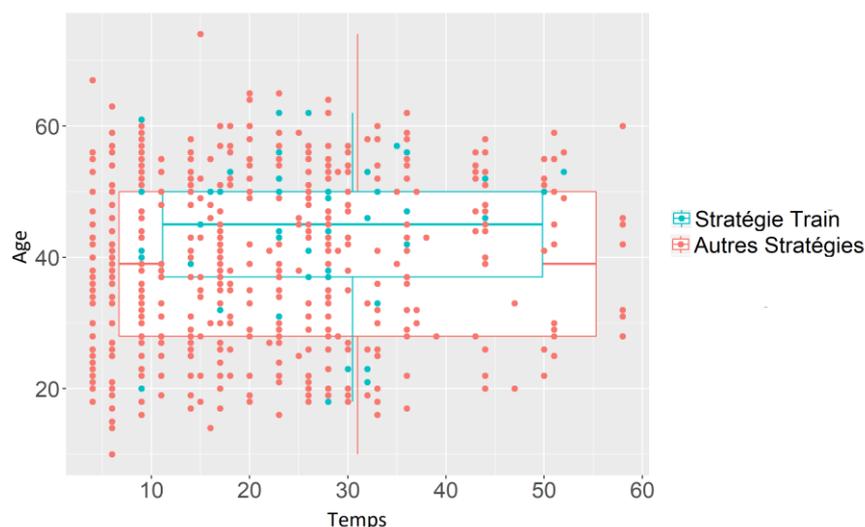


Figure 75. Pour les voyageurs avec une stratégie « Train » une moyenne d'âge augmentée et un écart-type plus réduit que pour les autres stratégies. Nous relevons aussi une légère réduction de cette stratégie en fonction du temps de trajet (axe x)

On peut penser que la motivation de trouver un siège inoccupé augmente continuellement avec la durée du temps de trajet. Ce n'est pas le cas. La motivation augmente jusqu'à un seuil (20mn à 40mn) puis diminue. Nous avons ensuite développé une analyse basée sur la discrétisation temporelle.

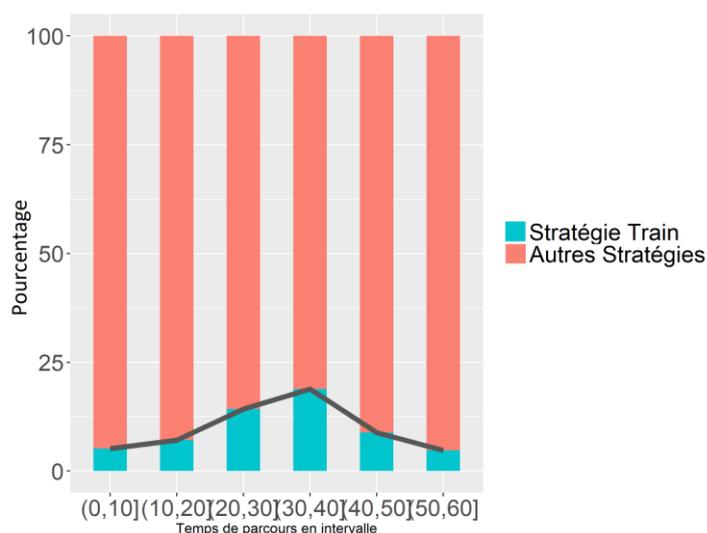


Figure 76. Les stratégies pour chaque intervalle de minutes.

Il existe un effet significatif pour l'intervalle temps ( $\chi^2(1)=12.3, p<0.05$ ), Figure 76. On souligne, que certains intervalles créent le besoin d'instaurer la stratégie « Train ». Ceci peut être expliqué comme suit : les échanges qualitatifs entre les enquêteurs et les voyageurs révèlent des attentes des voyageurs concernant la libération de place assise à l'arrivée du train dans certaines stations (i.e. *Savigny sur Orge*, temps de trajet = 17 mn, destination du top dix des destinations les plus empruntées). Ceci ne peut être investigué davantage en raison du nombre limité de ce type de réponse, mais peut nous informer d'un certain niveau d'acceptation de la situation debout.

**Stratégie « Arrivée ».** Les voyageurs de stratégies « Arrivée » sont plus de type *habitué* ( $\chi^2(1)=10.1, p<0.001$ ) et ont majoritairement pour motif, rentrer à la *maison* ( $\chi^2(1)=4.5, p<0.1$ ) et la *fréquence* de desserte ( $\chi^2(1)=8, p<0.01$ ), cf Figure 77.

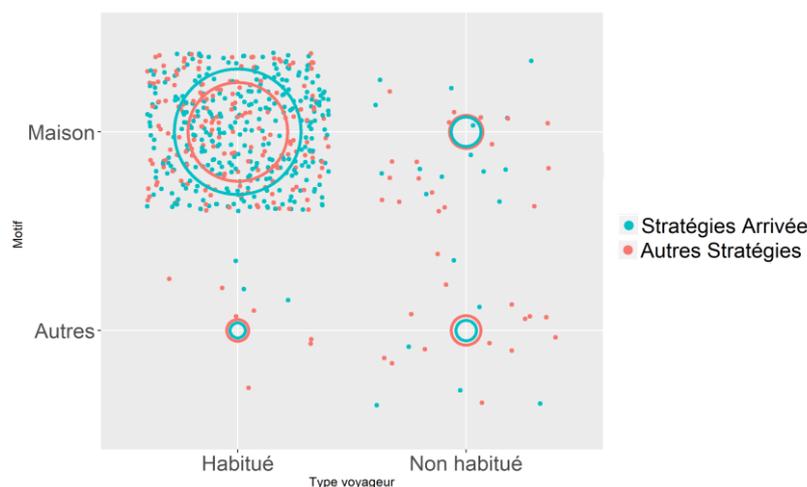


Figure 77. Regroupement autour d'*habitué* et *maison* avec une prédominance de la stratégie « Arrivée » pour cette combinaison

Dans le Tableau 3, sont représentées les p-value du GLM des catégories comme variables dépendantes et des facteurs individuels comme variables explicatives.

Tableau 3. P-value du GLM des catégories versus variables individuelles et propres au trajet, à travers le LRT (*Likelihood-ratio test* [AGR 07]).

Variables	Quai	Quai Entrée	Quai Moins dense	Train	Arrivée
Age	0.39	0.45	0.34	0.01 *	
Genre		0.26	0.49		
Type de voyageur	2.3e-3**	0.003**	0.9	0.35	0.001 **
Motif de déplacement			0.5		0.03 *
Volume de déplacement*	5.9e-4***		0.052.		
Temps de trajet (mn)		0.001**	0.68	0.14	
Temps interval (mn)				0.03 *	
Fréquence desserte	8e-03***	0.17	0.06.	0.43	0.005**

\*Seul ou en groupe

### Variables environnementales et contextuelles

Les stratégies de positionnement en longueur sont étudiées par rapport aux propriétés de l'environnement comme la position des sorties en destination, l'occupation des véhicules et la densité sur quai (cf. Tableau 6). Essentiellement, nous identifions un lien entre la stratégie « *Quai-Entrée* » et la position des *entrées* sur le quai ( $\chi^2(1)=6.5$ ,  $p<0.05$ ), ceci est attendu car justement cette stratégie consiste à s'agglutiner autour des *entrées* du quai. Nous avons aussi un effet significatif avec les *comptages* aux entrées ( $\chi^2(1)=35.2$ ,  $p<0.001$ ). De plus, la stratégie « *Quai-Moins de monde* » semble être liée à la *densité* sur le quai. Quand cette densité diminue, la stratégie « *Moins de monde* » augmente plus ( $\chi^2(1)=16.03$ ,  $p<0.001$ ). Nous n'obtenons pas d'effet significatif entre la position des sorties des destinations et la catégorie « *Arrivée* » ( $\chi^2(1)=1.9$ ,  $p=0.16$ ). Cependant, nous avons calculé ces positions pour les dix destinations les plus empruntées. Comme déjà rapporté, nous avons relevé qualitativement une distribution normale autour des zones de sorties et des zones avoisinantes. Comme rapporté dans la partie Expérimentation I.2.4, nous relevons

pour ce modèle des effets significatifs du nombre de montants ( $\chi^2(1)=13.46$ ,  $p<0.001$ ), de nombre de descendants ( $\chi^2(1)=6.76$ ,  $p<0.01$ ) ainsi que de l'occupation quai ( $\chi^2(1)=6.6$ ,  $p<0.01$ ). En revanche, le GLM rapporte un effet non significatif de l'occupation train ( $\chi^2(1)=1.3$ ,  $p=0.2$ ).

Tableau 4. P-value du GLM des catégories en longueur versus variables contextuelles

Variables \ Catégories	Quai		Sorties	Train	
	Position Entrés	Densité	Comptage aux entrées	Densité	Montants Descendants
Quai	0.1	1e-4***	0.005 **		
Entrés	2e-9 ***		2.8e-09 ***		
Moins de monde		6e-5***			
Arrivée			0.16		
Train		0.03*		0.31	3e-4*** 0.01*

\*  $p \leq 0.05$ , \*\*  $p \leq 0.01$ , \*\*\*  $p \leq 0.001$

### 5.2.1.7.2 Stratégies de positionnement en largeur

Il y a une relation entre l'occurrence des catégories de positionnement en largeur et les 12 zones ( $\chi^2(33)=80.8$ ,  $p<0.001$ ).

#### Variables individuelles et propre au parcours

Dans le Tableau 5, nous avons converti nos variables catégoriques (tout comme les catégories en longueur) en variables binaires comme suit :

Genre (Homme=0, Femme=1), Type (Non habitué = 0, Habitué = 1), Motif (Maison =1, Autre=0), Volume (Groupe=0, Seul=1)

Tableau 5. Relations possibles entre les variables, les catégories en largeur et la description de données correspondantes

Variables \ Catégories	Quai	Stratège	Adaptatif
Age	40.9 (sd: 12.7)	40.1 (sd: 11.3)	38.9 (sd: 13)
Genre: Femme	0.47	0.47	0.49
Type : Habitué	0.89	1	0.9
Motif : Maison	0.97	0.97	0.95
Volume : Seul	1	1	0.99
Temps de trajet (mn)	21.6 (sd: 11.1)	22.8 (sd: 12.6)	21.2 (sd: 12.9)
N	71	38	348

Nous obtenons un effet significatif entre les catégories des « Stratèges » avec le type de voyageur ( $\chi^2(1)=7.9$ ,  $p<0.01$ ) (cf. Tableau 6).

Nous ne sommes pas en mesure d'approfondir les analyses statistiques pour les catégories en largeur, car les mouvements d'une voie à une autre sont très rapides, et nous ne disposons pas :

- De la distribution par voie, pour étudier la catégorie quai.
- Des affichages des voies au moment exact du recueil, ces derniers peuvent changer rapidement.

Tableau 6. P-value du GLM des catégories en largeur versus variables contextuelles

Catégories	Quai	Stratège	Adaptatif
Variables			
Age	0.26		0.44
Genre	0.47		
Type	0.46	0.005 **	0.64
Motif			
Volume	0.08	0.14	0.1
Temps de trajet (mn)		0.67	
Temps interval (mn)		0.20	

\*  $p \leq 0.05$ , \*\*  $p \leq 0.01$ , \*\*\*  $p \leq 0.001$

### 5.2.1.7.2.1 Récapitulatif : Proposition de modèles et choix de variables

Dans le Tableau 7, nous sélectionnons les relations entre les variables et les motivations, et nous affinons notre modèle. Notre régression linéaire multiple comporte plusieurs variables explicatives. Nous utilisons l'AIC (*Akaike's Information Criterion* : [AKA 73 74 87]) afin de déterminer le meilleur modèle. Nos Variables Dépendantes (VD) sont nos stratégies en longueur et en largeur. Nous analysons ces stratégies en considérant les Variables Indépendantes (VI) que sont les variables individuelles, propres au trajet et les variables contextuelles.

VD : *Quai, Entrée, Moins de monde, Train, Arrivée et Stratège*

VI : *Âge, Genre, Type, Motif, Volume, Temps de trajet (incluant en intervalles), Fréquence de desserte, nombre d'entrants, nombre de sorties, densité sur le quai, densité dans le train, montants, descendants.*

Tableau 7. Sélection du meilleur modèle selon les valeurs AIC les plus faibles

Variable	Meilleur modèle selon valeur d'AIC	
	Individuelle / trajet	Contextuelle
Quai	~ Volume + Type + Fréquence	+ Densité + Comptage entrée
Entrée	~ Temps + Type	+ Position entrées + Comptage entrée
Moins de monde	~ Fréquence + Volume	+ Densité quai
Train	~ Âge + Temps Intervalle	+ Densité quai + Montants + Descendants
Arrivée	~ Motif + Type + Fréquence	
Stratège	~ Type	

Notons que les sous-catégories « *Quai* » peuvent en quelque sorte bâtir le modèle de la catégorie « *Quai* », excepté pour « *temps* » qui apparaît seulement pour la sous-catégorie « *Entrée* ». Cela peut être dû à des effets cumulatifs et neutralisants, en même temps.

## 5.2.2 Expérimentations II : Phase Train

Dans ce qui suit, nous rapportons une série d'expérimentations en vue de comprendre les choix de positionnement des usagers, dans le train.

## 5.2.2.1 Expérimentation II.1: Questionnaire B dans le train

### 5.2.2.1.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** A bord du train, nous ne disposons pas d'information sur les motivations des usagers dans ce nouveau contexte. Nous supposons que ces choix découlent de plusieurs motivations, comme se positionner à proximité des portes et le type du siège [BER 13].

**Hypothèse.** Les voyageurs choisissent leurs emplacements dans le train selon certaines préférences comme la proximité des portes et le type du siège.

### 5.2.2.1.2 Méthode

#### **Participants**

Les personnes interrogées sont des usagers montants à la gare BFM et prenant le RER C. Il s'agit de questionner les usagers sur leurs choix d'emplacement dans le véhicule. Le nombre total recueilli est de 614 personnes, à bord du train.

#### **Matériel**

Les 3 enquêteurs sont munis d'un questionnaire de motivations de positionnement dans le train (voir le questionnaire Figure Annexe 8.)

#### **Procédure**

Cette phase a pour but d'apporter une meilleure compréhension sur le positionnement des personnes dans un véhicule. Le recueil de données s'est déroulé du 05 au 08 Décembre 2016 entre 17h et 20h. Les enquêteurs se positionnent au niveau de la gare en amont de *BFM* à *Saint-Michel Notre Dame* (2 stations afin d'avoir le temps nécessaire pour se repérer), y repèrent la position des trois derniers véhicules, se placent en fonction, repèrent le type de matériel roulant (configuration interne différente d'un matériel à un autre) ainsi que la mission cible. Nous partons du constat que dans les voitures les plus occupées, nous n'observons pas vraiment des choix « libre » des usagers compte tenu qu'ils seront contraints de se placer exclusivement là où le flux les emmène et là où il y a de la place. Pour cela, nous restons toujours dans le contexte zone dense mais nous choisissons d'étudier les véhicules les moins occupés par rapport aux autres (chiffre occupation véhicule des rames compteuses).

L'enquête prend comme cas d'étude 7 missions sur 10 existantes (sélection des missions comportant moins de variabilités entre elles ; voir Tableau Annexe 2). Chaque soirée d'enquête se concentre sur deux missions et, pour chaque mission, deux recueils de données sont effectués.

Les enquêteurs recueillent plusieurs informations concernant le voyageur questionné (genre, âge, type de voyageur, déplacement individuel ou en groupe), son trajet (destination, mission du train, motif du déplacement), ainsi qu'une réponse à la question clé concernant le positionnement dans le train.

- « Pourquoi avez-vous choisi de vous mettre à cet endroit précis dans le train ? »

De plus, l'emplacement de la personne interrogée est représenté par une croix sur le plan du véhicule, fourni avec le questionnaire (Figure Annexe 8.)

### Recueil et traitement de données

Les réponses aux questions ouvertes sur le positionnement dans le train, sont recueillies sous forme de verbatim. L'ensemble des réponses a été traité et catégorisé par deux personnes « juges » afin de minimiser les biais de l'observateur et d'offrir une fiabilité inter-évaluateurs.

#### 5.2.2.1.3 Résultats

Pour les 3 véhicules, nous avons eu un nombre différent de questionnaires lié à la variation du nombre de montants par véhicule (Véhicule 16 = 228, Véhicule 15 = 151, Véhicule 14 = 235). Sur les 3 véhicules, nous avons au total 614 participants (269 femmes et 345 hommes avec une moyenne d'âge de 39.63 (Écart-type= 12.9). Nous identifions parmi ces participants, une majorité d'habitueés des lieux 85% contre 15% de non habitués. Compte tenu de l'heure, nous identifions également une majorité d'usagers dont le motif de déplacement est de rentrer à leur domicile 91% contre 9% répartis entre travail, rendez-vous et autres.

Nous obtenons des réponses diverses à la question de positionnement dans le train. Naturellement, on obtient un top dix différent de celui obtenu sur le quai, compte tenu que ces véhicules contiennent plus de catégories de positionnement (Figure Annexe 9).

**Positionnement dans le train.** Nous remarquons que 23% des réponses se rapportent aux choix du véhicule (contexte quai, catégorie longueur, i.e. *je suis là car ce véhicule correspond à la position de la sortie à mon arrivée*) et 77% capturent le nouveau contexte train et répondent en fonction de ce contexte.

Sur ces 77% de réponses exploitables, nous relevons 55% de réponses qui se rapportent principalement à la disponibilité des sièges, puis à des caractéristiques plus micro (type de siège : fenêtre, couloir, etc.) ou étage (bas, haut). L'étude séparée des véhicules révèle des différences quant à la fréquence de certaines catégories de réponse, ainsi que l'apparition de certaines catégories de réponse selon le véhicule. Le Tableau 8 présente les raisons évoquées selon le véhicule.

Tableau 8. Catégories de réponses dans le train, par véhicule

Rang	Raison		
	Véhicule 16	Véhicule 15	Véhicule 14
1	Liberté place (54.3%)	Liberté place (42.7%)	Liberté place (61.3%)
2	Moins de monde (19%)	Plus de place debout (19%)	Plus de place debout (18.4%)
3	Plus de place debout (7.8%)	Moins de monde (8.6%)	Préfère debout (5.8%)
4	Proximité porte (4.3%)	Accompagné d'amis (6,9%)	Type siège (4.15%)
5	Étage (4%)	Bien-être (5.1%)	Proximité porte (3.5%)
6	Bien-être (3.5%)	Proximité porte (5.2%)	Objets (2.5%)
7	Type siège (3.2%)	Préfère debout (4.3%)	Accompagné d'amis (1.4%)
8	Accompagné d'amis (1.4%)	Étage (2.6%)	Étage (1.2%)
9	Préfère debout (1.4%)	Objets (2.6%)	Moins de monde (0.92%)
11	Rendez-vous (0.71%)	Sens de la marche (2.16%)	Sens de la marche (0.92%)
12	Sens de la marche (0.35%)	Rendez-vous (0.86%)	

Le test chi-deux de la distribution des catégories de réponse par rapport aux voitures est significatif ( $\chi^2(38)=59.27, p<0.05$ ). Nous rejetons l'hypothèse nulle selon laquelle les catégories sont indépendantes des voitures.

**Nombre d'assis par véhicule.** Le GLM rapporte un effet significatif du numéro du véhicule ( $\chi^2(2)=33.84, p<0.001$ ). La pente associée à Véhicule 16 (-1.36) et Véhicule 14 est négative (-1.44), cela indique que ces véhicules sont associés à une baisse du nombre de personnes assises.

Si l'on met ces données en lien avec le nombre de montants et l'occupation du véhicule, nous testons un GLM avec ces deux variables comme indépendantes. Nous obtenons un effet significatif pour l'occupation ( $\chi^2(1)=33.72, p<0.001$ ) et non significatif pour les montants ( $\chi^2(1)=0.12, p>0.05$ ).

**Répartition haut et bas par véhicule.** Le GLM rapporte un effet significatif de la répartition bas/haut avec le numéro du véhicule ( $\chi^2(2)=10.18, p<0.01$ ). Cet effet est significatif spécifiquement pour la Voiture 14 ( $p<0.01$ ). La pente associée à cette voiture est négative (-0.56), cela indique que ces véhicules sont associés à une baisse du nombre de personnes allant s'installer en bas.

Si l'on met ces données en lien avec le nombre de montants et l'occupation du véhicule, nous testons un GLM avec ces deux variables comme indépendantes. Nous obtenons un effet significatif pour occupation ( $\chi^2(1)=4, p<0.01$ ) et significatif aussi pour montants ( $\chi^2(1)=6.2, p<0.05$ ). Ceci semble être attendu vu la hausse de la densité et des montants en Voiture 14, il semble y avoir une baisse de la disponibilité de l'étage « bas ». Ce qui nous oriente vers le fait que l'étage le plus préféré est celui du « bas ».

**Positionnement selon la moitié du véhicule.** Cette analyse inclut deux facteurs : la longueur de la voiture (distance à parcourir), et son architecture (agencement de l'intérieur, Z5600/Z8800/Z20500/Z20900). Le GLM rapporte un effet significatif de la longueur de la voiture ( $\chi^2(1)=5.4, p<0.05$ ) et non significatif pour la série Z de voiture ( $\chi^2(2)=4.2, p>0.05$ ) (cf. Figure 78).

On constate que la pente associée à longueur est positive (0.5). Cela signifie qu'une augmentation de la longueur correspond à une augmentation de la proportion. Cela prend sens car pour les voitures les plus courtes, la capacité en places assises est diminuée, ce qui implique un remplissage plus rapide et des distances à parcourir moins longues, et donc une recherche plus fréquente (Voir Tableau Annexe 11)

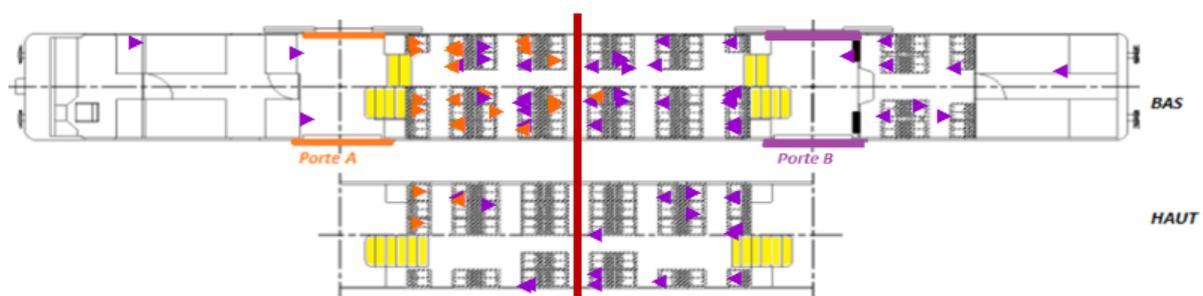


Figure 78. Positionnement des personnes interrogées de la Voiture 16 de type Z8800 avec une disposition de sièges de 2+3. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan

Ces effets peuvent être mieux appréciés par rapport aux divers types de matériels roulants, cf. graphiques en Annexe (Figure Annexe 10 et Figure Annexe 11). Ceci suggère que les choix se font aussi par rapport à la distance à parcourir.

#### 5.2.2.1.4 Discussion

Dans la continuité de l'étude précédente, préalable, qui portait sur la sélection par le voyageur de sa voiture, en fonction de l'occupation et du nombre de montants/descendants, nos résultats montrent que les voitures, pourtant semblables, sont utilisées selon le contexte. En effet, les catégories de réponse sont dépendantes des voitures (chi-deux significatif).

Nous remarquons une expression plus importante des réponses sur la disponibilité des sièges (V16 : 54%, V14 :61%). Les réponses se rapportent aux espaces libres pour rester debout (V16 : 19%, V14 :18.4%), au choix de l'étage (V16 : 4%, V14 :1.2%) et au type de sièges (V16 : 3.2%, V14 :4.2%).

De ce point de vue, nous distinguons clairement un effet du contexte sur les choix des usagers. Par moment, le contexte presse les usagers pour avoir une place assise, peu importe son type (*Fenêtre, Couloir, Milieu, Solo*). Dans d'autres cas, les usagers sont à la recherche d'un *siège assis* et d'un *type* de siège particulier. Dans d'autres, ils préfèrent un étage précis. Cependant, il ne s'agit pas seulement des préférences des passagers. Ces préférences s'expriment par rapport à ce qui est offert par la situation rencontrée. Nous distinguons donc la notion de choix « *libre* » versus choix « *imposé* ».

Il est cependant difficile, avec les données actuelles de comprendre les liens de causes à effet entre le choix et ce qu'offre le contexte comme choix : (i) nous ne disposons pas de l'occupation de la voiture au moment de la passation du questionnaire, (ii) nous ne disposons pas de la répartition des personnes dans ce véhicule (d'un siège à un autre), (iii) nous ne disposons pas de l'occupation des types de siège, (iv) nous ne disposons pas de répartition d'occupation par étage.

Il est aussi intéressant d'étudier le phénomène de positionnement dans les voitures du train tout au long du trajet : dès son début, voiture libre versus choix relativement « *libre* », puis voiture bondée versus choix relativement « *imposé* ». Cela peut nous permettre d'étudier l'adaptation comportementale face à l'évolution et à la restriction imposée par le contexte.

Il subsiste donc une différence dans les motivations rapportées des voyageurs selon le véhicule. Cela nous oriente sur le fait que le contexte n'est pas exactement le même d'un véhicule à un autre et que chacun présente des propriétés définies par les échanges à la gare BFM et de tous les autres échanges dans les gares en amont. La propagation et l'accumulation des hétérogénéités des préférences sur plusieurs gares rendent difficiles l'estimation du contexte rencontré et des réactions générées.

Ces résultats donnent des lignes directrices pour mettre en place une seconde investigation (5.2.2.2 Expérimentation II.2 : Questionnaire C), plus robuste et détaillée, qui identifie clairement les tenants et les aboutissants. De plus, cette analyse comportera tous les niveaux de densité ce qui permettra une grande flexibilité et adaptabilité du modèle face aux variations du niveau de densité.

## 5.2.2.2 Expérimentation II.2 : Questionnaire C

### 5.2.2.2.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Nous n'avons pas pu établir d'explication détaillée des comportements en raison du manque de données sur le contexte actuel. Nous supposons que ces choix découlent de plusieurs motivations, comme chercher une place assise, se mettre à distance des autres, se rapprocher des sorties surtout quand leur trajet est court. Cela a été observé en partie dans la phase précédente (Questionnaire B dans le train) et rapporté dans la littérature [BER 13].

**Hypothèse.** Le choix de positionnement à l'intérieur du train se fait selon des motivations propres et la sélection de critères d'intérêt.

### 5.2.2.2.2 Méthode

#### **Participants**

Pour l'étude de motivations de positionnement dans le train, nous avons sollicité, par mail en utilisant diverses listes de diffusion, des personnes. Ces dernières se sont portées volontaires pour se représenter la situation et répondre sur leurs choix habituels. Nous avons au total 608 participants (393 femmes et 215 hommes avec une moyenne d'âge de 38.13 (Écart-type= 14.8)).

#### **Matériel**

Questionnaire web dynamique hébergé, en ligne. Langages utilisés : JQuery, HTML, CSS3, SQL.

#### **Procédure**

La campagne de recueils en ligne a duré du 02 Novembre 2017 jusqu'au 18 Février 2018. Nous optons alors vers une approche qui simplifie la question et isole certains autres comportements. Nous proposons une autre méthode de recueil de comportements (questionnaire web dynamique, voir Figure Annexe 13) offrant l'avantage de voir le train se remplir au fur et à mesure du temps, ce qui permet :

- D'apprécier l'évolution des comportements en fonction du niveau de densité de personnes dans la voiture et la construction des comportements sur des patterns bien spécifiques.
- D'isoler la composante descente impliquant des changements contextuels rendant difficile la compréhension des motivations. Dans ce questionnaire, il s'agit exclusivement de montants et la densité ne peut que croître.
- Si plusieurs participations se font en même temps ou à quelques secondes de différence, le répondant verra une croix apparaître dynamiquement et en temps réel sur le siège pris.
- De plus, cela offre l'avantage de comparer les motivations entre diverses architectures de véhicule ainsi que les comportements émergents de chaque architecture. Nous étudions

les architectures de type 2+2 (sièges) et 2+3 ainsi que les voitures courtes et longues. Cette méthode est inspirée du « *carriage-filling exercise* » proposé par Hirsh et al. [HIR 11].

- D'associer un contexte précis aux motivations (durée de trajet, porte empruntée, etc.) et de relever des variables individuelles spécifiques (âge, genre, condition physique, région, etc.).

### **Recueil et traitement de données**

Le questionnaire fournit un bref contexte tel que suit :

« *C'est le soir, après votre journée de travail, vous rentrez chez vous en prenant le train. Vous entrez par la porte A et vous avez un temps de trajet de 20 minutes. Quelle place choisirez-vous ? Une croix rouge X signifie un siège occupé par une autre personne. Merci de choisir un siège libre. Cliquez sur l'image pour faire votre choix qui sera représenté par une croix bleue.* »

Les variables prennent des valeurs différentes et sont générées aléatoirement, par porte d'entrée (A, B), pour le temps de trajet (5, 10, 20, 35 minutes). La croix de positionnement génère des coordonnées (X,Y). Par ces emplacements, nous déduisons des variables comme le Sens de la marche (SM), le Type de siège (F : Fenêtre, C : Conloir, M : Milieu, S : Solo), l'État (D : Debout, A : Assis), l'Etage (H : Haut, B : Bas), ainsi que les taux de remplissage respectifs des sièges assis selon la capacité des sièges assis. De même, à partir de ces coordonnées, nous calculons l'effort fourni pour atteindre un *type de siège* selon la porte d'entrée. De plus, nous calculons le nombre de personnes respectant le positionnement *par moitié de plan*.

Par exemple, pour une personne qui emprunte la porte A et qui se dirige vers la rangé 3 côté porte A, nous comptabilisons un effort de 3. Pour une personne qui emprunte la porte A et qui se dirige vers la rangé 1 côté porte B, nous comptabilisons un effort de 10 (cf. Figure 79).

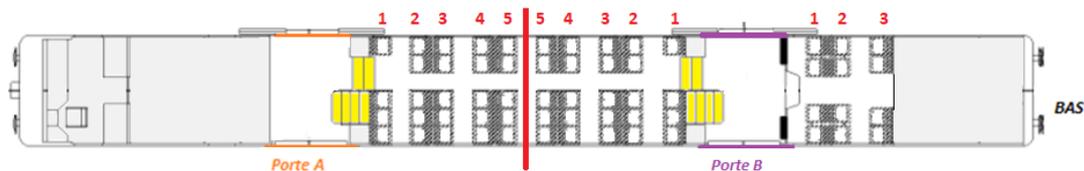


Figure 79. Calcul de l'effort selon la porte empruntée et la rangée du siège.

Le questionnaire demande aussi de mentionner la *raison* de ce choix. Nous rapportons des situations « *peu dense* » où le niveau de remplissage (rapport entre places assises, debout sur le total par voiture) varie de (0,20] et des situations « *très denses* » (80,100].

Le questionnaire concerne 4 architectures de voiture combinant deux propriétés : la disposition des sièges (2+2 ou 2+3) et longueur de la voiture (*Courte* : Motrice, *Longue* : Remorque). L'étude de ces propriétés trouve son origine dans l'hétérogénéité de la combinaison du train à BFM et par conséquent, différentes longueurs (Voir Tableau Annexe 1).

En ce qui concerne la capacité totale du train, la différence pour un train long (8V) entre le minimum (984 places) et le maximum (1136 places) n'est pas très grande : 152 places au total.

Cependant, la différence entre le nombre de places pour une motrice (voiture *Courte*) et une remorque (voiture *Longue*) est notable et requiert de prendre en compte cette différence lors de l'étude des flux d'un véhicule à un autre (cf. Tableau Annexe 4).

### 5.2.2.2.3 Résultats

Nous avons au total 608 participants (393 femmes et 215 hommes avec une moyenne d'âge de 38.13 (Écart-type= 14.8). Nous identifions parmi ces participants 45% de personnes qui habitent en région parisienne et 55% qui habitent ailleurs que la région parisienne.

#### Positionnement selon la moitié du véhicule

Nous obtenons un positionnement lié à la moitié du véhicule à 79% (Figure 80). Ces effets peuvent être mieux appréciés par rapport aux divers types de matériels roulants, et ceci dans les graphiques dans l'Annexe (Figure Annexe 12). Ceci renforce l'argument que les choix se font aussi par rapport à la distance à parcourir.

Cette analyse prend comme Variable Dépendante (VD) la concordance par rapport à la moitié du plan de la porte empruntée et inclut deux facteurs comme Variable Indépendante (VI) : la longueur de la voiture (distance à parcourir), et son architecture (agencement de l'intérieur, Z8800 /Z20900). Le GLM rapporte un effet non significatif du niveau de remplissage par rapport au total des passagers ( $\chi^2(9)=14.2$ ,  $p>0.05$ ), un effet non significatif de la longueur de la voiture ( $\chi^2(1)=0.02$ ,  $p>0.05$ ) et un effet non significatif pour la série Z de voiture ( $\chi^2(2)=0.3$ ,  $p>0.05$ ). Dans l'expérimentation I.3, nous avons obtenu un effet significatif de la longueur du véhicule. Partant de ces constats, il est possible que l'interprétation visuelle de la distance minimise celle-ci et les réponses aux questionnaires sont plus dispersées (dépassent la moitié du plan) qu'en réalité. Par conséquent, nous n'aurons pas d'effet de la longueur de la voiture.

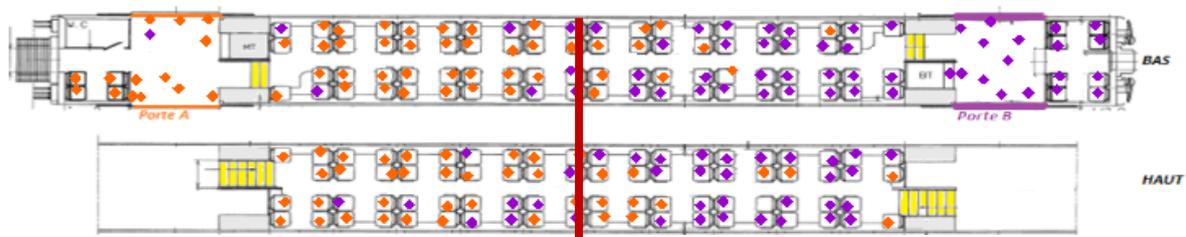


Figure 80. Positionnement des personnes interrogées de la voiture 2 de type Z20900 avec une disposition de sièges de 2+2. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan

#### Positionnement par rapport à la distance par rapport aux portes

Nous mesurons les distances par rapport à la porte en attribuant un numéro de rangé à chaque rangé de sièges assis (Figure 81). Nous représentons la distribution par rangée, par niveau de remplissage des places assises et par étage. Les niveaux de remplissage ont été réajustés selon les capacités respectives de chaque étage. Ceci vient du fait du décalage des remplissages entre les niveaux « bas » et « haut » ce qui rend les données incomparables. Dès lors, nous considérons un véhicule comme étant deux lieux distincts de remplissage. Par conséquent, nous disposons de 8

espaces de remplissages (4 véhicules et par deux étages pour chaque). Voir Figure Annexe 14, pour les remplissages relatifs à toutes les voitures testées.

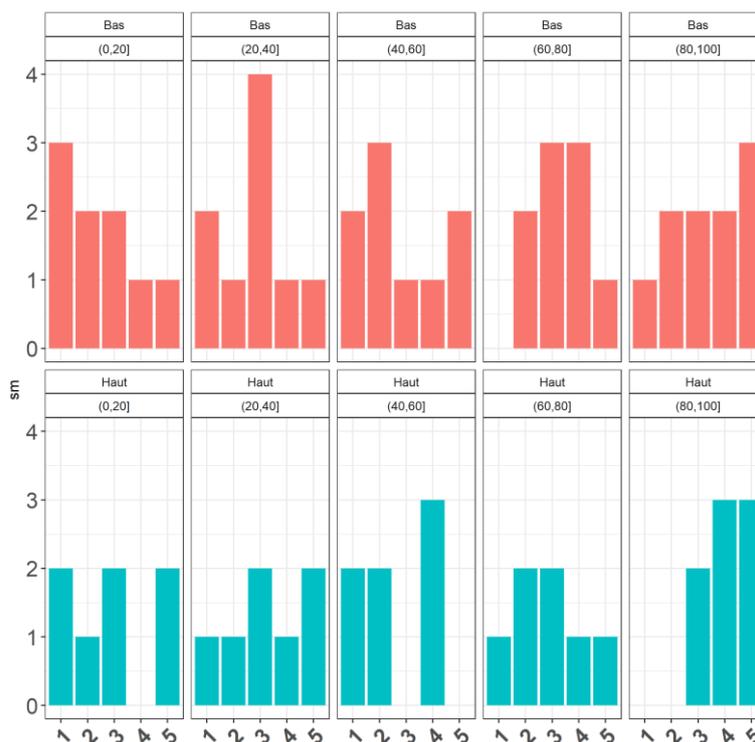


Figure 81. Remplissage des rangées des niveaux bas et haut, par taux de remplissage

D'un point de vue descriptif, on relève les points suivants :

- Le comparatif entre la situation « *peu dense* » (0-20] (choix libres) et « *très dense* » le (80-100] (choix imposés) révèle le passage d'une courbe asymétrie positive à une asymétrie négative. Il existe un petit effet de déplacement d'un pic à travers le remplissage, des premières rangées vers les dernières rangées.
- Si on compare entre les divers niveaux de progression de remplissage, on observe une distribution entre les rangées

Il est clair que le remplissage d'une rangée par rapport à une autre est difficile à explorer temporellement, étant donné que ces opportunités ne seront plus les mêmes plus tard. Il s'agit d'une relation entre ce que l'utilisateur souhaite et ce que la situation impose. C'est pour cela qu'on a effectué un comparatif où les choix sont plutôt libres (0-20] et les choix sont les plus restreints (80-100]. Le déplacement du pic à partir des premières rangées vers les rangées les plus éloignées, à travers les niveaux de remplissage, peut être expliqué par le choix de la place par rapport à la proximité. La distribution entre les rangées aux cours du remplissage est assez répartie (hypothèse : choix selon d'autres critères).

Il y a donc une interaction entre des choix de positionnement selon la proximité si la situation le permet, un souhait de se déplacer vers les autres rangées et des choix imposés quand la situation ne permet plus d'en faire.

Les analyses statistiques des choix des rangées par type de matériel roulant (2+2 et 2+3), sa longueur (rame *Longue* ou *Courte*), par étage, et en fonction de l'évolution du taux de remplissage rapportent :

- Pour la disposition 2+2 / *Courte* : un effet non significatif du taux de remplissage ( $\chi^2(4)=7.3$ ,  $p>0.05$ ) et non significatif de l'étage ( $\chi^2(1)=0.47$ ,  $p>0.05$ ).
- Pour la disposition 2+2 / *Longue* : un effet significatif du taux de remplissage ( $\chi^2(4)=20.8$ ,  $p<0.001$ ) et non significatif de l'étage ( $\chi^2(1)=1.73$ ,  $p>0.05$ ). Le test post-hoc de contraste des taux de remplissage entre (0,20] - (80,100] est significatif ( $p<0.001$ ) et associe une pente négative. Ce qui veut dire que pour les niveaux les plus vides nous avons une sélection des rangées les plus proches.
- Pour la disposition 3+2 / *Courte* : un effet non significatif du taux de remplissage ( $\chi^2(4)=4.5$ ,  $p>0.05$ ) et non significatif de l'étage ( $\chi^2(1)=0.2$ ,  $p>0.05$ ).
- Pour la disposition 3+2 / *Longue* : un effet significatif du taux de remplissage ( $\chi^2(4)=12$ ,  $p<0.05$ ) et non significatif de l'étage ( $\chi^2(1)=0.2$ ,  $p>0.05$ ). Le post-hoc de contraste des taux de remplissage entre (0,20] - (80,100] est significatif ( $p<0.01$ ) et associe une pente négative. Ce qui veut dire que pour les niveaux les plus vides nous avons une sélection des rangées les plus proches.

Il est donc clair que l'effet de la longueur de la rame renforce le choix des rangées les plus proches pour les niveaux de remplissage les plus libres, car les distances à parcourir deviennent plus longues (Voir Tableau Annexe 11). On peut émettre l'hypothèse suivante : ce choix inclut peut-être une projection vis-à-vis de la sortie (voir Figure 97).

### **Comportement des assis - Positionnement par rapport au sens de la marche**

Avec la Figure 82, nous représentons l'évolution des remplissages des sièges de type « *sens de la marche* » et « *contre sens de la marche* » par rapport à l'évolution du remplissage des sièges assis.

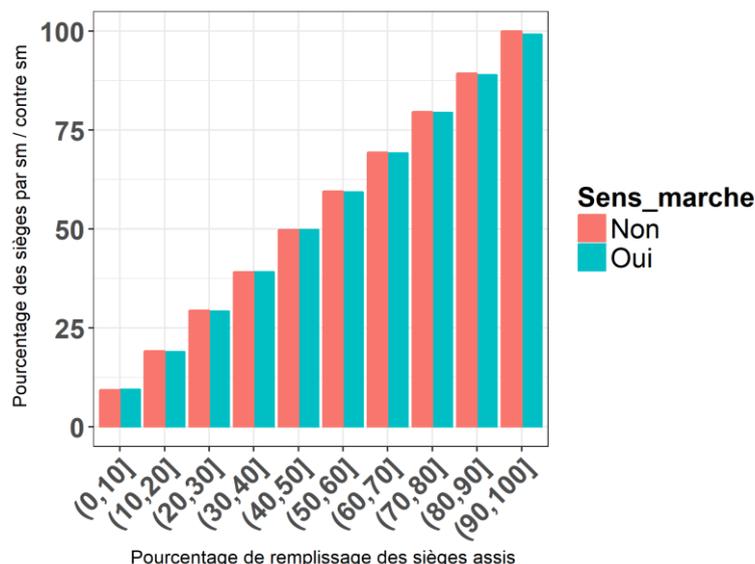


Figure 82. Pourcentage de remplissage des sièges assis en fonction de l'évolution du pourcentage du remplissage des sièges du type « sens de la marche : oui » et « contre sens de la marche : non »

Le GLM rapport un effet non significatif ( $\chi^2(9)=13.8, p>0.05$ ) du choix « *sens de la marche* » et « *contre sens de la marche* » selon le taux de remplissage. Par rapport aux variables individuelles (*âge, genre, condition physique, zone d'habitation*) et contextuelles (*temps de trajet*), les choix du sens du train n'est pas lié à ces variables ( $p>0.05$ ).

### **Comportement des assis - Positionnement par rapport au type de siège**

Dans la Figure 83 est décrite l'évolution du pourcentage de remplissage des différents types de sièges en fonction du remplissage du total des sièges assis des voitures.

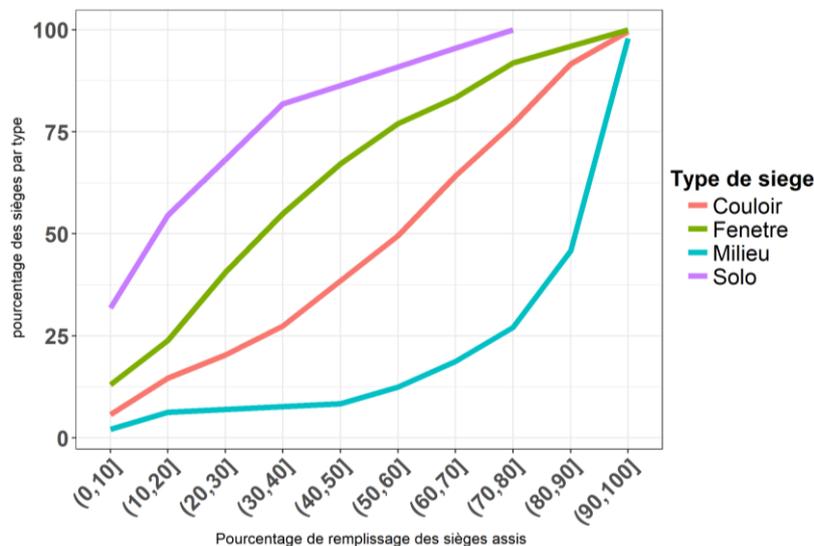


Figure 83. Pourcentage de remplissage des sièges assis en fonction de l'évolution du pourcentage du remplissage des sièges du type « Fenêtre, Couloir, Milieu et Solo »

Nous explorons les types de sièges et leur relation avec le « *taux d'occupation des sièges assis* ». Pour le type « Fenêtre », on a un effet significatif du « *taux de remplissage des places assises* » ( $\chi^2(9)=66.4, p<0.001$ ). Cette significativité est prononcée pour les intervalles de remplissages :

Pour (20, 30] en associant une pente positive ( $p<0.01$ ) et de (60, 100] avec une pente qui devient négative à partir de 60 % ( $p<0.05$ ). Cela signifie qu'un taux bas de remplissage (20,30] correspond à une augmentation des prises de places de type « Fenêtre » et qu'une augmentation du taux de remplissage correspond à une chute de prise de places de type « Fenêtre ». Ceci peut s'expliquer par le fait que, justement, ces types de sièges s'épuisent de plus en plus et il devient peut-être plus simple de choisir un autre type de siège.

Le test post-hoc de comparaison entre les intervalles (0,10] et (90,100] est significatif ( $p<0.01$ ) associant une pente positive qui exprime l'augmentation des prises des places assises de type « Fenêtre » pour l'intervalle le plus libre (0,10], et ceci en comparaison avec (90,100].

Pour le type « Couloir », on rapporte un effet significatif du « *taux de remplissage des places assises* » ( $\chi^2(9)=42.3, p<0.001$ ). Cette significativité est prononcée pour les intervalles de remplissages :

De (0,10] et de (20,40] associant une pente négative ( $p < 0.01$ ) et pour les intervalles (60,70] et (80,90] associant une pente positive ( $p < 0.05$ ). Les résultats sont aussi significatifs pour l'intervalle (90,100] et la pente redevient négative ( $p < 0.05$ ). Cela signifie qu'une augmentation du taux de remplissage correspond à une augmentation de places prises de type « *Couloir* ». Ceci peut s'expliquer par le fait que ces sièges remplacent en quelque sorte le type « *Fenêtre* », sauf pour les 90%-100%.

Le test post-hoc de comparaison entre les intervalles (0,10] et (90,100] est non significatif ( $p > 0.05$ ). Ceci est n'est pas étonnant puisqu'on a une diminution des préférences « *Couloir* » pour les deux intervalles (0,10] et (90,100]. La comparaison (0,10] et (80,90] quant à elle rapporte un effet significatif ( $p < 0.01$ ) puisque l'on a une baisse puis une augmentation respectives à ces intervalles.

Pour le type « *Solo* », on rapporte un effet significatif du « *taux de remplissage des places assises* » ( $\chi^2(9)=23.3$ ,  $p < 0.01$ ). Cette significativité est prononcée pour les intervalles de remplissage de (0,80] associant une pente négative croissante ( $p < 0.001$ ). Cela va dans le sens qu'une augmentation du taux de remplissage correspond à une baisse de places prises de type « *Solo* ». Notons que les sièges de type « *Solo* » sont les plus rares (22 sièges sur un total de 517 étudiés) et les plus prisés selon la Figure 83. En effet, plus de la moitié sont prise dans l'intervalle de (10-20] des sièges assis. Les places s'épuisent à 80% du remplissage du total des sièges assis.

Pour le type « *Milieu* », le GLM rapporte un effet significatif du « *taux de remplissage des places assises* » ( $\chi^2(9)=90.6$ ,  $p < 0.001$ ). Cette significativité est prononcée pour les intervalles de remplissages : (0,20] et (40,90] associant une pente négative décroissante ( $p < 0.001$ ). Les places prises de type « *Milieu* » sont les moins pris jusqu'à 90%.

Le test post-hoc de comparaison entre les intervalles (0,10] et (90,100] est significatif ( $p < 0.05$ ) et il est associé à une pente négative qui exprime la diminution des préférences « *Milieu* » pour l'intervalle (0,10] contre une augmentation pour l'intervalle (90,100]. Ceci peut être apprécié dans la Figure 83 en constatant une nette augmentation du type « *Milieu* » : en effet, en 10% de taux de remplissage total des siège assis (le passage de 90 à 100%), 50% des types « *Milieu* » sont pris d'un seul coup. Ceci laisse entendre que ces types sont « des derniers choix ».

Nous étudions ces choix par rapport aux variables individuelles (Intervalle d'âge par tranche de 20 ans, genre, condition physique, zone d'habitation) et contextuelles (les 4 temps de trajet, effort en termes de distance à parcourir pour atteindre le siège).

Dans le choix type « *Fenêtre* » nous avons un effet significatif du « *temps de trajet* » ( $\chi^2(3)=0.7$ ,  $p < 0.05$ ) et pour l' « *Intervalle d'âge* » ( $\chi^2(4)=12$ ,  $p < 0.05$ ) et « *l'effort* » fourni pour atteindre le siège ( $\chi^2(1)=5.8$ ,  $p < 0.05$ ).

Le test post-hoc pour « *temps de trajet* » permet de contraster deux valeurs de temps de trajets : (5 et 10 par rapport à 20 associant une pente négative ( $p=0.052$  et  $p < 0.05$  respectivement)). Ceci peut suggérer que pour des temps de trajet courts, les usagers choisissent moins le type « *Fenêtre* ».

Le test post-hoc pour « *Intervalle d'âge* » est significatif pour les intervalles (40,60] et (60,80] ( $p < 0.05$ ) et associe une pente négative. Il semblerait que plus l'âge augmente moins ces places sont prises (hypothèse : difficulté d'accès en entrée et sortie ?). On note aussi un effet significatif de « *l'effort* » fourni associé à une pente positive ( $p < 0.05$ ), ce qui signifie un effort plus important pour s'installer à ce type de place.

Pour le choix de type « *couloir* », nous avons un effet significatif des variables « *temps de trajet* » ( $\chi^2(3)=9.8, p < 0.05$ ) et « *Intervalle d'âge* » ( $\chi^2(4)=9.7, p < 0.05$ ).

Le test post-hoc pour « *temps de trajet* » est significatif s'agissant des contrastes (5 et 10 versus 20) ( $p=0.06, p < 0.05$  respectivement) associant une pente positive. Ce qui signifie que ces places « *couloir* » sont plus prises pour les trajets de courtes durées.

Le test post-hoc pour « *Intervalle d'âge* » est significatif pour l'intervalle (20,40] ( $p < 0.01$ ) et associe une pente négative.

Pour le choix de type « *milieu* », nous avons un effet significatif de « *l'effort* » ( $\chi^2(1)=12.9, p < 0.001$ ) associant une pente négative. Il semblerait qu'il y ait moins de personnes qui parcourent de longues distances pour atteindre ce type de siège. Nous n'avons pas d'autres effets significatifs avec les variables individuelles et contextuelles. Hypothèse possible : il s'agit d'un choix « imposé », il n'y a donc pas de caractéristiques personnelles influençant la décision. De même, pour le choix de type « *solo* » nous avons un effet significatif de « *l'effort* » ( $\chi^2(1)=4, p < 0.05$ ) associé à une pente négative, soulignant la diminution de l'effort pour atteindre ces sièges. Notons que la disposition naturelle des sièges « *solo* » (en début de véhicule) et leur épuisement rapide peuvent être source de significativité dans ce contexte. Autrement nous n'avons pas d'autres effets significatifs avec les variables individuelles et contextuelles, possiblement à cause du nombre réduit de ce type de siège et de leur épuisement rapide.

En somme, nous avons une nette augmentation des places « *fenêtre* » et une chute à partir de 60%. Cette chute est compensée par la prise de sièges « *couloir* » à partir de 60% jusqu'à 90%. De 90% à 100% c'est le type « *milieu* » qui complète le remplissage des places assises. Quant aux sièges « *solo* », ces derniers se remplissent rapidement. Plus de la moitié sont pris dans l'intervalle de (10-20%] des sièges assis.

De plus, les résultats sont cohérents dans le sens où pour des « *temps de trajets* » courts, les usagers choisissent plus le type « *couloir* ». Ce type est évité par la tranche d'âge (20-40] ans. Pour des temps de trajets plus long « *fenêtre* ». Ce type est évité par les tranches d'âge de (40-80]. Pour ce qui est des places de type « *milieu* », nous retenons une baisse de l'effort fourni.

### **Comportement des assis - Positionnement par rapport à l'étage**

Dans la Figure 84 est rapporté l'évolution des remplissages « *Bas* » et « *Haut* » par rapport à leurs capacités respectives (Voir détails sur les capacités par voiture par étage dans Tableau Annexe 4) et à l'évolution des remplissages des sièges assis.

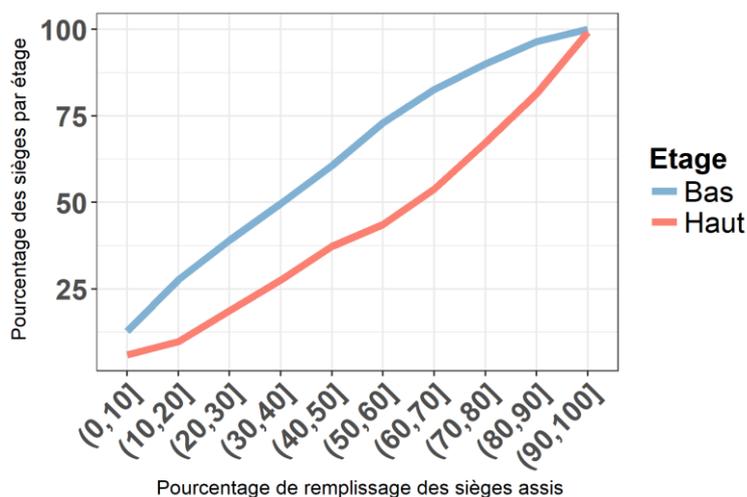


Figure 84. Pourcentage de remplissage des sièges assis en fonction de l'évolution du pourcentage du remplissage des étages « Bas et Haut »

Le GLM rapporte un effet significatif pour le choix de l'étage par rapport au taux de remplissage ( $\chi^2(9)=70.1$ ,  $p<0.001$ ). Cette significativité pour « Etage : bas » est prononcée pour les intervalles de remplissages : (0,20] et (50,60] associant une pente positive ( $p<0.01$ ) et de (80,100] associant une pente négative significative ( $p<0.05$ ). Ceci exprime la décroissance du choix « Etage : bas » en fonction de l'augmentation du taux de remplissage en faveur du niveau Haut.

Par rapport aux variables individuelles et contextuelles, par rapport à l'étage « Bas » nous obtenons : un effet significatif avec le « temps de trajet » ( $\chi^2(3)=16.7$ ,  $p<0.001$ ). Le test post-hoc montre un contraste significatif entre les durées de 5 et 35 minutes associant une pente positive. Cela peut renseigner sur le fait que, l'étage « Bas » est plus prisé pour les « temps de trajets » court que long. Ceci peut être dû à des questions d'accessibilité (étage bas plus rapidement accessible que celui du haut).

On note aussi un effet significatif du « genre » ( $\chi^2(1)=12.17$ ,  $p<0.001$ ). Le post-hoc associe une pente positive significative à « genre : femme » ( $p<0.01$ ). Cela veut dire que le genre « femme » a plus tendance à s'installer dans le niveau bas que haut. Egalement, on mentionne un effet significatif de la variable « Intervalle d'âge » ( $\chi^2(4)=12.8$ ,  $p<0.05$ ). Nous rapportons une pente significative ( $p<0.05$ ) et positive pour les intervalles d'âge (0,20] et (40,60].

### Comportement des assis et debout

Dans la Figure 85 est présentée l'évolution des « Assis » et « Debout » par rapport à leurs capacités respectives. La capacité des sièges assis est le nombre total des sièges assis. La capacité des usagers debout est la valeur théorique prévue pour attribuer à l'espace donné un nombre acceptable de debout fourni par les concepteurs de matériels roulants. L'axe X représente l'évolution de remplissages des véhicules.

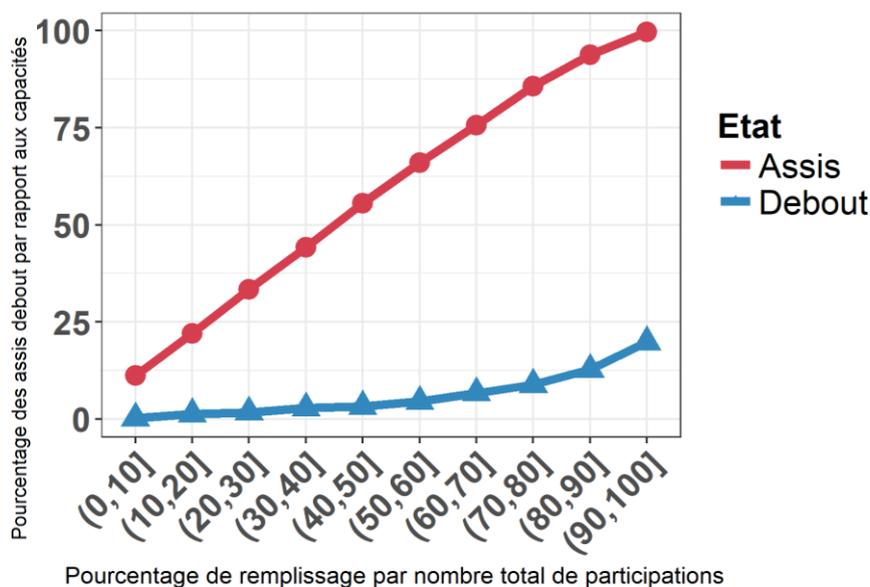


Figure 85. Pourcentage de remplissage des capacités respectives « assis » et « debout » en fonction de l'évolution des pourcentages des remplissages des trains (participations)

On obtient un effet significatif de l'« État » par rapport au taux de remplissage total du train (nombre de participations ; assis et debout) ( $\chi^2(9)=94$ ,  $p<0.001$ ). Nous avons des effets significatifs ( $p<0.01$ ) pour tous les intervalles sauf pour (90,100]. Le post-hoc contrastant les intervalles (0,10] et (90,100] est significatif ( $p<0.01$ ) et associe une pente positive. Ceci veut dire que l'état « assis » est significativement plus important pour de faible taux de remplissage du train.

Par rapport aux variables individuelles, pour la variable « État » (debout, assis), nous avons un effet significatif du *temps de trajet* ( $\chi^2(3)=54.8$ ,  $p<0.001$ ). Le post-hoc associe 5 et 35 minutes est significatif ( $p<0.001$ ) et associe une pente négative. Ceci signifie que pour les « temps de trajets » les plus courts, on a une baisse des assis. Cette attitude semble logique car pour des « temps de trajets » diminués, cela ne vaut pas le coup de fournir l'effort de rechercher une place assise (Figure 86).

Nous relevons aussi un effet significatif de la *condition physique* ( $\chi^2(1)=4.1$ ,  $p<0.05$ ). Le post-hoc contrastant des situations physiques non particulières versus particulières est significatif ( $p<0.05$ ) et associe une pente positive. Ceci est un fait intéressant, car il suggère qu'une condition physique particulière n'implique pas forcément de chercher une place assise tout comme on peut le croire (hypothèse : remonter et descendre les escaliers pour un des étages est peut-être plus fastidieux que l'attente à côté des portes pour certaines difficultés physiques).

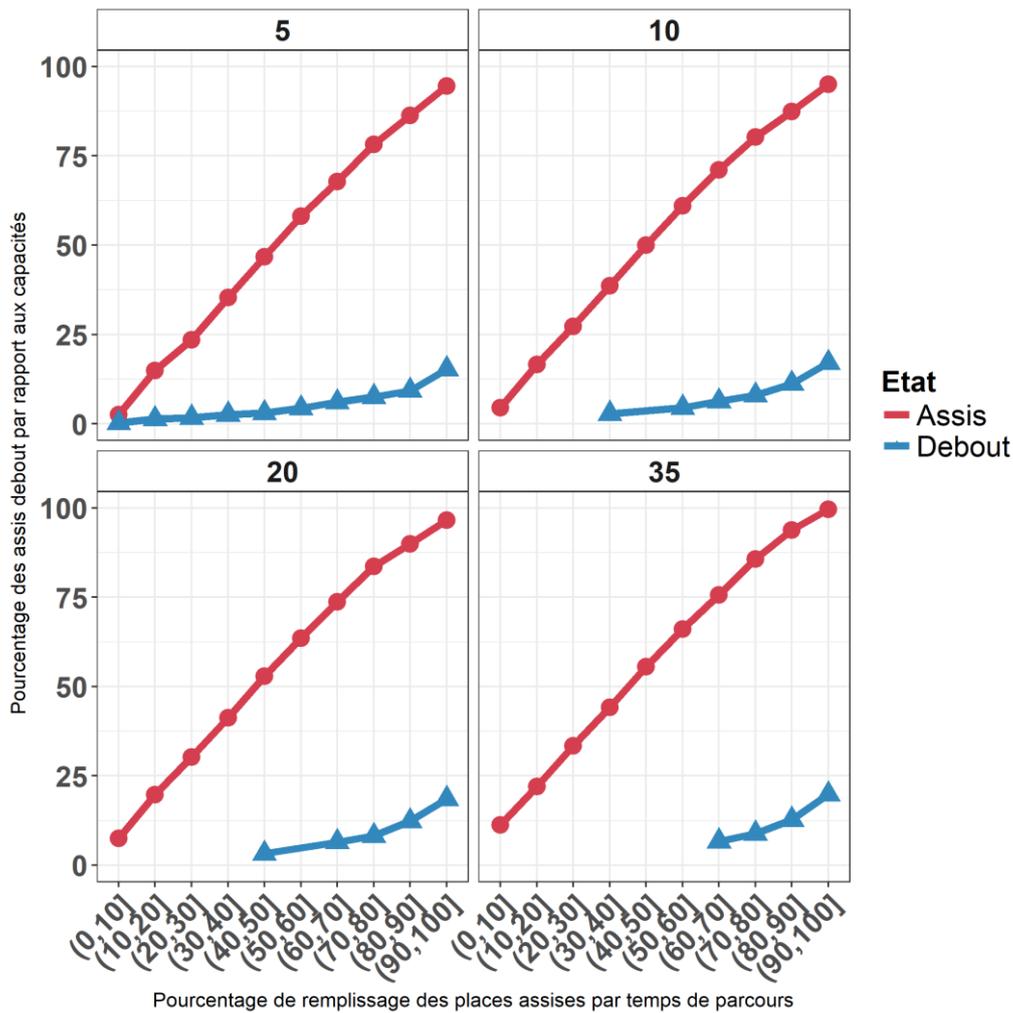


Figure 86. Pourcentage de remplissage des capacités respectives « assis » et « debout » en fonction de l'évolution des pourcentages des remplissages des trains (participations), par temps de trajet.

Le récapitulatif des comportements des assis par type de sièges et étage, ainsi que les comportements des assis et debout est représenté dans le Tableau Annexe 12.

### Mesure de l'effort

L'effort se calcule selon la porte d'entrée et le nombre de rangés de siège dépassés. Par exemple, pour une personne qui emprunte la porte A et qui se dirige vers la rangé 3 côté porte A, nous comptabilisons un effort de 3. Pour une personne qui emprunte la porte A et qui se dirige vers la rangé 1 côté porte B, nous comptabilisons un effort de 10 (cf. Figure 79). Ainsi, l'effort est une mesure par unité, sur le nombre total des rangées d'un véhicule.

L'effort est mesuré, pour chaque type de siège selon le niveau de remplissage du train (Figure 87). L'effort par rapport au « taux de remplissage » est significatif ( $\chi^2(9)=25.8, p<0.01$ ) et ceci pour tous les intervalles. La comparaison (10,20] - (90,100] est significative ( $p<0.01$ ) et associée à une pente négative, cela veut dire que pour des niveaux diminués de remplissage, on a un effort moins important que celui pour les niveaux élevés de remplissage.

L'effort par rapport au « *type de siège* » est significatif ( $\chi^2(9)=18.3$ ,  $p<0.001$ ). Le post-hoc de comparaison entre les « *types de siège* » rapporte : un effet significatif entre « *fenêtre* » et « *milieu* » ( $p<0.01$ ) associant une pente positive, ce qui explique que l'effort fourni pour « *fenêtre* » est plus important. Un autre effet significatif entre « *couloir* » et « *milieu* » ( $p<0.05$ ) associant aussi une pente positive exprimant un effort plus important pour « *couloir* » que « *milieu* ».

La différence d'effort entre « *couloir* » et « *fenêtre* » n'est pas significative ( $p=0.15$ ) associant une pente négative pour « *couloir* ».

Pour ce qui est des variables individuelles et contextuelles, nous avons un seul effet significatif du « *temps de trajet* » ( $\chi^2(3)=11.7$ ,  $p<0.01$ ). Le post-hoc contrastant des durées de trajet de 10-20 et 10-35 minutes est significatif ( $p<0.05$ ) et associe une pente négative. Cela signifie que pour des durées de trajets plus courtes, l'effort fourni est réduit par rapport aux longues durées.

Le récapitulatif des effets relatifs à la variable « *effort* » est représenté dans le Tableau Annexe 13.

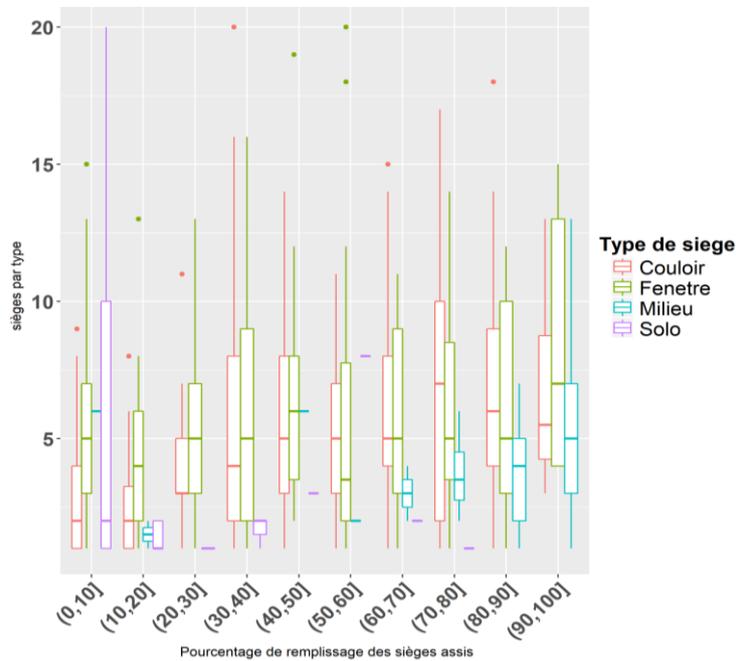
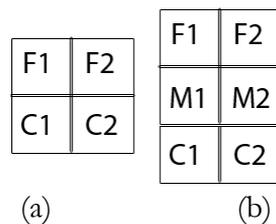


Figure 87. Mesure de l'effort (axe X) en boîte à moustaches, par type de sièges et en fonction de l'évolution du taux de remplissage des places assises (axe Y).

### Les enchaînements de choix – étude des remplissages des carrés

Pour les deux modèles de notre étude (2+2) et (2+3), les véhicules sont constitués de carrés de 4 ou 6 sièges. Nous disposons de 66 carrés de 4 sièges et 25 carrés de 6 sièges (cf. Figure 88).



(a) (b)  
Figure 88. Carrée de (a) 4 et de (b) 6

Nous étudions l'enchaînement des choix et nous relevons un effet intéressant, 88 carrés sur 92 ne font pas intervenir de siège « milieu » durant les 4 premiers choix. Ce qui nous permet de fusionner les analyses des carrés des 2 types, sur les 4 premiers choix, afin de pouvoir révéler des comportements types généralisables.

Pour des carrés de quatre sièges, pour toutes les permutations il existe donc  $4! = 24$  manières de remplir les sièges (cf. Figure 89)

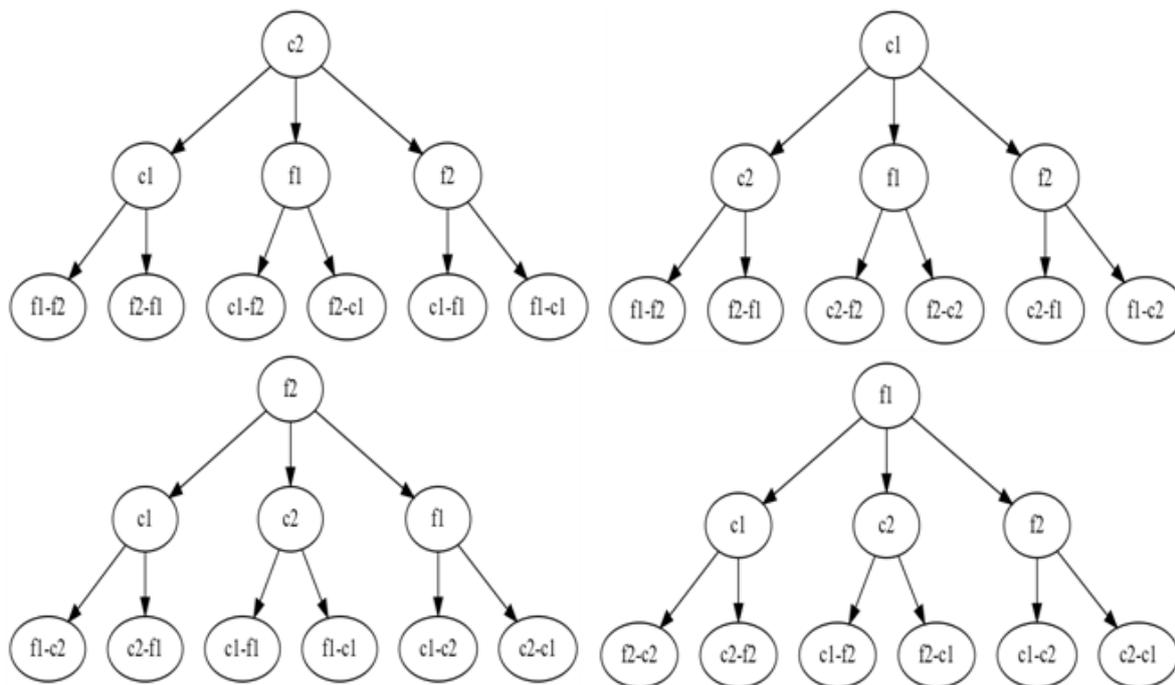


Figure 89. Possibilité de combinaison d'enchaînement des choix (24 possibilités)

Pour les 24 possibilités de remplissage, on observe des chaînes de choix beaucoup plus fréquentes que d'autres (Figure 90). Dans un but de simplification, nous représentons ces chaînes par des symboles exprimant la direction des choix (voir Figure Annexe 15).

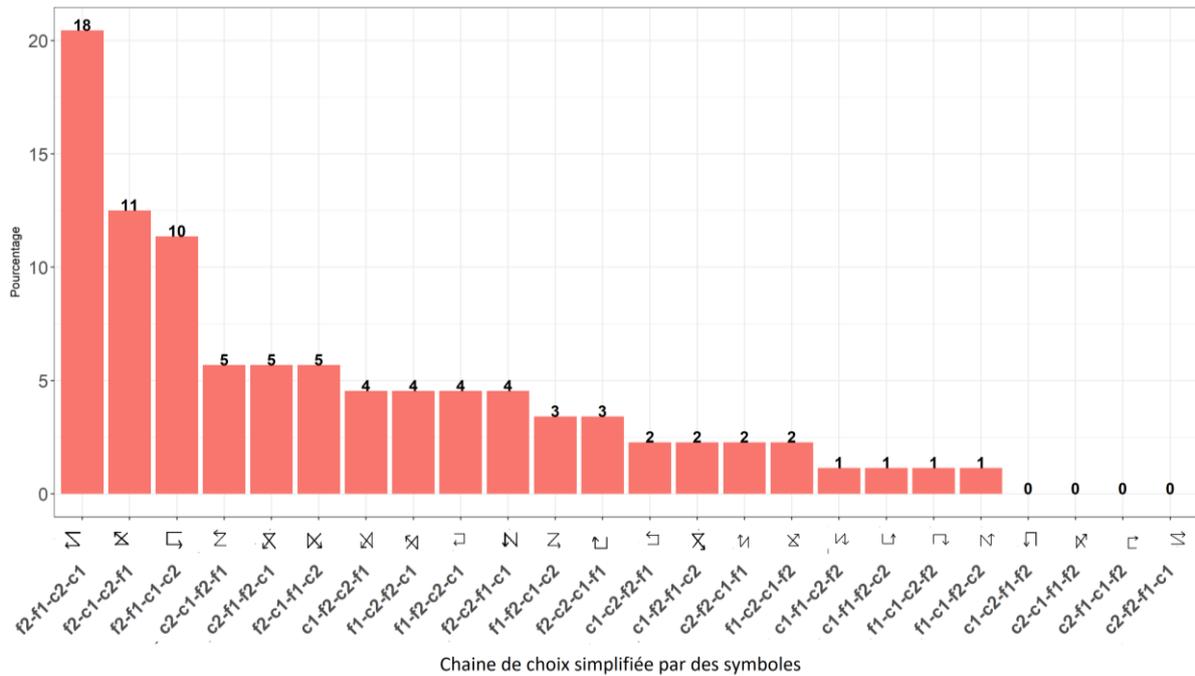
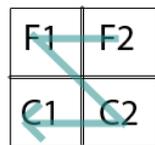


Figure 90. Fréquence des chaînes de choix de positionnement dans un carré

Interprétation des « symboles » (Figure 90 et Figure 91) : la flèche présente la fin de l'enchaînement des choix alors que son début présente le premier choix. Un symbole englobe un enchaînement temporel (de 1 à 4) des choix. Dans le cas présenté par la Figure 91, les choix sont de types F2-F1-C2-C1.



F2-F1-C2-C1

Figure 91. Exemple d'enchaînement des choix dans un carré de quatre places

**Remplissage 1.** Pour un carré totalement vide, le remplissage 1 fait intervenir deux variables

- (a) Type du siège (fenêtre, couloir, milieu). Nous n'allons pas étudier les carrés de trois ou de deux comportements des sièges « Solo » (nombre très diminué).
- (b) Sens de la marche (*sm* : sens de la marche, *csm* : contre sens de la marche).

Tableau 9. Choix 1 selon les critères offerts par la situation

Choix 1	Pourcentage
Fenêtre, sm	57
Fenêtre, csm	18
Couloir, sm	13
Couloir, csm	12

S'agissant du premier choix dans un carré, on remarque que le type « Fenêtre » est supérieur au type « Couloir » ; 75% contre 25% et que « Sens de la marche » est supérieur au « contre sens de la marche » ; 70% contre 30%. Néanmoins, on peut dégager des critères de priorité : le « type de siège » est plus prioritaire que le « sens de la marche » (voir Tableau 9).

**Remplissage 2.** Après un remplissage d'une personne, qui a eu le choix totalement libre, on introduira une autre variable : (3) Type de contact (VAV : Vis-à-vis, Juxta : Juxtaposition).

La juxtaposition peut être allégée par le positionnement dans un carré de 3, en mettant de l'espace au milieu, mais cela implique aussi des places plus petites. C'est pour cela qu'on se propose d'étudier les deux configurations séparément (Tableau 10).

Tableau 10. Diverses possibilités de choix 2 en fonction du choix précédent, par type de carré.

Choix 1	Choix 2		Carre 4 Somme	Carre 6 Somme
	Type, sens	Contact		
Fenêtre, sm	Fenetre,csm	VAV	24	4
	Couloir, sm	Rien	14	2
	Couloir, sm	Juxta	4	4
Fenêtre, csm	Couloir, sm	Rien	5	2
	Fenetre, sm	VAV	5	2
	Couloir, csm	Juxta	1	1
Couloir, sm	Couloir, csm	VAV	4	1
	Fenetre, csm	Rien	2	2
	Fenetre, sm	Juxta	2	0
Couloir, csm	Fenetre, sm	Rien	3	4
	Fenetre, csm	Juxta	1	1
	Couloir, sm	VAV	1	1

Nous dérivons par la suite les critères et leur proportion (Tableau 11) :

Tableau 11. Les pourcentages des critères de choix, par carré

Critère	Somme	Carré 4	Pourcentage par rapport au total du critère	Carré 6	Pourcentage par rapport au total du critère
Contact	VAV	34	52	8	32
	Rien	24	36	11	44
	Juxta	8	12	6	24
Type siège	Fenêtre	37	56	14	56
	Couloir	29	44	11	44
Sens marche	sm	20	30	13	52
	csm	46	70	12	48

- Carré de 4 :

La différence entre les « type de siège » et entre les « sens marche » ne sont pas significatives, par contre entre type de « Contact », elle est significative ( $\chi^2(2)=16.2$ ,  $p<0.001$ ). Dans ce cas, le test post-hoc indique que la différence est significative ( $p<0.001$ ) au profit de « Rien » et de « VAV » et associe une pente positive. Cela veut dire que ces deux types sont les plus suivis. Les comparaisons d'un côté de « Juxta » avec, d'un autre côté, « Rien » « VAV » sont significatives ( $p<0.05$ ) et associées à une pente négative, ce qui veut dire que ce type de contact est le moins apprécié par rapport à « Rien » et « VAV ».

Le vis-à-vis « VAV » est intéressant à étudier. Car l'on remarque une préférence qui existe pour le type « Fenêtre », étant aussi majoritairement pris dans le remplissage1, choisir la fenêtre implique aussi un contact de type « VAV ». Les comparaisons post-hoc entre la combinaison

(*Fenêtre, Juxta*) et (*Fenêtre, VAV*) sont significatives ( $p < 0.01$ ), sont associées à une pente négative. Cela veut dire que pour un même type de siège « *Fenêtre* », le type contact induit « *Juxta* » diminue la prise de ce type de siège par rapport à « *VAV* ». Nous observons les mêmes effets pour les couples (*Couloir, Juxta*) et (*Couloir, VAV*).

- Carré de 6 :

La différence selon le « *type de siège* » et « *sens* » et aussi « *contact* » ( $\chi^2(2) = 0.47$ ,  $p = 0.7$ ) n'est pas significative. Ceci est partiellement prévu car, pour les carrés de 6 qui ne font pas intervenir, majoritairement de siège « *milieu* », la juxtaposition n'est plus problématique car elle est créée naturellement par l'évitement du siège milieu. Donc dans ce cas-là on ne parle plus de « *juxtaposition* » directe.

En somme, le type de siège « *Fenêtre* » est un peu plus préféré au type « *Couloir*, » mais cela dépend du type de contact qu'il engendre, le « *VAV* » est relativement mieux accepté, puis des stratégies de positionnement « *Rien* » qui n'engendrent aucun contact (en diagonale), et puis beaucoup moins le positionnement en juxtaposition. L'effet de la juxtaposition est apparent quand on compare les carrés de 4 versus 6. Le positionnement en « *juxtaposition* » est plus toléré pour les carrés de 6 et passe à 12% pour les carrés de 4, à 24% pour les carrés de 6. Le type « *sens de la marche* » durant cette phase est moins prioritaire sur les autres. Pour les carrés de 6, on remarque une augmentation du « *sens de la marche : sm* ». On peut émettre l'hypothèse que la tolérance de la juxtaposition contribue au renforcement de cette variable.

Dans le Tableau Annexe 14 est présenté le récapitulatif des effets relatifs aux comptages par type de carré par rapport aux types de siège, sens et contact induit.

**Remplissage 3.** A ce stade, on est obligé de se défaire de l'idée que la personne a un choix du contact, voire du type de sièges restants dans certains cas (type de chaîne f1-f2 ne laisse que le choix du type « *Couloir* »). Il est inutile d'analyser toute la chaîne car la personne qui arrive n'a pas conscience de l'ordre de positionnement et n'aura pas d'influence sur son choix. Nous avons au total 12 choix possibles.

Dans la Figure 92 est représentée les cas de figure restant pour le remplissage 3. Par exemple une chaîne qui débute par « *VG* » laisse à l'utilisateur de faire le choix :

- D'une place F2 en laissant une place C2 libre au choix 4.
- D'une place C2 en laissant une place F2 libre au choix 4.

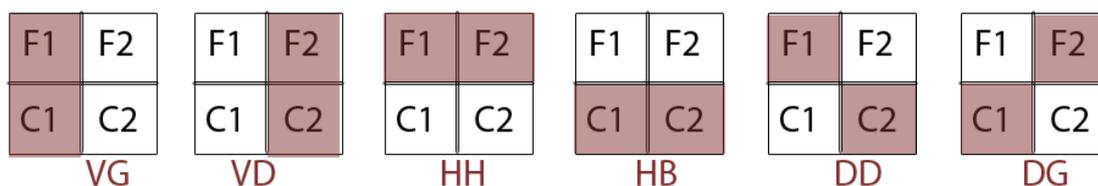


Figure 92. Choix possibles pour le remplissage 3

Dans le Tableau 12, nous présentons les chaînes possibles et les types de choix contraints en fonction. Tout d'abord, nous remarquons une majorité de positionnement en « *VAV* » à côté des fenêtres (*HH*) ( $n = 45$ ) et une minorité de « *VAV* » pour « *Couloir* » ( $n = 7$ ) (*HB*). Puis un positionnement en diagonale (*DG* et *DD*) de 35 carrés. Ceci est la conséquence de

positionnement selon le contact « rien ». Puis les positionnements totaux en « juxta » (*VG, VD*) (n=14).

Tableau 12. Choix possibles depuis le remplissage 3 selon les critères de préférences

Début de la chaîne	Chaîne	Choix			Somme
		Type	Sens	caractéristiques des choix contraints	
<b>VG</b>	VG-F2-C2	Fenêtre	sm	Type	2
	VG-C2-F2	Couloir		Type	2
<b>VD</b>	VD-F1-C1	Fenêtre	csm	Type	5
	VD-C1-F1	Couloir		Type	5
<b>HH</b>	HH-C2-C1	Couloir	sm	Sens	22
	HH-C1-C2		csm	Sens	13
<b>HB</b>	HB-F2-F1	Fenêtre	sm	Sens	7
	HB-F1-F2		csm	Sens	0
<b>DG</b>	DG-F1-C2	Fenêtre	csm	Type + sens	8
<b>DG</b>	DG-C2-F1	Couloir	sm	Type + sens	15
<b>DD</b>	DD-F2-C1	Fenêtre	sm	Type + sens	10
<b>DD</b>	DD-C1-F2	Couloir	csm	Type + sens	2

Nous caractérisons spécifiquement les chaînes commençant par (*DG, DD* et *HB*) d'accès difficile pour les sièges côté fenêtre. Justement, avec la présence de deux personnes, on peut aussi intégrer une nouvelle variable : (4) la difficulté d'accès.

Nous appelons « choix contraint » lorsqu'il ne reste qu'un ou deux sièges. Ainsi, lorsqu'on caractérise les deux choix restants, c'est-à-dire, s'ils concernent le « Type de siège » ou le « Sens de la marche » ou bien les deux.. Par exemple, pour le cas « *VD* », le choix contraint est « Type » puisqu'il reste qu'un siège « *fenêtre* » et « *couloir* » sans aucun choix sur le sens de la marche. Les résultats de l'étude du choix contraint (Type + Sens) sont présentés dans le Tableau 13. Pour *DG* : la place F1 (*Fenêtre, csm*) est difficile d'accès tandis que la place (*Couloir, sm*) est plus facile d'accès. En effet, la place (*Couloir, sm*) est prise à 65% contre 35% pour (*Fenêtre, csm*). Pour *DD* : la place F2 (*Fenêtre, sm*) est difficile d'accès alors que la place (*Couloir, sm*) est plus facile d'accès. Nous avons 83% pour (*Fenêtre, csm*) contre 17% (*Couloir, csm*). Nous pouvons penser qu'il y a un effet franc du « sens de la marche ». Seulement, nous n'avons pas de résultat significatif pour cette variable. Il est fortement possible qu'il s'agisse de croisement des effets des variables et de décisions basées sur des calculs d'avantages et d'inconvénients. Par exemple, dans le cas *DG*, je choisis le couloir qui m'offre une proximité des portes, un moindre effort pour m'asseoir, et « sens de la marche ». Pour le cas *DD* : je choisis la fenêtre qui m'offre « sens de la marche », qui m'évite de devoir me décaler pour laisser descendre et me garantir la tranquillité, et cela contre un effort d'accès. Ceci reste à être investigué avec des variables individuelles (*âge, genre*) et contextuelles (*temps de trajet*). Pour *HB*, il n'est pas possible d'apprécier cette variable dans cette analyse car elle se situe au niveau de remplissage d'un carré et que les types de sièges restants sont « Fenêtre ». Cependant, il y a un effet clair du « sens de la marche » (100%) dans le choix entre les deux « Fenêtre ».

De plus, nous émettons une hypothèse selon laquelle le choix du carré partiellement rempli peut-être fait en fonction de l'effort à fournir pour l'accès, « *type de siège* » de place et « *sens de marche* ».

Etude de choix contraint (Type ou Sens). Dans ce cas nous remarquons que les types « *Fenêtre* » et « *Couloir* » s'égalisent, et que quand le choix se présente, concernant le sens de la marche « *Sm* » l'emporte sur « *csm* ».

Tableau 13. Type de choix contraint : combinaison (Type + Sens) ou simple

Type de Choix contraint	Variable	Somme	Pourcentage
Type + Sens	Fenêtre,csm	8	35
	Couloir,sm	15	65
Type + Sens	Fenêtre,sm	10	83
	Couloir,csm	2	17
Type	Fenêtre	7	50
	Couloir	7	50
Sens	Sm	29	70
	Csm	13	30

**Remplissage 4.** S'agissant du dernier choix dans un carré, on remarque que le pourcentage relatif à type « *Fenêtre* » est inférieur à celui de type « *Couloir* », soit 35% contre 65%. Pour « *Sens de la marche* » est inférieur à « *contre sens de la marche* », soit 30% contre 70%. Les résultats de remplissage 4 sont presque l'inverse de remplissage 1 (Tableau 14). A cet égard, on peut dégager des critères de priorité : le « *type de siège* » est plus prioritaire que le « *sens de la marche* ».

Tableau 14. Choix 4 selon les critères offerts par la situation

Choix 4	Pourcentage
Couloir, csm	40
Fenêtre, csm	30
Couloir, sm	25
Fenêtre, sm	5

### Les réponses à la question de positionnement – analyse des motivations macroscopiques

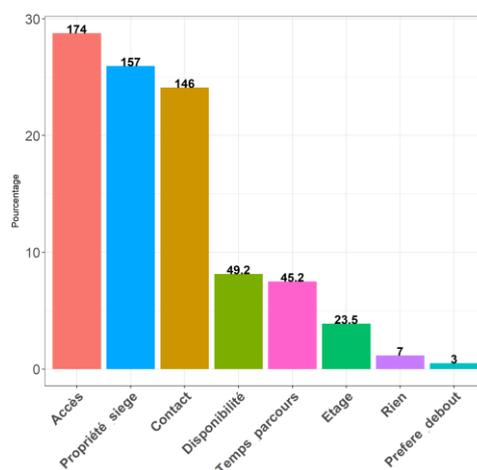


Figure 93. Motivations exprimées de positionnement à l'intérieur du train

Dans la Figure 93, on a 28.8% des voyageurs qui se positionnent par rapport aux « Accès », 26% selon les propriétés du siège (*Type, Sens*), 24% pour des questions de « Contact », 8.25% s'expriment par rapport à la disponibilité des sièges puis 7.5% font intervenir le facteur temps de trajets, et 4% par rapport à l'étage. Ces catégories sont justement liées au niveau de remplissage actuel, c'est pour cela qu'il faudrait investiguer leurs évolutions en fonction du remplissage.

### **Motivations macroscopiques de positionnement par rapport aux taux de remplissage**

Nous investiguons les motivations de positionnement dans le train en fonction du taux de remplissage (Figure 94) et nous relevons des effets non significatifs pour « Accès » ( $\chi^2(4)=0.87$ ,  $p>0.05$ ), « Etage » ( $\chi^2(4)=1.8$ ,  $p>0.05$ ) et « temps de trajet » ( $\chi^2(4)=6.38$ ,  $p>0.05$ ). Par ailleurs, on rapporte un effet significatif pour « propriétés siège » ( $\chi^2(4)=9.5$ ,  $p<0.05$ ). Le post-hoc de contraste entre (60,80] - (80,100] est significatif ( $p<0.05$ ) et associe une pente positive, ce qui veut dire que pour un niveau de remplissage moins important (60-80] nous avons une augmentation de motivation de positionnement par rapport à la propriété du siège. Pour des niveaux où les choix sont très contraints (80-100] nous avons une baisse de ce critère. Pour « contact », on rapporte un effet significatif ( $\chi^2(4)=44.7$ ,  $p<0.001$ ). Le post-hoc contrastant (0,20] - (80,100] est significatif ( $p<0.001$ ) et associe une pente positive. Ce qui veut dire que pour des niveaux de remplissage très bas, ce critère s'exprime très fortement par rapport au plus haut niveau de remplissage.

Pour « disponibilité », on rapporte un effet significatif ( $\chi^2(4)=80.6$ ,  $p<0.0001$ ). Le post-hoc contrastant les (0,20] - (80,100] est significatif ( $p<0.001$ ) et associe une pente négative. Cela veut dire que pour les niveaux de remplissage les plus bas, l'expression sur la disponibilité du siège (sans faire intervenir plus de critères) est beaucoup plus diminuée par rapport aux niveaux de remplissage les plus augmentés. Cela est cohérent dans le sens où l'on remarque une forte expression sur le « type de siège » et le « contact » quand le contexte permet de faire son choix selon ces critères, puis les usagers ont tendance à abandonner ces critères et s'adapter aux restrictions du contexte en cherchant juste un siège disponible, peu importe les autres contraintes.

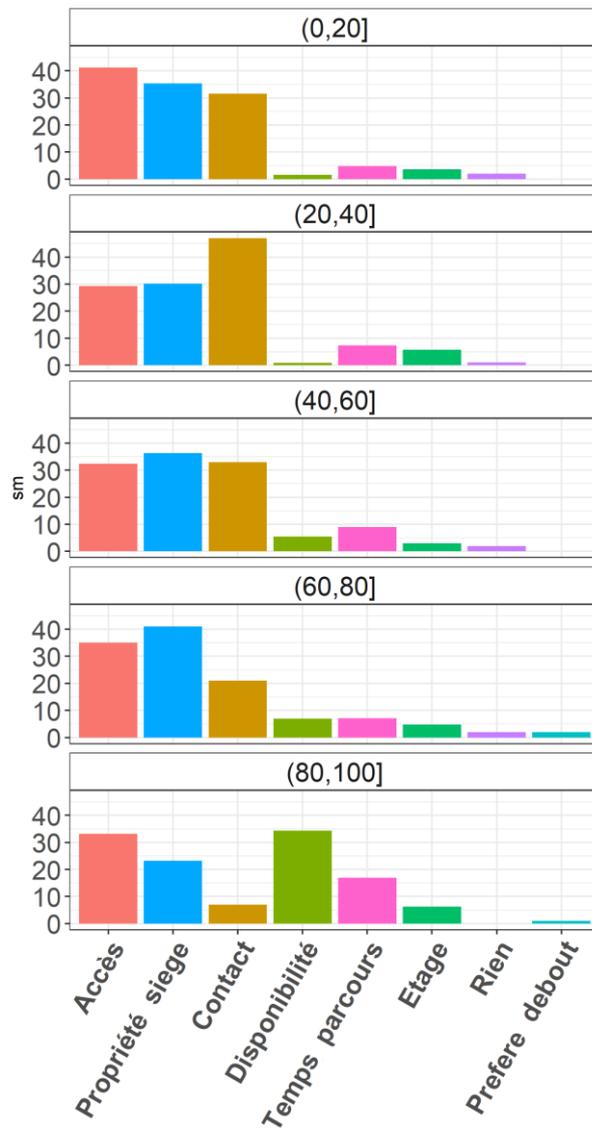


Figure 94. Motivations de positionnement dans le train selon les taux de remplissage

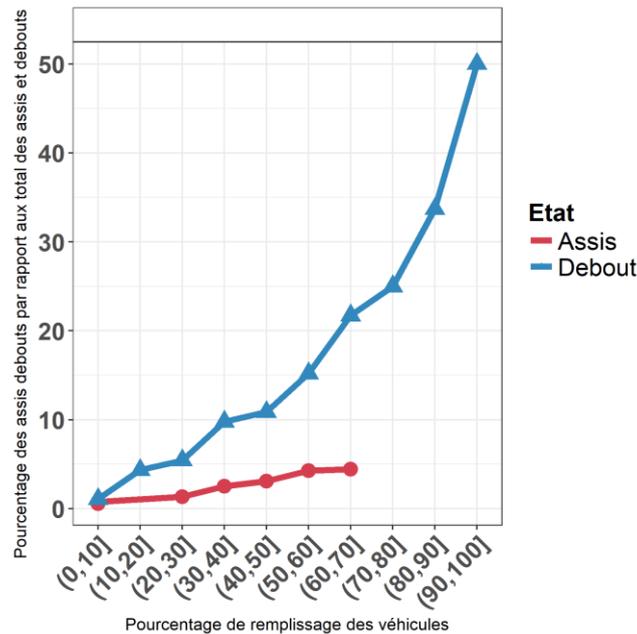


Figure 95. Assis et debout qui rapporte le caractère court du temps de trajet influant sur leurs choix

Par rapport aux motivations liées au caractère court du temps de trajet, on rapporte un effet significatif du « *taux de remplissage* » ( $\chi^2(9)=18.13$ ,  $p<0.05$ ) et un effet significatif de l'« *état* » ( $\chi^2(1)=83$ ,  $p<0.001$ ). Le post-hoc contrastant les niveaux de remplissage (0,20] - (80,100] est significatif ( $p<0.01$ ) et associe une pente négative. Cela signifie que pour des niveaux de remplissage bas, il y a moins d'argument faisant intervenir le « *temps de trajet* ».

Le post-hoc pour « *état* » contrastant les « *assis* » et « *debout* » est significatif ( $p<0.001$ ) et associe une pente négative. Cela veut dire que les « *debout* » ont plus tendance à argumenter leur choix en fonction du temps de trajet (Figure 95).

Pour les « *assis* », l'argumentation est souvent associée à l'expression de la proximité de la place par rapport aux portes (54%) et à une diminution franche de « *l'effort* » (Figure 96).

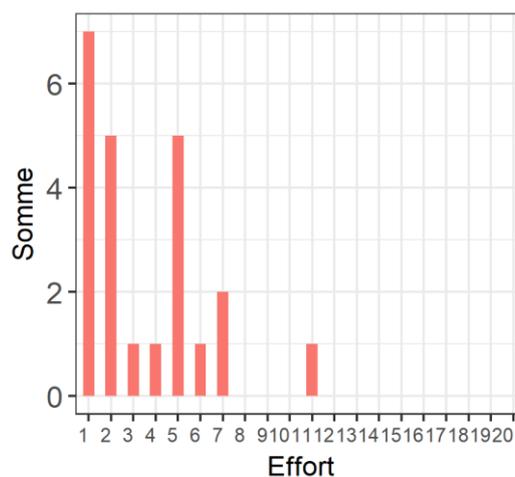


Figure 96. Choix de rangée pour les usagers « assis » argumentant leur choix en fonction du temps de trajet court

D'un point de vue quantitatif, nous avons relevé précédemment deux effets : celui du temps de trajet court associé à la prise de place de type « *couloir* » (Figure 83 - *Comportement des assis - Positionnement par rapport au type de siège*) et celui de l'effort minimisé pour des temps de trajet courts.

Nous testons l'expression de la motivation selon le « *temps de trajet* » de chaque usager. On rapporte un effet significatif pour « *temps de trajet* » ( $\chi^2(3)=20.7$ ,  $p<0.001$ ). Le post-hoc contrastant les durées 5 et 10 min par rapport à 20 et 35 min est significatif ( $p<0.05$ ) et associé à une pente positive. Cela veut dire que pour les temps de trajet court, les usagers ont plus tendance à argumenter leur choix en fonction du temps de trajet court. Nous rapportons aussi un contraste pour les intervalles (0,20] et (80,100] pour la durée de 5 minutes. Le post-hoc est significatif ( $p<0.05$ ) associé à une pente négative. Cela veut dire que pour les intervalles les plus libres, l'expression sur le caractère court du temps de trajet (5 minutes) est plus exprimée à des niveaux plus haut de remplissage. Ceci suggère deux choses ; selon la variable « *temps de trajet* », cette dernière peut inciter ou dissuader à la recherche de place assise, mais le fait de l'exprimer plus quand le train est plus rempli, peut suggérer un effet de dissonance cognitive [FES 57], les individus ajusteraient a posteriori leurs opinions, croyances et idéologies au comportement qu'ils viennent de réaliser. On peut formuler cela ainsi : si ces personnes qui ont choisi de rester debout car ils estiment que le temps de trajet est court dans un contexte dense, se seraient retrouvés dans un taux de remplissage bas, ils seraient assis et ne se prononceraient pas sur le temps de trajet. Bien entendu, nous ne pourrions pas tester les mêmes personnes mais nous testons des populations de niveau de densité différente. Ce qui nous pousse à réaliser un post hoc contrastant les trois paramètres : *Niveau de remplissage*, *Temps de trajet* (court, long ; les 5 et 10 minutes ont été classés en tant que durées *Courtes* alors que les 20 et 30 minutes sont classés en tant que durées *Longues*), État (*Assis*, *Debout*) :

- (0,20], *Court*, *Assis* Versus (80,100], *Court*, *Debout* : le test est significatif ( $p<0.001$ ), est associé à une pente négative, ce qui veut dire que pour les « *debout* » de même temps de trajet (5-10 minutes) et avec des fortes densités, il y a nettement plus d'argument sur le temps de trajet (rationalisation).

- (0,20], *Court*, *Debout* Versus (80,100], *Court*, *Assis* : le test est significatif ( $p<0.01$ ) est associé à une pente positive, cela signifie que pour le premier groupe cette décision est bien choisie par rapport à sa propre motivation et non liée à des comportements d'adaptation.

- (0,20], *Court*, *Debout* Versus (80,100], *Court*, *Debout* : le test n'est pas significatif ( $p=1$ ). En partant avec ce qui a été constaté, on peut émettre l'hypothèse qu'il n'y a pas de différence significative sur l'argument temps de trajets entre les deux contextes « peu dense » et « dense », car la motivation est présente dans les deux contextes mais pour des raisons différentes : dans le contexte « peu dense » il s'agit d'une motivation de type intrinsèque alors que dans le contexte « dense » il s'agit d'une stratégie d'adaptation au contexte.

La littérature rapporte des stratégies émergentes que la personne instaure afin de s'adapter au stress (*coping*) [LAZ 84] (Section 2. Le stress) : pour rappel, (i) l'adaptation centrée sur le problème : similaire à la résolution de problèmes. Il s'agit généralement d'identifier le problème, envisager les solutions possibles, d'évaluer les coûts et les avantages de ces solutions, puis à

choisir une solution de rechange [LAZ 84], et (ii) l'adaptation centrée sur l'émotion : implique des efforts pour changer ou réduire les émotions négatives associées au stress. Cela inclut l'évitement du problème et relativiser en cherchant des côtés positifs.

Dans ce contexte, tant que l'adaptation centrée sur le problème n'est pas possible, il y a une adaptation centrée sur l'émotion (i.e. « *peu de place disponible mais de toute manière j'ai un temps court de trajet donc je reste debout* ». Verbatim d'un voyageur).

Ceci nous oriente vers un autre point : l'expression des motivations est bien plus diversifiée et les exigences des voyageurs sont plus pointues quand le contexte permet un large choix (type de siège, étage, sens de la marche, proximité des portes). Cette exigence semble être plus restreinte dans des contextes denses et se rapportent majoritairement à trouver une place assise si possible.

Le récapitulatif des motivations exprimées par rapport au taux de remplissage, états, temps de trajet et étage est présenté dans le Tableau Annexe 15.

### **Motivations microscopiques de positionnement par rapport aux taux de remplissage**

Nous allons investiguer microscopiquement, les 3 critères macroscopiques les plus fréquents présentés (Figure 97) soit : « *Accès* », « *Propriété siège* » et « *Contact* ».

Pour « *Accès* », nous rapportons 4 qualifications (cf. Figure 96), majoritairement qualifié par « *Sortie* », cela peut montrer une certaine projection et anticipation vis à vis de la descente. De ce fait, le positionnement selon la proximité semble apporter un double bénéfice (s'installer le plus rapidement et avec moins d'effort et sortir le plus rapidement et avec moins d'effort).

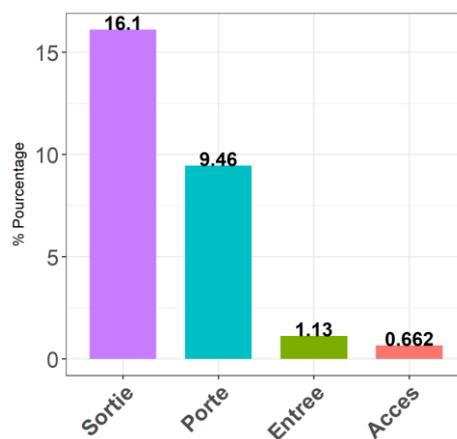


Figure 97. Les termes utilisés pour désigner les accès

Pour « *Propriété siège* », nous rapportons une préférence nette de « *Fenêtre* » par rapport à « *Couloir* ». Le nombre diminué des « *Solo* » vient du fait que ces sièges sont rares. Aucune motivation ne rapporte le type « *milieu* ».

Nous rapportons des motivations exprimées à divers niveaux de précisions, exemple :

- Exemple 1 : « J'ai choisi cet emplacement car c'est côté couloir »
- Exemple 1 plus développé : « J'ai choisi côté couloir car je peux sortir rapidement »

- Exemple 2 : « J'ai choisi ce siège car c'est côté fenêtre »
- Exemple 2 plus développé : « J'ai choisi côté fenêtre pour ne pas être gêné ou pour me poser contre la fenêtre ».

De ce fait, les participants ont, par moment, fourni des liens de cause à effets plus argumentés que d'autres.

Le « *sens de la marche* » apparaît aussi comme étant une motivation majoritairement permettant de remédier aux maux des transports (cf. Figure 98). Plus rarement, certaines personnes souhaitent se positionner à l'inverse du sens de la marche afin d'atténuer les effets du freinage.

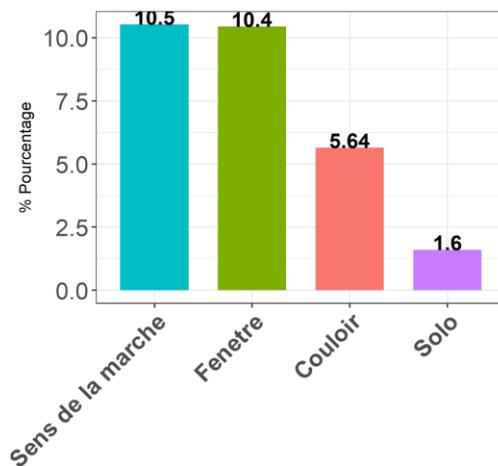


Figure 98. Critères de choix selon les propriétés des sièges assis

Pour « *Contact* », le « *Vis-A-Vis* » est légèrement mieux supporté que la « *Juxtaposition* », certaines personnes s'expriment par rapport au contact en général sans spécifier le type (Figure 99).

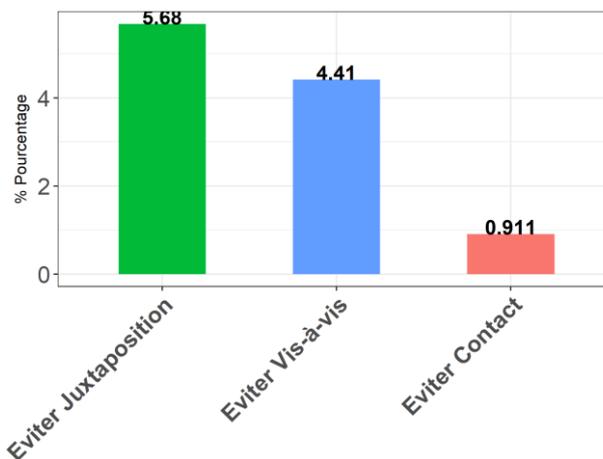


Figure 99. Critères de choix de sièges assis selon ce que cela engendre en termes de contact

### 5.2.2.2.3.1 Discussion

Nos résultats concernant les choix de positionnement dans le train selon les propriétés d'un siège concordent avec les constatations de Berkovich et al. [BER 13]. Cette étude rapporte également une préférence pour les sièges à côté des fenêtres, puis côté couloir et enfin ceux du milieu. Nous constatons les faits relatés dans la littérature : les sièges du milieu sont très mal acceptés [SAW

09] [BAG 96]. Pour ce qui est du sens de la marche, tout comme les auteurs de cette étude, nous constatons une préférence presque égale des sièges en contre-sens de la marche et dans le sens de la marche.

Néanmoins, les auteurs rapportent un effet d'inversement de préférence vers les niveaux de remplissage des sièges (80,100] qui bascule de « Fenêtre » vers « Couloir » (Figure 100). Les auteurs proposent la facilité d'accès comme facteur influant sur ce choix.

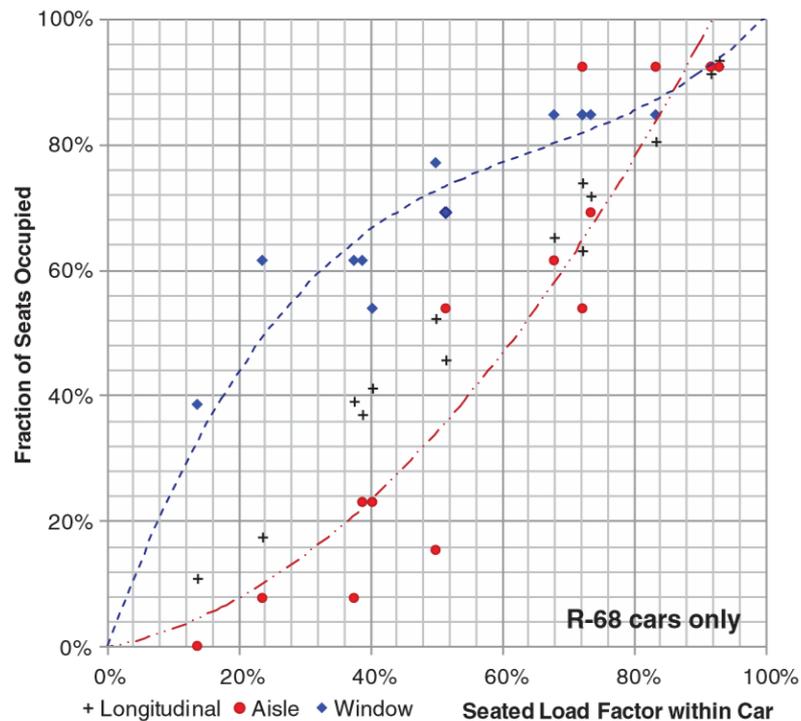


Figure 100. Inversement des préférences pour les niveaux de remplissage des sièges (80,100] qui bascule de « Fenêtre » vers « Couloir »

Notre test post-hoc sur la préférence contrastant des niveaux de remplissage de (0,10] - (90,100] associe une pente négative, mais cela ne nous permet pas de faire des conclusions sur l'inversement des préférences, car il y a aussi un effet franc de restriction du contexte (baisse des sièges « Fenêtre » disponible). Néanmoins, nos analyses dans la partie « Les enchaînements de choix – étude des remplissages des carrés : remplissage 3 » évoque la question de la difficulté d'accès et nous avons quantifié plusieurs scénarios afin de faire une analyse quantitative qui émet aussi l'hypothèse d'un possible effet de l'accessibilité des places.

Nous obtenons un très léger effet, pour une voiture, d'inversement de préférence (Figure 101).

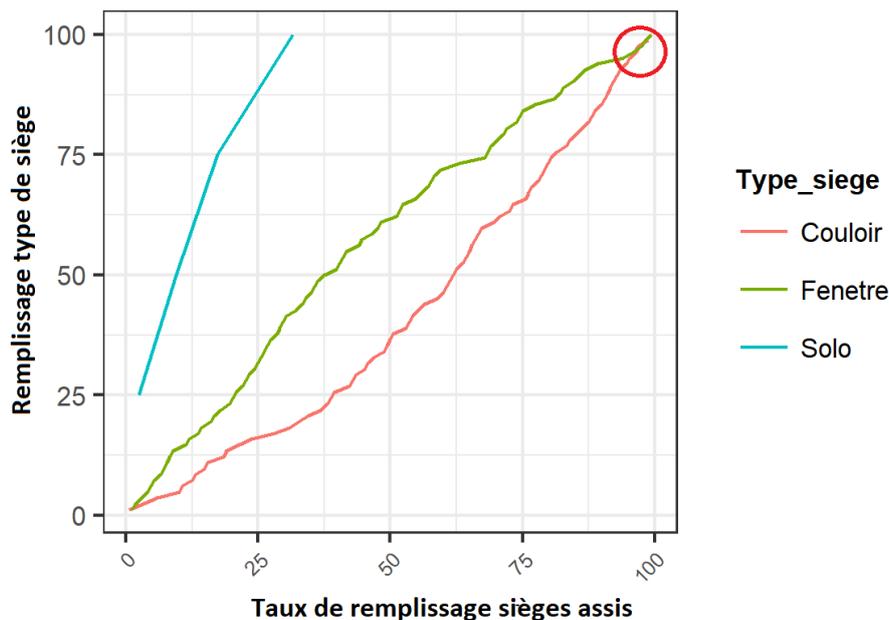


Figure 101. Très léger effet d'inversement des préférences pour la ZRAB- Z20900

Nous évoquons dans ce contexte une des limites de notre méthode de recueil : nous avons représenté le plan de chaque voiture étudiée dans une page web. Malgré des effets significatifs très cohérents, nous avons conscience que cette méthode virtuelle peut minimiser l'estimation de l'effort (distance à parcourir, accès aux sièges, etc.), et d'autres variables comme l'interaction sociale avec les personnes présentes (expressions faciales, ambiance, personnes bruyantes, allure des personnes, etc.), du type de déplacement (solo ou groupe) ou d'autres variables relatives à la météo (se rapprocher des portes pour avoir de l'air frais s'il fait chaud ou s'en éloigner s'il fait froid) et bien d'autres (odeurs, luminosité, etc.).

L'outil de simulation est un produit de ce travail mais nous pourrions envisager, dans le futur, une méthode d'expérimentation en réalité virtuelle par exemple. Une fois que le modèle est valide (comportement de navigation, évitement, préférence, etc.), cela peut permettre d'affiner les connaissances sur les préférences à l'intérieur du train.

Par ailleurs, ce cas d'étude dans le train, réunissant évolution entre contexte « libre » vers contexte « restreint » permet d'apprécier des comportements d'adaptation rapide face à cette évolution et de classer, en termes de priorité, ce qui importe le plus aux yeux des usagers.

Sur la restriction des choix, la littérature rapporte des attitudes d'impédance et la création de nouvelles motivations [BOT 08]. Les auteurs distinguent entre des restrictions internes (i.e. valeurs personnelles) et externes (i.e. architecture, disponibilités) ce qui peut rejoindre les notions des motivations intrinsèques et extrinsèques [DEC 85]. De plus, une personne peut anticiper la survenue d'une restriction (i.e. *je me mets côté « Fenêtre » pour garantir mon calme et éviter de me décaler si je prends la place « Couloir »*) ou sa suppression (i.e. *il y a une majorité de personnes qui descendent de cette voiture dans 2 arrêts, c'est pour cela que je choisis cette voiture*).

### 5.2.3 Expérimentations III : Phase Quai-Train. Enregistrement vidéo des passages quai-train

Dans ce qui suit, nous présentons une série de mesures et d'observations en vue de comprendre les comportements des usagers lors des échanges quai-train.

#### 5.2.3.1 Problématique et hypothèses

***Problématique.*** Le temps d'arrêt d'un train est défini comme étant le temps d'immobilisation du train à quai.

Ce temps englobe, (i) le temps d'ouverture et de fermeture des portes (ii) le temps d'échange (ii) et une durée  $t$  qui sépare la fin de l'échange de la décision pour la fermeture des portes.

- (i) Le temps d'ouverture et de fermeture des portes dépend presque exclusivement des contraintes matérielles qui définissent la vitesse d'ouverture et de fermeture des portes. Hormis les opérations de blocage de porte, qui sont des comportements humains, qui ne seront pas étudiés dans la présente étude.
- (ii) Le temps d'échange englobe, le temps de descente, le temps de montée et un possible temps de flux mixte réunissant des montées et des descentes simultanées.
- (iii) La durée  $t$  qui sépare la fin de l'échange est liée à des facteurs techniques (i.e. ouverture du signal, achèvement du temps théorique) et humains (i.e. prise de décision pour fermer les portes). Concernant le comportement du conducteur, la décision de la fermeture des portes tient compte de facteurs humains et techniques à la fois. Le conducteur vérifie avec précaution l'arrêt des flux de personnes, et synchronise ses actions, en même temps, au temps théorique d'arrêt qui lui est alloué et à l'ouverture du signal pour pouvoir circuler. Il tient aussi compte, implicitement, du délai mis par la fermeture des portes ( $\sim 5s$ ). Ainsi, il peut par moment enclencher la fermeture des portes juste avant l'arrêt de flux de montée. Il se base sur la prédiction que 5 secondes sont suffisantes pour la fin des flux. Dans le cas contraire, il est toujours possible d'annuler la fermeture en réenclenchant un autre cycle ouverture-fermeture. L'aspect technique ne sera pas étudié dans la présente étude.

Cette étude se centre sur une composante cruciale du temps d'arrêt et qui relève le plus de comportements humains : les temps d'échanges. Nous allons essayer par la présente étude de comprendre les facteurs comportementaux (ou réactionnels) qui font varier ces temps d'échange.

Les échanges quai-train se déroulent dans un cadre spatio-temporel très restreint :

- spatial : l'interface quai-train créée par l'union entre le quai et le train ;
- temporel : dans notre cas 70 secondes pour la période de pointe à BFM, sauf si retard au départ du train.

Ceci rend l'étude de ces comportements très difficile et impossible à travers des méthodes d'auto-confrontation des motivations. Dans cette phase, il y a entre usagers, proximité physique, contact, inconfort, voir concurrence pour atteindre le train ou en descendre.

**Hypothèse.** Hormis les stratégies réactionnelles à l'inconfort occasionné par l'écoulement des flux, le processus d'échanges quai-train est en grande partie résultant des préférences des voyageurs : (i) sur le quai (ii) et dans le train. Ces préférences engendrent, des charges différentes de personnes (montantes et descendantes) par porte. Ces charges différentes impliquent des variabilités dans les temps d'échanges.

### 5.2.3.2 Méthode

#### **Participants**

Les personnes observées sont des usagers montants (144 personnes) et descendants (30 personnes) du RER C à la Gare BFM sur le quai EF.

#### **Matériel :**

Deux caméras go-pro (une par opérateur) embarquées dans un sac à dos. Il nous a fallu pratiquer une ouverture dans la poche externe des sacs pour pouvoir filmer et penser à la manière de fixer les caméras, stabilisées grâce à une éponge en mousse et du gaffeur. Ce dispositif (Figure 102) avait pour objectif la discrétion afin de ne pas influencer les voyageurs, troubler l'échange et donc biaiser l'étude. Les deux opérateurs sont munis de Smartphone et d'application *Gopro* permettant la visualisation en direct de la scène filmée, pour des ajustements éventuels de postures ou d'angles. Ils disposent également de batteries externes pour l'éventuel rechargement des caméras dont l'autonomie se tient sur une heure et demie environ. Cette expérimentation a été conduite avec l'accord du CNIL (*Comité Nationale Informatique et Liberté*) avec un suivi minutieux des instructions reçues.



Figure 102. Dispositif d'enregistrement vidéo aux interfaces quai-train

#### **Procédure :**

Cette phase a pour objectif de relever des comportements-type aux interfaces quai-train lors des échanges et ce, pendant l'arrêt du train. Le recueil de données s'est déroulé du 15 Juin jusqu'au 06 Juillet 2017. Les prises de vues ont été réalisées entre 17h et 20h.

Le recueil nécessitait deux opérateurs sur le terrain : l'un sur le quai et l'autre dans le train. L'opérateur qui était sur le quai devait filmer l'échange à l'extérieur du train tandis que

simultanément l'opérateur qui était dans le train (qui arrive de la gare qui précède BFM) filmait l'échange, en vis à vis avec l'opérateur quai, à l'intérieur du train (Figure 103). Cet enregistrement synchrone permettait d'obtenir une prise de vue plus complète de l'échange : ce qui échappait à l'un des opérateurs était pris par l'autre. En ce qui concerne l'analyse vidéo, ce type de prise permet de minimiser les biais d'attribution lors de l'analyse comportementale sur les vidéos [LAS 86].



Figure 103. Exemple de prise de vue fournie par l'opérateur situé dans le train : l'opérateur quai en train de filmer les événements des passages quai-train

### Recueil et traitement de données

Vu le nombre élevé de portes (16 portes au total), nous choisissons de caractériser ces portes selon les 4 paramètres d'influence (occupation quai, occupation train, montants et descendants) et de dégager les cas qui serviront d'étude. Dans le Tableau 15, les portes ont été évaluées selon leur différence avec la moyenne des valeurs de chaque paramètre (voir détail dans Tableau Annexe 6). Nous ne mentionnons pas le paramètre « *descendants* » car sa variabilité à BFM est négligeable (*minimum* 0 descendants et *maximum* 8 descendants, par porte).

Tableau 15. Sélection de cas des portes selon trois paramètres d'influence : Montants, occupation quai et train. En rouge, les cas doublons.

Porte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Densité train	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
Densité Quai	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Nombre montants	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

### 5.2.3.3 Résultats - Delta avant et après l'ouverture des portes

Due à la difficulté de recueil (synchronisation, condition climatique, etc.), nous disposons d'une dizaine de prises vidéo en simultané. Nous exposerons les résultats statistiques de ces échantillons tout en prenant en compte ce faible nombre de vidéo.

#### « Normes » contextuelles et comportements type

L'une des normes les plus connues est « *laisser descendre avant de monter* » : ainsi le flux montant se divise de part et d'autre des portes en général, afin de laisser descendre le flux des descendants. Idéalement, cette norme conduit à l'enchaînement de deux flux : descendants puis montants. Seulement, la non anticipation à la descente ou une montée tardive dans le train, peut créer des flux mixtes et générer des collisions et des interruptions de flux. Cela conduit à l'obtention, en plus, de flux mixtes (cf. Figure 104).

Cette norme, venant de la compagnie de transport, est favorisée par divers moyens (i.e. régulateur de flux, annonce sonore ou icône d'incitation, etc.). Le voyageur, sous le contrôle, parfois physique de cette autorité, suit la consigne et peut-être remarque-t-il le bénéfice de cette dernière (i.e. éviter les collisions). Dans ce cadre, il est attendu du voyageur qu'il joue son rôle social (modèle comportemental attendu de la personne dans ce contexte) [HAR 03] et en suivant la norme (comportement acceptable et approprié). Plus encore, il s'agit d'un script, qui est constitué par la connaissance de la séquence des événements attendus dans un contexte donné [SCH 77] (i.e. descente puis montée). Quand la règle s'instaure, le voyageur lui-même devient une autorité et exige le déroulement prévu (i.e. descendants en colère car les montants ne s'écartent pas pour les laisser descendre).

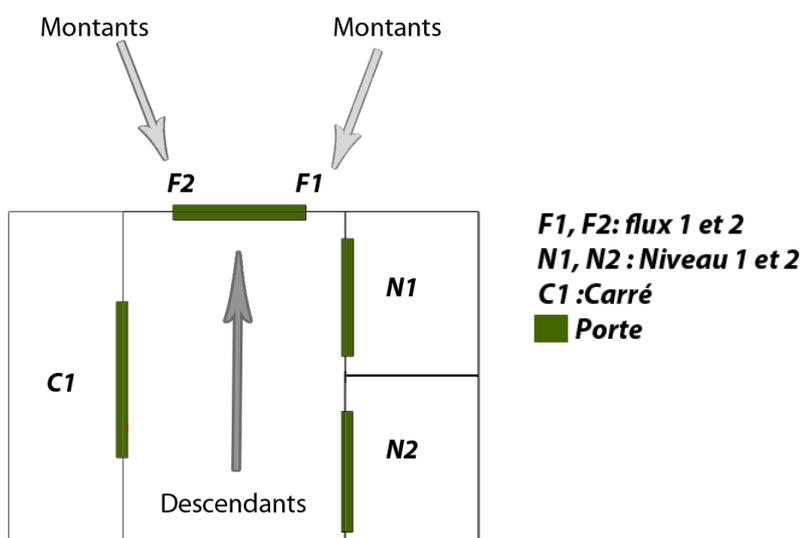


Figure 104. Normes contextuelles – Laisser descendre avant de monter

A partir de nos vidéos, nous avons dégagé quelques scénarios et paramètres qui entravent ou facilitent ce processus. Sur les 16 vidéos étudiées, nous relevons plusieurs comportements de montées et descentes.

### Comportements des montants

**Positionnement en « *V inversé* » des montants.** Pour 15 vidéos sur 16 montrent un positionnement typique (en V) dont l'intention montre clairement le fait de vouloir laisser passer les personnes descendantes. Pour la vidéo restante, cet aspect n'est pas clair car les quelques montants arrivent après l'ouverture de la porte d'une manière sporadique avec très peu de descentes (basse charge montants/descendants pour cette porte en tête de train).

**Régulation des déséquilibres quantitatifs entre file.** Quand une file est moins remplie que l'autre, il apparaît des comportements de « régulation » quantitatif. Cela suggère que le voyageur instaure ce comportement afin de monter le plus rapidement possible (Figure 105).



Figure 105. Régulation des déséquilibres quantitatifs entre files - Déplacement d'une personne du flux de droite (a) vers le flux de gauche (b)

Une analyse quantitative comptabilisant le nombre de « déplacements » d'une file à une autre, apparaît exclusivement au niveau des portes dont la charge est assez importante (ligne incluant des comportements de migration en rouge dans le Tableau 16 ci-dessous).

Tableau 16. Le nombre de déplacement d'une file à une autre et le sens des migrations

Porte	F1	F2	Somme montants	F1 vers F2	F2 vers F1
15	0	1	1	0	0
15	3	2	5	0	0
15	1	0	1	0	0
13	8	5	13	0	0
13	4	3	7	0	0
9	4	16	20	0	7
8	3	2	5	0	0
6	7	10	17	0	5
5	19	11	30	2	0
3	15	7	22	3	0
2	9	9	18	0	0
1	5	0	5	0	0

On remarque que les déplacements entre les deux files (F1 et F2) sont liés à la charge de chaque file. Ainsi, une file chargée a plus tendance à provoquer un déplacement vers l'autre file (i.e. Porte 9, F1=4 et F2=16, on note un déplacement de 7 personnes de F2 vers F1).

Afin d'expliquer le déplacement de F1 vers F2, une équation de régression a été calculée et elle est significative ( $F(2,9) = 27.56$ ,  $p < 0.001$ ) avec un  $R^2 = 0.86$ . Ce modèle associe le nombre de montants, le nombre de flux de préférence. La valeur de la durée de montée peut-être représentée par l'équation suivante :

$$(f1.vers.f2 - f2.vers.f1) = 0.43 * F1 - 0.53 * F2$$

Et l'on remarque que les deux prédicteurs contribuent significativement au modèle ( $p < 0.001$ ).

Cela induit la question suivante : Pourquoi plus de F2 vers F1 que de F1 vers F2 ? Le lien de direction du déplacement est attribué à la file la plus chargée. De ce fait, on doit se demander : pourquoi une file F1 est plus chargée que F2 ou vice versa ? Ceci est lié à la provenance des flux et leurs directions qui chargent un côté plus qu'un autre (voir Figure 106).

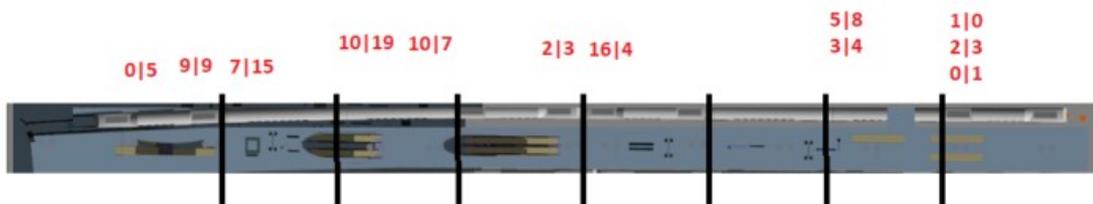


Figure 106. Déséquilibre quantitatif entre files – possible lien avec la provenance des flux conditionnée par la direction des escaliers

On peut extrapoler ce comportement de régulation de la charge et ceci entre les portes (i.e. migration entre la porte A et la porte B qui sont adjacentes), s'il reste assez de temps avant la fermeture des portes.

### Comportements des descendants

**Priorité à la descente.** Pour le scénario « Descentes puis Montées ». 15 vidéos sur 16 respectent le scénario Descente puis Montée. Pour la vidéo qui ne respecte pas cet enchaînement (cf. Figure 107), deux hypothèses : (1) le nombre de descentes est diminué : une seule, les montants sous-estiment les collisions et se bousculent vers le centre ou (2) la position de la personne qui s'apprête à descendre, n'est pas bien visible car éloignée de la porte et distraite par la recherche d'un objet, ce qui laisse entendre aucune descente. On peut retenir deux éléments : ce que les montants perçoivent de l'intérieur (pas de descente) et l'action de la personne qui va descendre (la non anticipation par distraction). Ainsi le non-respect de cet enchaînement trouve son origine dans le fait qu'ils se produisent avant l'ouverture des portes.



Figure 107. Non-respect de l'enchaînement Descente-Montée

**Non centrage de flux de descendants.** Il arrive que les descendants ne respectent pas le processus « descente » par le centre ; ce qui peut être problématique dans le sens où les côtés des portes sont occupés par les montants en attente (cf. Figure 108).

Hypothèses : (i) la personne veut descendre le plus rapidement possible en dépassant la file du centre ou (ii) la personne dispose d'une représentation spatiale des sorties et s'oriente en amont vers la sortie.



Figure 108. Descente latérale

#### 5.2.3.4 Résultats - Ouverture des portes : échange quai-train

##### Comportements des montants

**Direction des flux.** Il y a deux aspects qui conditionnent la direction des flux (i) leur provenance et leur pré-positionnement (cela permet d'estimer leur direction et les déséquilibres entre file) (ii) quand l'interface quai-train est franchie, les usagers doivent changer de direction selon le sens permettant d'atteindre l'intérieur du train. Pour un véhicule donné et un flux F donné de même position, il y aura toujours une porte A qui donnera un accès direct aux sièges assis et une porte B qui requiert un retour en arrière (cf. Figure 109 pour illustration).



Figure 109. Retour en arrière des flux afin d'atteindre l'intérieur du train

Dans notre cas si les flux diffusent des premières zones vers la zone 12, les portes paires seront plus facile d'accès ; c'est-à-dire sans retour en arrière (porte 16 – 14 ... 2).

**Diffusion des flux – deux modes.** Lorsque les usagers sont positionnés devant la porte pour la montée, on peut distinguer deux comportements : en premier lieu monter à bord du train, puis une fois l'interface franchie se diriger vers la portion du train selon deux paramètres en concurrence : l'« aisance » du déplacement, la « préférence » de l'utilisateur. L'aisance traduit la facilité de l'accès. Elle peut concorder avec la « préférence » des voyageurs à l'intérieur du train (Voir Section 4 Expérimentations I.3, préférences et choix d'emplacement dans le train).

Dans la Figure 110 est représentée N1 et N2 traduisant l'étage Niveau 1 et Niveau 2 ; C1 : faisant référence au carré à côté des entrées, et F1 F2 représentant deux flux simultanés entrant par une même porte. En partant du principe de l'aisance des parcours des montants, les flux auront l'allure décrite par le Scénario 1. Ce scénario illustre un cas d'entrées simultanées des flux tout en évitant tout croisement entre flux. Ainsi, les combinaisons optimales seront (f1-n1) ; (f2-n2) ; (f2-c1).

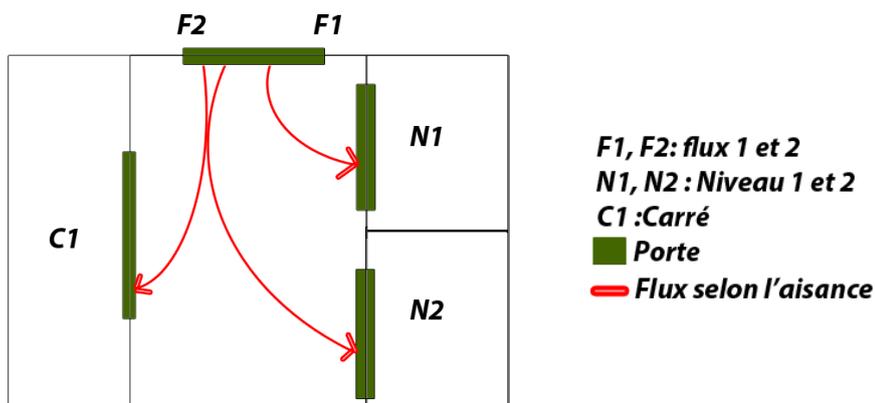


Figure 110. Scénario 1 : Trajet des flux selon l'aisance

Seuls les objectifs et les préférences des usagers interviennent dans leurs trajectoires (préférence vers n1 plus que n2 comme préférence vers le haut plus que le bas, etc.). Ainsi, les combinaisons seront : (f1-n2) ; (f2-n1) ; (f1-c1) (Figure 111)

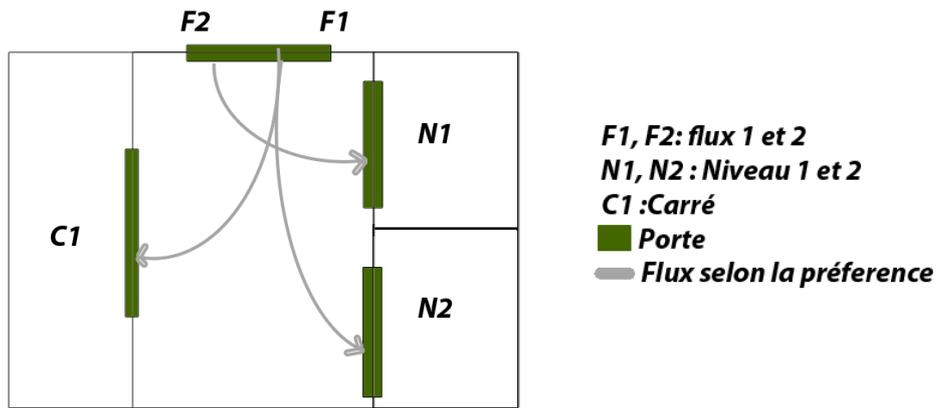


Figure 111. Scénario 2 : Trajet des flux selon la préférence (gris)

En somme, les trajets selon l'aisance et les préférences peuvent créer des croisements et des collisions entre les personnes (voir le Scénario 3, Figure 112). En effet, l'introduction de motivations personnelles de positionnement dans la portion de train implique plusieurs croisements et ralentissements entre les de flux (f1-n2) ; (f2-n2) et plus compliqué encore (f1-c1).

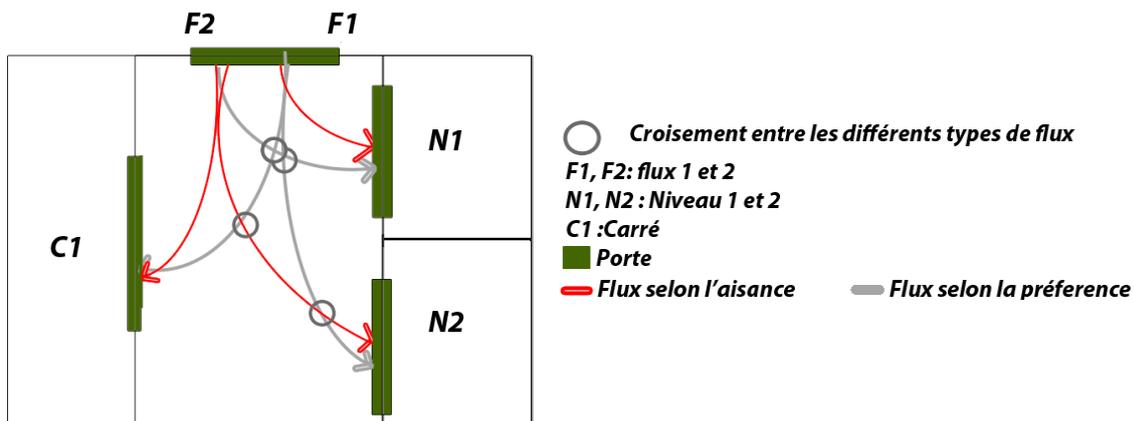


Figure 112. Scénario 3 : Trajet des flux selon l'aisance (rouge) + préférences (gris)

La question à laquelle on souhaite répondre est la suivante: les circulations reflètent-elles des adaptations à l'architecture du contexte (*aisance*) ou une volonté dépendante de certaines motivations (*préférences*) ?

A travers les vidéos, nous avons procédé à un comptage des circulations (de type « *aisance* » (f1-n1), (f2-n2), (f2-c1) en vert, et « *préférence* » (f1-n2), (f2-n2) et (f1-c1) en rouge, cf. Tableau 17). Les vidéos ont été sélectionnées selon leur architecture interne en fonction du positionnement de l'escalier, latéral et non central (comportement différent quand l'escalier est central).

Tableau 17. Comptage des circulations « *aisance* » et « *préférence* »

Porte	C-L	Config niveau	Flux d'aisance			Flux de préférence			Total	Nb croisement
			f1-n1	f2-n2	f2-c1	f1-n2	f1-c1	f2-n1		
13	L	N1=Bas	4	0	2	4	0	2	12	6
13	L	N1=Bas	10	2	4	4	0	1	21	5
3	L	N1=Bas	8	5	1	3	0	6	23	9

5	L	N1=Haut	13	7	1	4	0	2	27	6
5	L	N1=Haut	4	7	0	3	0	2	16	5
3	L	N1=Haut	4	5	3	6	0	3	21	9
2	C	N1=Haut	5	0	1	6	0	3	15	9
		<b>Moyenne</b>	<b>7,33</b>	<b>4,33</b>	<b>1,66</b>	<b>4,33</b>	<b>0</b>	<b>2,83</b>		

L'analyse des directions des flux converge légèrement vers le scénario d'aisance (moyenne=13.32) que préférence (moyenne=7.16). Néanmoins, l'aisance peut être confondue avec la préférence et renforcée selon la disposition de l'intérieur du train à son arrivée à la station. Nous avons dégagé la préférence selon l'étage (5.2.2.1 Expérimentation II.1: Questionnaire B dans le train). Ainsi, nous notons la valeur de N1 et N2 (*Bas* ou *Haut*) pour chaque vidéo et les analysons séparément (Tableau 18)

Tableau 18. Comptage des circulations « aisance » et « préférence », par type de niveau

Porte	C-L	Config niveau	Flux d'aisance			Flux de préférence			Total	Nb croisement
			f1-n1	f2-n2	f2-c1	f1-n2	f1-c1	f2-n1		
13	L	N1=Bas	4	0	2	4	0	2	12	6
13	L	N1=Bas	10	2	4	4	0	1	21	5
3	L	N1=Bas	8	5	1	3	0	6	23	9
		<b>Moyenne</b>	<b>7,33</b>	<b>2,33</b>	<b>2,33</b>	<b>3,66</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>18,66</b>	
5	L	N1=Haut	13	7	1	4	0	2	27	6
5	L	N1=Haut	4	7	0	3	0	2	16	5
3	L	N1=Haut	4	5	3	6	0	3	21	9
2	C	N1=Haut	5	0	1	6	0	3	15	9
		<b>Moyenne</b>	<b>6,5</b>	<b>4,75</b>	<b>1,25</b>	<b>4,75</b>	<b>0</b>	<b>2,5</b>	<b>19,75</b>	

On compare les écarts entre ces derniers pour les configurations n1=Bas versus n1=Haut :

- Pour N1=Bas :  $f1;n1-f1;n2 = 3.33$  et  $f2;n2-f2;n1 = -0.66$
- Pour N1=Haut :  $f1;n1-f1;n2 = 1.75$  et  $f2;n2-f2;n1 = 1.75$

Pour la configuration N1=Bas, l'écart  $f1;n1-f1;n2$  est important  $f1;n1$  semble aisée et semble être plus favorisé par rapport au niveau bas. Puis pour  $f2;n2-f2;n1$  les écarts sont moins creusés, l'aisance se rattrape totalement dans le sens de la préférence vers N1=Bas (différence= -0.66).

Pour la configuration N1=Haut, pour  $f1;n1-f1;n2$ , en comparaison avec N1=Bas, l'écart est moins creusé et on peut voir un effet d'augmentation de  $(f1;n2)$  et de réduction de  $(f1;n1)$  avec une réduction de l'écart. Puis pour  $f2;n2-f2;n1$  ; les valeurs sont plus importantes que N1=Bas, ce qui montre que ces trajets sont renforcés (plus empruntés) par un possible effet de la préférence vers N2= Bas).

En résumé, ces résultats nous orientent vers un effet possible de la préférence du niveau bas avec des renforcements des « couloirs naturels » (pour N1=Bas) versus des « croisements des flux » (pour N2= Bas).

**Diffusion des flux – répercussion sur les temps de montée.** En vue d'étudier les répercussions de ces types de flux, nous mesurons les temps de montée (s) : mesure du premier montant – dernier montant d'un flux de montée continu. Le temps de montée a été mesuré, en notant si ce flux est « pur » ou mixte (descentes en retard). Une descente tardive peut être la source de coupure du flux de montée lorsque ce flux de montée est engagé. Par la suite, notre paramètre le plus important est de comptabiliser le nombre de montées, le nombre de flux type « *préférence* » et le temps mis pour monter.

En partant de l'hypothèse de l'existence d'une mauvaise diffusion des personnes vers les accès aux sièges (préférence explicitée dans les questionnaires train), le temps de montée totale sera prolongé car existence d'une attente de diffusion et exploitation des espaces dans le train.

La diffusion des personnes vers des parties inoccupées peut être impactée par la présence de personnes sur la plateforme (soit pour rester à côté des portes, soit par manque de place ailleurs). Nous avons donc comptabilisé, le nombre de personnes présentes sur la plateforme avant l'échange et après. Qualitativement, on note que l'accumulation des personnes sur la plateforme, dans les voitures étudiées, se produit à la fin des échanges. D'où un impact mineur sur les circulations des personnes à l'intérieur du train durant l'échange.

Nous sommes dans un contexte dense mais qui permet tout de même la circulation de personnes dans le train. Un niveau de densité même légèrement élevé (dizaine de personnes en plus : majorité de places prises – rester sur les plateformes) peut changer ce qui est observé (cf. Tableau 19).

Tableau 19. Mesure des temps de montée et le nombre de flux selon la préférence

<b>P</b>	<b>Config niveau</b>	<b>nb flux préférence</b>	<b>temps montée (s)</b>	<b>Nb montants</b>	<b>temps/ personnes</b>	<b>Flux mixte (descente tardive)</b>
13	N1=Bas	6	9	12	0,75	Oui
13	N1=Bas	7	22	27	0,81	Oui
3	N1=Bas	9	26	28	0,93	Non
5	N1=Haut	6	24	34	0,70	Non
5	N1=Haut	8	24	25	0,96	Oui
3	N1=Haut	9	23	23	1	Oui
2	N1=Haut	9	22	20	1,1	Non

Afin d'expliquer le temps de montée, une équation de régression significative ( $F(2,4) = 109$ ,  $p < 0.001$ ), et un  $R^2 = 0.98$  sont calculés. Ce modèle associe le nombre de montants, le nombre de flux de préférence. La valeur de temps de montée ( $T_m$ ) peut être représentée par l'équation suivante :

$$T_m = -12.1329 + 2.25 * (\text{nombre flux de préférence}) + 0.67 (\text{total montants})$$

Le temps de montée augmente de 2.2 secondes pour chaque flux de préférence additionnel et de 0.67 pour chaque montant de plus. On remarque que les deux prédicteurs sont significatifs, le nombre de montants, le nombre de flux de préférence contribuent significativement au modèle ( $p < 0.01$ ) cf. Figure 113.

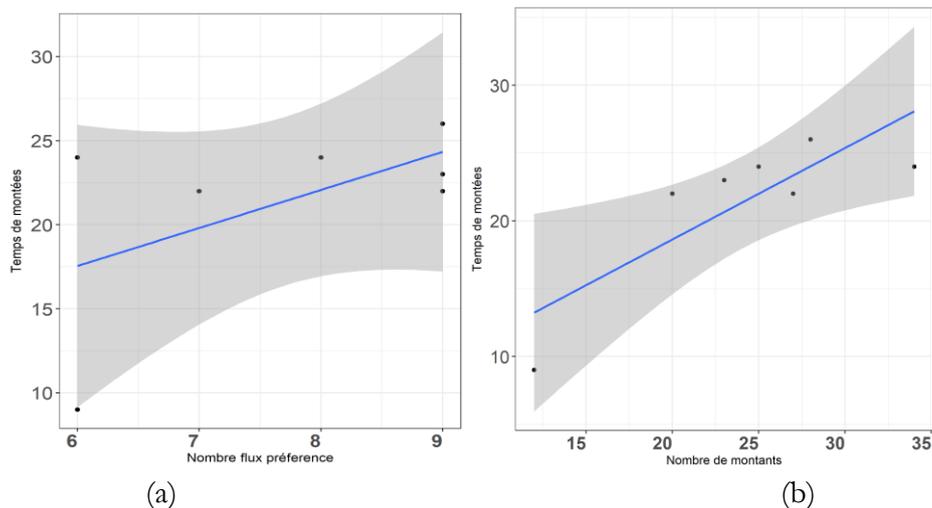


Figure 113. Variation du temps de montée en fonction de (a) nombre de préférence (b) nombre de montants

**Explorateur train.** L’exploration que font les voyageurs à l’intérieur du train leur sert à rechercher des places assises en prenant en compte les préférences d’installation dans le train. La personne abandonne certains critères en fonction du contexte. Les quelques secondes d’hésitation et de réflexion peuvent être problématiques car l’hésitation entrave la circulation du flux. Par exemple, nous rapportons un changement d’étage d’une personne engagée dans la montée vers le haut. Cette personne ayant remarqué la disponibilité d’un siège en bas, elle change d’itinéraire vers sa préférence, causant ainsi une irritabilité des personnes en attente derrière elle.

Les analyses statistiques ne montrent pas d’effet significatif du nombre de « *explorateur train* » sur le temps d’échange ( $p > 0.05$ ).

### Comportements des descendants

**Explorateur quai.** En général, à leurs descentes, les usagers ne disposent pas d’une représentation spatiale des sorties (i.e. du au changement de voie, sauf si la personne a pu repérer le quai lors de la décélération du train). Cela engendre des comportements d’exploration quai pouvant être problématiques si le flux descendant est important. En effet, la mauvaise diffusion des descendants sur le quai peut retarder la fin du flux descendants et perturber les montants (i.e. attente longue, peur de rater le train). Les analyses statistiques ne montrent pas d’effet significatif du nombre de « *explorateur quai* » sur le temps d’échange ( $p > 0.05$ ).

### Flux mixtes

Un flux de descentes inachevé peut créer des coupures dans l’écoulement des flux et l’apparition de réactions qu’on peut qualifier d’auto-organisation face au stress lié à la motivation principale : attraper son train. Par exemple, nous rapportons sur une vidéo, un dysfonctionnement lié à un bagage volumineux, les flux reprennent alors d’un côté tandis que l’autre côté reste « condamné » par la situation (bagage) et ce qu’elle engendre (comportement d’entraide).

### 5.2.3.5 Discussion

Nous décrivons les constats tel que suit : il y a une tendance selon laquelle il existe des préférences des entrées sur le quai. Les flux provenant des entrées alimentent les portes qui sont à côté pour deux cas de figures : les usagers de motivations « *Entrée* » et à l'arrivée du train, quand les usagers n'ont pas le temps de choisir leur emplacement sur le quai.

Ces proximités des entrées provoquent des flux de « *montée* » dispersés qu'on a qualifié de sporadiques. Ces flux apparaissent à un rythme entrecoupé et moins prévisible et peuvent démontrer des comportements de précipitation pour attraper le train. Ce qui peut être une source d'hésitation du conducteur vis-à-vis de la sécurité pour les usagers.

D'un point de vue statistique, nos analyses ne sont pas significatives sur l'effet de la proximité des entrées ( $p > 0.05$ ). D'un point de vue qualitatif, il y a par moment une augmentation des montées sporadiques pour les portes situées à côté des entrées. Cela semble dépendre d'autres facteurs externes comme l'arrivée des flux des autres lignes (i.e. métro, train). Cette variable se croise bien évidemment avec le type d'entrée (i.e. escalier ou escalateurs) qui ont des capacités différentes de flux. Par exemple, un escalateur fournit plus de personnes qu'un escalier pour la même durée. De plus, il y a aussi l'effet de préférence des entrées par type (i.e. escalateur plus confortable que l'escalier) ou par des stratégies de positionnement partiel sur le niveau supérieur ou inférieur qui permet des mouvements plus libres grâce à un espace plus grand.

Il y a aussi des phénomènes d'agglutination selon d'autres motivations comme « *Arrivée* ». Ces agglutinations augmentent la charge par porte.

Une augmentation du nombre de montants par porte prolonge naturellement le temps de montée.

Le temps de descente est moins problématique quand il y a respect de la descente puis la montée. Cette dernière est bien plus maîtrisée et limitée que le temps de montée et conditionne moins la décision du conducteur pour la fermeture des portes.

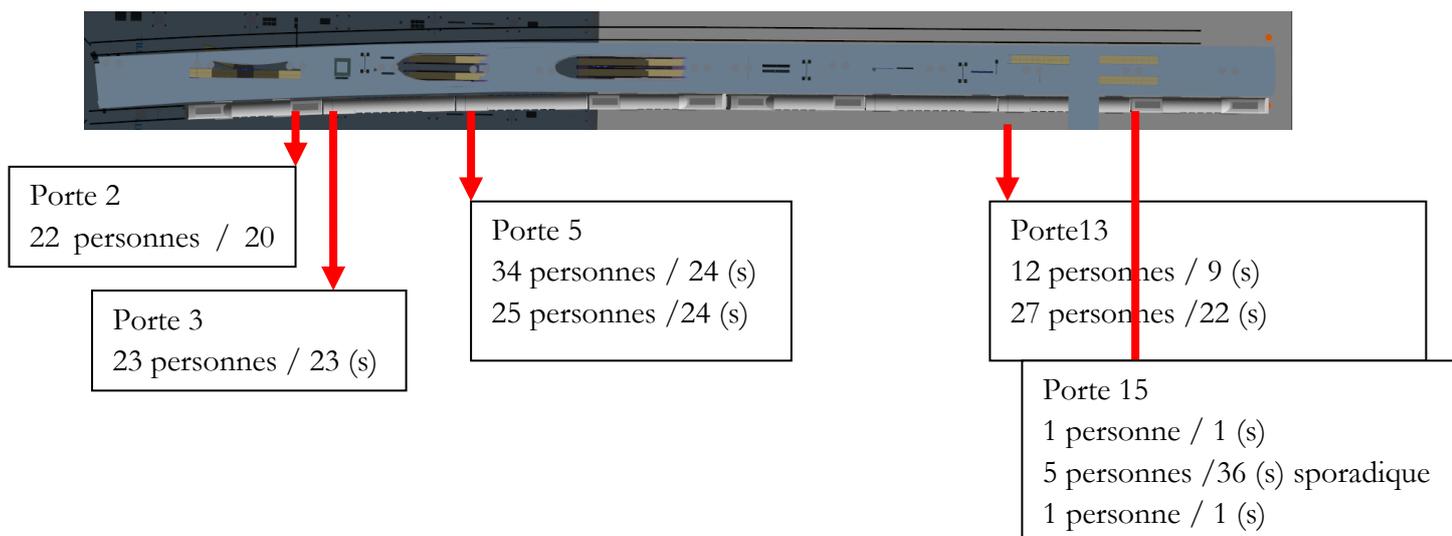


Figure 114. Positionnement du train par rapport au quai et quelques valeurs de nombre des montants et de temps de montée total

La présente étude nous a permis d'affiner la compréhension de la navigation à l'interface quai-train et de l'effet de la capacité des portes sur la vitesse de montée ainsi que les notions des flux « *continus* » et « *sporadiques* » liés à des mouvements tardifs (montées ou descentes). Ces mouvements tardifs peuvent être du tout simplement, à des retards, ou de l'hésitation (i.e. comportement d'exploration). Cela engendre des flux mixtes qui contribuent au prolongement des échanges quai-train.

**Quatrième partie**  
**Modélisation et simulation**

## 6 Modélisation et simulation

Notre approche privilégie une modélisation micro, multi-agents. Nous allons utiliser le simulateur SpirOps Crowd qu'utilise actuellement la SNCF, pour plusieurs simulations. Ce simulateur est un système multi-agents permettant de définir de nouveaux comportements ainsi que les motivations dont ils sont issus. Ce chapitre détaille le modèle retenu, en partant du modèle de piéton initial fourni par SpirOps jusqu'à notre modèle d'usager des trains.

Ce travail reprend les caractéristiques mises en lumière dans le chapitre précédent pour en tirer un modèle comportemental motivationnel exploitable. Ce modèle va être ensuite optimisé pour valider statistiquement les comportements observés à BFM.

Dans une seconde partie, nous étudierons le transfert de ce modèle sur une autre gare, la Gare du Nord. Nous détaillerons notamment les paramètres qui ont dû être modifiés pour enfin discuter du caractère de transférabilité de ce modèle.

# Chapitre 1

## 6.1 Extraction des règles à BFM et formalisation

### 6.1.1 Extraction

#### 6.1.1.1 Comptage aux entrées

L'architecture de la gare BFM est représentée dans la Figure 115 afin d'avoir une meilleure idée de la provenance des flux. D'une part, (i) la récupération de chiffres de validation aux CAB (tourniquets) nous ont permis d'estimer les valeurs des deux grands flux. D'autre part, (ii) une opération de comptage des répartitions entre les quais EF et AB a été faite pour estimer les parts dédiées à chaque quai, de 17h à 20h. Par la suite, des opérations de comptage sur chaque entrée du quai EF (Expérimentations I.2) ont été effectuées.

Nous avons procédé à un calcul qui réajuste le nombre total d'entrants sur le quai par rapport à la part dédiée au quai EF, fourni par les chiffres de validation. Cela a pour but de pouvoir travailler sur la même échelle des flux, en provenance des CAB.

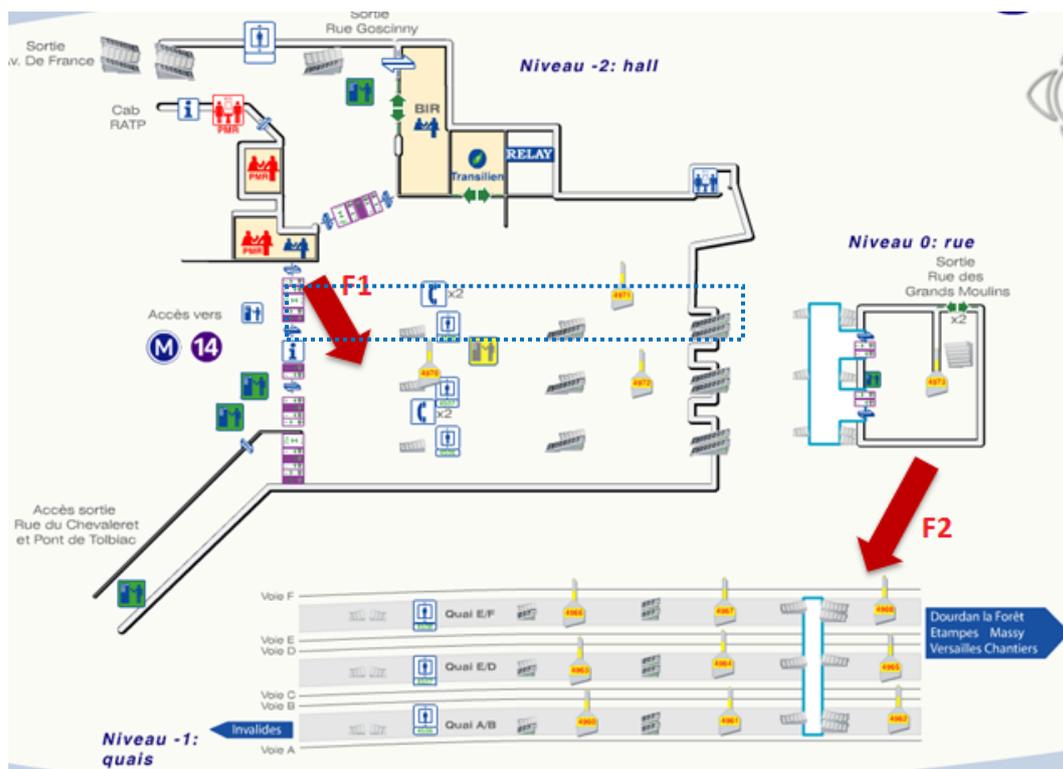


Figure 115. Provenances des flux du niveau -2 et 0 vers et le niveau -1 (quai). L'encadré en pointillés bleu correspond à peu près au quai EF en dessous.

Ainsi, la répartition des flux par entrée sur le quai n'est pas une répartition définie dans le simulateur en termes de pourcentages obtenus lors des opérations de comptages aux entrées. Il s'agit de flux de personnes provenant des tourniquets et qui empruntent leur chemin en fonction de plusieurs paramètres.

### 6.1.1.2 Matrice origines-destinations

Avec nos questionnaires, nous avons pu estimer le pourcentage de personnes qui descendent à BFM comme gare d'arrivée selon la gare de départ et le pourcentage de personnes qui montent à BFM comme gare de départ selon la gare d'arrivée. Ces informations sont importantes notamment à cause du positionnement sur le quai et dans le train. Ces informations sont regroupées dans une matrice origine/destination ayant pour paramètre la gare de descente pour les origines et de montée pour les destinations, ici BFM. Cette matrice contient ainsi la description en pourcentage des provenances / destinations des usagers de la gare BFM.

## 6.1.2 Formalisation

### 6.1.2.1 Motivations

#### 6.1.2.1.1 Le choix des « entrées »

Le choix des entrées a été calibré, par rapport à la gare BFM. SpirOps Crowd définit un graphe de navigation sur lequel les agents choisissent leur chemin, en fonction de leur motivation. Ainsi, une partie du choix de la position sur le quai se fait à l'étage inférieur.

Le graphe de navigation se base sur un graphe d'effort (i.e. la distance \* type de chemin ou d'arc) et de confort (i.e. éviter les endroits trop étroits). Dans cette perspective, les chemins du type plat sont moins énergivores que les escaliers. D'un autre côté, les escalateurs sont moins énergivores que les escaliers et le sens de la descente est moins énergivore que la montée. En fonction de ces éléments, SpirOps Crowd définit quelques comportements clés de la navigation verticale [CHE 98], c'est-à-dire, d'un étage vers un autre.

#### 6.1.2.1.2 La motivation « Arrivée »

Pour chaque destination pour laquelle ont été faites des mesures de sorties, les agents ayant la motivation « Arrivée » se positionnent dans ces zones et aux alentours selon une distribution normale ayant une étendue interquartile (éparpillement des données autour de la médiane) égale à 13 mètres.

Pour les destinations pour lesquelles aucune mesure des positions de sorties n'a été faite, les agents se distribuent uniformément d'une zone à une autre de telle manière à ne pas produire d'influence notable sur l'allure de la distribution « Arrivée ».

Cela a été démontré dans la Figure 73, le top dix des motivations « Arrivée » est représentatif à 60 % et à un coefficient de corrélation avec la distribution du total des motivations « Arrivée » à  $r=0.97$ .

#### 6.1.2.1.3 La motivation « Entrée »

Les agents ayant cette motivation se mettent aux alentours des zones par lesquelles ils sont entrés. La valeur de l'étendue interquartile est égale à 3 mètres.

#### 6.1.2.1.4 La motivation « Train »

Les agents se mettent dans des zones du quai qui correspondent aux véhicules les moins remplis du train. Ils disposent d'une connaissance au préalable de l'état d'occupation des voitures.

Notons que durant nos analyses statistiques, cette motivation n'a pas pu être validée par rapport à la réelle occupation du quai. Il apparaissait dans des analyses plus avancées une relation avec les montants, descendants et les occupants du quai. Il est difficile de comprendre avec les éléments dont on dispose car cela implique une connaissance des nombres de montants et de descendants par porte, à l'avance. Notons aussi que cette motivation est représentative de 7.5% de la population à BFM.

#### **6.1.2.1.5 La motivation « Moins de monde »**

Les agents ayant cette motivation sont hautement réactifs à la densité sur le quai, ils se mettent dans des endroits qui sont comparativement moins denses que les autres. Un calcul de densité est effectué par zone, par rapport à l'aire totale. Par la suite, les zones sont comparées entre elles en termes de niveau de densité. La valeur de l'étendue interquartile est égale à 60 mètres. En pratique, l'agent arrive sur le quai, via une fonction aléatoire qui définit l'étendue de son déplacement. Supposons une distance de 80 mètres, qui dépasse les valeurs de l'étendue interquartile mais figure dans la distribution gaussienne. L'agent explore le quai, depuis son lieu d'arrivée, jusqu'à 80 mètres en comparant les sections entre elles. Il dispose à ce niveau-là d'une omniscience sur cette distance lui permettant de sélectionner l'endroit le plus approprié.

#### **6.1.2.1.6 La motivation et les possibilités du contexte**

Les agents se déplacent selon des motivations bien spécifiques, mais sont contraints, par moment, d'explorer les possibilités du contexte afin de trouver de l'espace libre et de s'installer à proximité de la zone cible. On présente le concept de la position « *finale* » et de la position « *voulue* ». Ces positions ont plus tendance à se correspondre si la densité est moindre sur le quai. Autrement, il y a des comportements de « *décalage* » vers les autres zones.

Cette recherche de place libre fonctionne comme suit : l'agent est contraint de se déplacer de proche en proche, selon le sens de son arrivée sur le quai (i.e. direction escalier) et en amont de la zone cible initiale.

Actuellement, la recherche de place libre est assez simplifiée, l'agent regarde juste devant lui et n'explore pas le quai en largeur ou au niveau du centre. Cela peut entraîner des éloignements plus importants. Ceci constitue une des pistes d'amélioration du choix de positionnement selon la restriction du contexte.

#### **6.1.2.1.7 La perception de l'agent et sa connaissance des lieux**

Les agents de SpirOps Crowd disposent d'une pseudo-vision vis-à-vis des autres agents, grâce à un cône de vision. Pour cette simulation, nous avons considéré qu'ils étaient omniscients sur toutes les composantes des décors (i.e. escaliers, murs, etc.). A cet égard, les agents peuvent voir ce qu'il y a comme autres décors derrière un mur, mais n'ont pas de connaissance autre que ce que leur fournit leur cône de vision sur les personnages. Ainsi, ils ne connaissent pas la densité des personnes à l'avance. Ceci rejoint un côté très humain dans la prise de décision selon les autres personnes, comme par exemple dans la motivation « *moins de monde* » qui se traduit par un comportement progressif et comparatif de la situation actuelle.

En ce qui concerne l'omniscience des objets, actuellement, les agents ne saisissent pas le contenu de l'affichage d'une infogare.

#### 6.1.2.1.8 Comportement d'évitement

SpirOps Crowd prévoit déjà des comportements d'évitement de personnes. Ce comportement gère aussi bien l'évitement entre deux personnes qu'entre une (ou plusieurs) personne(s) et un amas de gens. Des améliorations ont été apportées pour que ces comportements gèrent d'une manière réaliste l'arrivée d'un amas de gens lors de l'échange quai-train (i.e. groupe de montants de descendants).

Par ailleurs, SpirOps Crowd gère aussi les comportements de groupe (i.e. famille, amis) mais qui ne sont pas pour le moment, les plus représentatifs de notre problématique (2% de groupe sur le total des questionnaires de BFM).

#### 6.1.2.1.9 Rattraper le train

Dans SpiOps Crowd, les agents qui simulent les passagers peuvent courir afin de prendre leur train à quai. En premier lieu, les agents ont une estimation de la durée de l'arrêt du train à quai ainsi que du temps restant. Ils sont omniscients sur le planning théorique du train et non le réel. Ils peuvent donc réajuster leur comportement selon ce qu'ils perçoivent du réel.

Ainsi, à l'approche du départ du train, les vitesses des agents augmentent. Ces comportements dépendent d'une notion de « *stress* » et de « *lazyness* ». Moins l'agent est « *lazy* », et plus le départ du train approche (effet du stress), plus l'agent va courir. Il existe un effet cumulatif entre les deux variables.

La notion « *d'abandon* » est aussi prise en compte, en fonction de l'état de l'agent et du temps restant, l'agent peut renoncer à courir pour rattraper le train.

#### 6.1.2.1.10 L'engagement dans un contexte spatial

Le fait de changer de contexte spatial (quai, train) est un comportement coûteux, car il est nourri par un engagement vers un objectif spécifique (i.e. partir dans le train vers une autre destination). De plus l'union quai-train est très courte en termes de temps (i.e. une minute). Ainsi, il n'est pas possible d'obtenir ou d'observer des comportements aberrants comme : « *Monter dans le train pour aller vers une autre portion du quai* » ou « *descendre du train vers le quai pour aller vers l'autre bout de la voiture et remonter dans le train* ».

#### 6.1.2.1.11 Règles de sécurité

Parmi les recommandations de sécurité faites par la société de transport SNCF « *Restez toujours éloigné de la bordure du quai* » est l'une des plus importantes. Ainsi les agents de SpirOps Crowd ne dépassent pas la bande podotactile et ne s'approchent de la bordure du quai que lors de l'arrivée du train afin de monter à bord.

Techniquement, les bordures de quai sont des zones non traversables hors arrivée du train, elles le deviennent une fois le train en arrivée (i.e. décélération, arrêt). Une fois le train arrivé, les agents se rapprochent de la bordure et du train, tout en continuant de s'éviter entre eux. Si le train continue à avancer, les agents perçoivent l'éloignement de la porte et essaieront encore de la rattraper.

#### 6.1.2.1.12 Confort et normes de politesse

D'un autre côté, pour des raisons de confort et de politesse, les agents de SpirOps Crowd ne se mettent pas dans des zones de transit (i.e. devant une entrée, un escalier, un escalateur, etc.).

Pour ce qui est de la norme « *laisser descendre avant de monter* », les agents se mettent des deux côtés des portes (position en V), par politesse et par peur de se bousculer.

Techniquement, un flux sortant hypothétique a été modélisé, de sorte à organiser les montants en V. Les agents n'évitent plus le flux à partir du moment où ils ne le perçoivent plus, en terme de vision. Si aucune descente n'est visible, le flux de montants s'engage. S'il y a une descente tardive, imperceptible, les agents engageront tout de même la montée car ils n'ont pas perçu cette descente.

#### 6.1.2.1.13 La proxémie

Le concept de la proxémie [HAL 66] a été introduit dans SpirOps Crowd. L'espace personnel est défini comme une zone invisible dans laquelle les autres personnes ne sont pas les bienvenues. Si quelqu'un pénètre dans son espace personnel, un piéton éprouve de l'inconfort et se déplace jusqu'à ce qu'il se trouve à une distance raisonnable de tous ses voisins. Cette zone est influencée par de nombreux paramètres tels que la densité autour du piéton, sa vitesse recherchée, ses relations avec ses voisins (relations sociales, familiarité, etc.), etc. Hall, [HAL 66] distingue quatre zones (voir la Figure 116) :

- a- la zone intime (de 0 à 45 cm) où la présence d'un autre piéton est très gênante,
- b- la zone personnelle (de 45 à 120 cm) est la distance que chaque individu essaie de respecter entre lui et un autre piéton (quel que soit son auteur),
- c- la zone sociale (de 120 à 360 cm) dans laquelle la présence est autorisée avec des conditions particulières (forte densité, connaissance du personnage, éviter un obstacle, situations sociales, etc.),
- d- la zone publique (360 cm et au-delà) où d'autres piétons sont vus mais ne sont pas pris en compte lors de la navigation.

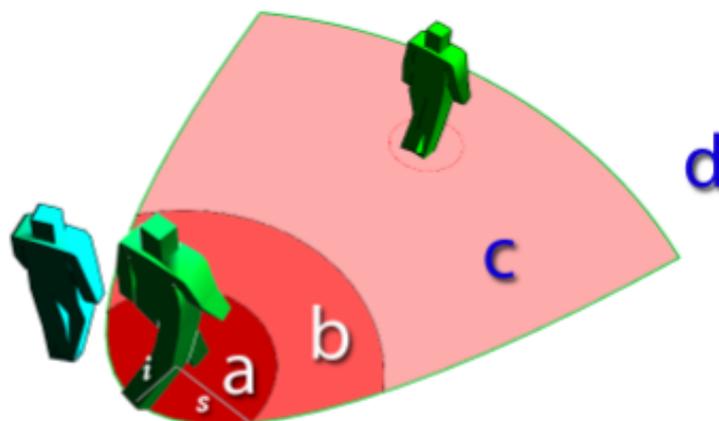


Figure 116. Notion de l'espace personnel dans SpirOps Crowd

La distance de confort est définie en centimètres. Mais cette fonction a un faible poids dans la prise de décision des usagers, surtout quand il s'agit de zone dense où l'on n'a pas vraiment le

choix et que l'agent a d'autres motivations et tâches prioritaires à accomplir. Cela rejoint ce qui se passe en réalité, quand on n'a pas le choix dans une zone très dense les distances de confort diminuent forcément.

#### **6.1.2.1.14 Les descendants**

Les agents descendants, sont en très grande majorité des personnes qui préparent leurs descentes. Le fait d'isoler la variable de descente tardive, permet tout d'abord de mieux modéliser les processus de montée et de descente et leurs dépendances avec des comportements moins concrets (autres que descentes tardives).

#### **6.1.2.1.15 Monter à bord du train**

Le choix des portes par les agents suit la loi du moindre effort, c'est-à-dire la porte la plus proche.

#### **6.1.2.1.16 Préférence dans le train**

Les agents saisissent les composantes du train et ont des préférences par rapport au type de siège, étage, sens de la marche et la proximité des portes. Le moteur est capable d'assimiler ce type de préférence et il est possible de les classer en termes de priorité afin de s'adapter aux restrictions du contexte (i.e. si je veux une place « *fenêtre* » et « *sens de la marche* » et que je ne trouve aucun siège « *fenêtre* » libre, je prends le siège « *couloir* » et « *sens de la marche* »). Actuellement, la notion de contact (le vis-à-vis, la juxtaposition, rien) n'a pas encore été implémentée. S'il n'y a pas de places assises les agents se mettent debout dans la plateforme directement accessible par les portes.

#### **6.1.2.1.17 Le conducteur**

Nous supposons dans cette simulation un comportement du conducteur qui conditionne le départ du train. Le conducteur ne décide de fermer la porte que si les deux conditions suivantes sont remplies : (i) le temps théorique d'arrêt est atteint (ii) il y a moins de trois personnes sur la bordure du quai (partie directement adjacente à la bande podotactile), par porte.

### **6.1.3 Implémentation dans le simulateur**

Dans SpirOps Crowd, un agent perçoit son environnement à travers des « *senseurs* » et agit sur son environnement à travers des « *actuateurs* » [RUS 02]. Un ensemble de *drives* représente les motivations à l'origine des actions [STE 10]. Le Tableau 20 présente un résumé des actuateurs et senseurs.

Tableau 20. Senseurs (éléments perçus de l'environnement) et actuateurs (action sur l'environnement) des agents dans SpirOps Crowd.

Agent	Actuateurs	Actions	Senseurs
Montants	<p>« Goto », ma destination : où je vais ?</p> <p>« Move » : se déplacer par politesse ou pour l'évitement</p> <p>« Vitesse » : variabilité de la vitesse</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rester à côté des entrées quai</li> <li>- S'éloigner de l'agglutination de personnes</li> <li>- Choisir le véhicule le moins occupé</li> <li>- Se positionner par rapport à la sortie destination</li> <li>-Sélectionner siège selon préférence</li> <li>-S'éloigner des bandes</li> <li>-S'éloigner des zones de transit</li> <li>-Se rapprocher des voitures</li> <li>-Rester debout dans le train</li> <li>-S'écarter en V pour laisser descendre.</li> <li>-Eviter obstacle</li> <li>-Ralentir car densité importante</li> <li>-Accélérer pour rattraper le train</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Position entrée</li> <li>- Densité élevée de personnes</li> <li>- Occupation véhicule</li> <li>- Position sortie destination</li> <li>-Caractéristiques siège</li> <li>-Bande podotactile</li> <li>-Zone d'entrée</li> <li>-Position de la voiture et des portes</li> <li>-Plateforme du train</li> <li>-Flux hypothétique ou non</li> <li>-Décor</li> <li>-Densité</li> <li>-Planning du train et des départs</li> </ul>
Descendants	<p>« Goto » destination</p> <p>« Move » : se déplacer par politesse ou pour l'évitement</p> <p>« Vitesse » : variabilité de la vitesse</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se lever d'un siège</li> <li>-Se diriger vers les sorties les plus proches</li> <li>-Eviter obstacle</li> <li>-Ralentir car densité importante</li> <li>-Accélérer pour quitter le train</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Siège/Planning train</li> <li>-Position porte véhicule /sortie quai</li> <li>-Décor</li> <li>-Densité</li> <li>-Planning du train et des départs</li> </ul>

## 6.1.4 Calibrage du modèle à BFM - Correction de biais

### 6.1.4.1 Différence de nombre de questionnaires par zone

Bien qu'au cours des expérimentations à BFM, le même protocole expérimental ait été répliqué entre les 12 zones en consacrant une soirée par zone, cette démarche a conduit à des disproportions (Figure 117) dans le nombre de questionnaires par zone en lien avec la baisse de densité vers les zones 10-12. Quelques recueils supplémentaires ont été rajoutés mais n'étaient pas suffisants pour équilibrer ces disproportions. Il s'agit de biais importants dans les données : par exemple, c'est justement vers les zones 10-12 que la catégorie « *Train* » augmente.

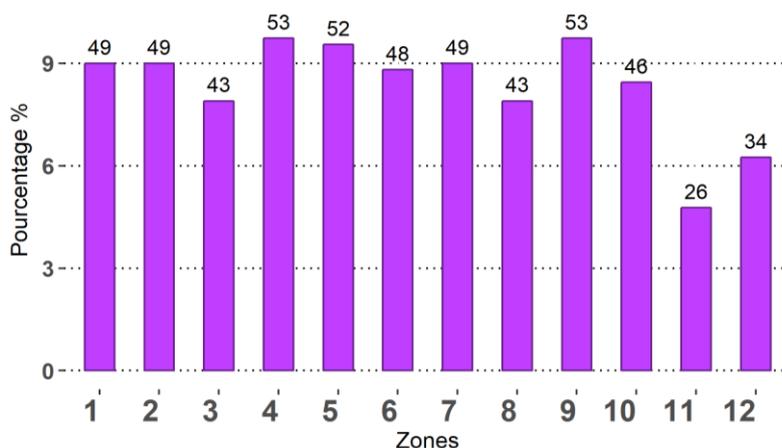


Figure 117. Déséquilibre quantitatif entre le nombre des questionnaires par zone, en lien avec la baisse de densité par zone.

Nous proposons une correction des données à travers le raisonnement suivant. Pour chaque zone, le taux de stratégie représente le nombre de questionnaires de la stratégie étudiée divisé par le nombre de questionnaires total. Puis, en multipliant le taux de stratégie par la densité par zone par nous estimons le nombre réel de la stratégie (voir Figure 118).

	Stratégie i	P : Somme personnes/ zone	Q : Somme questionnaire	C : Correction taux de stratégie
j				
1	$S_1$	$P_1$	$Q_1$	$C_1$
2	$S_2$	$P_2$	$Q_2$	$C_2$
...	...	...	...	...
12	$S_{12}$	$P_{12}$	$Q_{12}$	$C_{12}$

$$C_j = \frac{S_j * \sum_{j=1}^{12} P_j}{\sum_{j=1}^{12} Q_j} \quad \text{avec}$$

$$j = 1 \rightarrow 12 \text{ (zones)} ; i = 1 \rightarrow 4 \text{ (stratégie)}$$

Figure 118. Matrice illustrant la correction statistique sur les motivations par rapport au nombre de questionnaires et selon la densité, par zone.

Enfin, pour calculer la répartition pour chacune des douze zones, nous divisons le nombre d'occurrences d'une stratégie pour une zone donnée par la somme totale de cette stratégie sur toutes les zones ; obtenant ainsi la distribution relative de chaque stratégie sur l'ensemble des 12 zones (voir Figure 119).

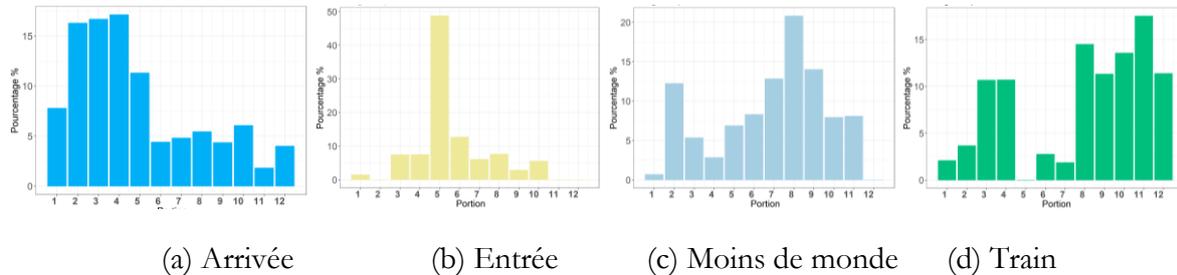


Figure 119. Répartition de la stratégie sur tout le quai : le total pour chaque graphe fait 100%.

Dans le Tableau 21, est présentée la différence entre les valeurs obtenues empiriquement et les valeurs corrigées statistiquement :

Tableau 21. Correction de divers biais des questionnaires sur le pourcentage total des catégories

Stratégie	Valeurs questionnaires	Correction biais $\sum_{j=1}^{12} C_i$	Différence (Anciennes- Correction)
Arrivée	55	63	-8
Train	8	7	1
Moins de monde	17	10	7
Entrée	20	20	0

Nous utiliserons ces chiffres comme données d'entrée corrigées vers le simulateur afin de dépasser ces biais et garantir la convergence des données de sorties vers les mêmes valeurs des valeurs d'entrées, voir Figure 120.

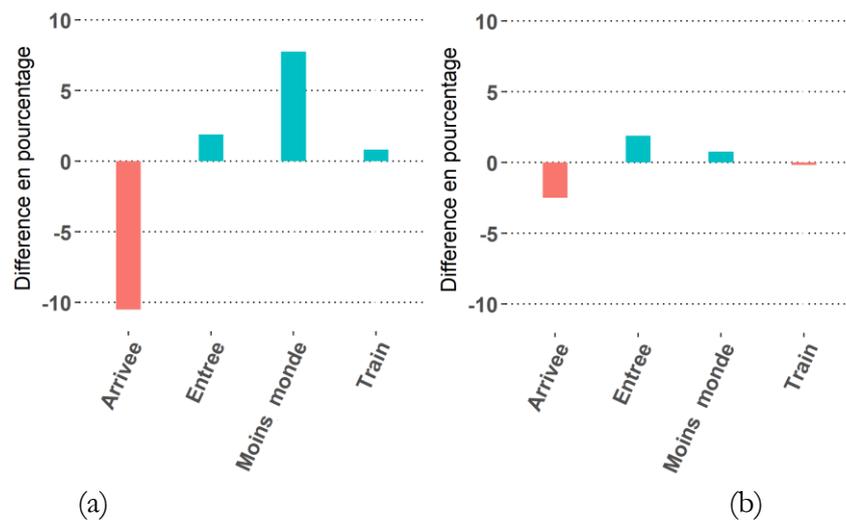


Figure 120. Diminution de l'écart entre les valeurs d'entrée au simulateur et des valeurs de sorties  
 (a) Valeurs catégories avant correction questionnaires vs valeurs simulées (b) Valeurs catégories après corrections des biais vs valeurs simulées

### 6.1.4.2 Destinations empruntées depuis BFM

L'un des paramètres en entrée de la simulation est les pourcentages des destinations à partir de la gare d'étude (BFM). Nous constatons que la différence entre la moyenne des destinations en réel et en simulation est importante, voir Figure 121.

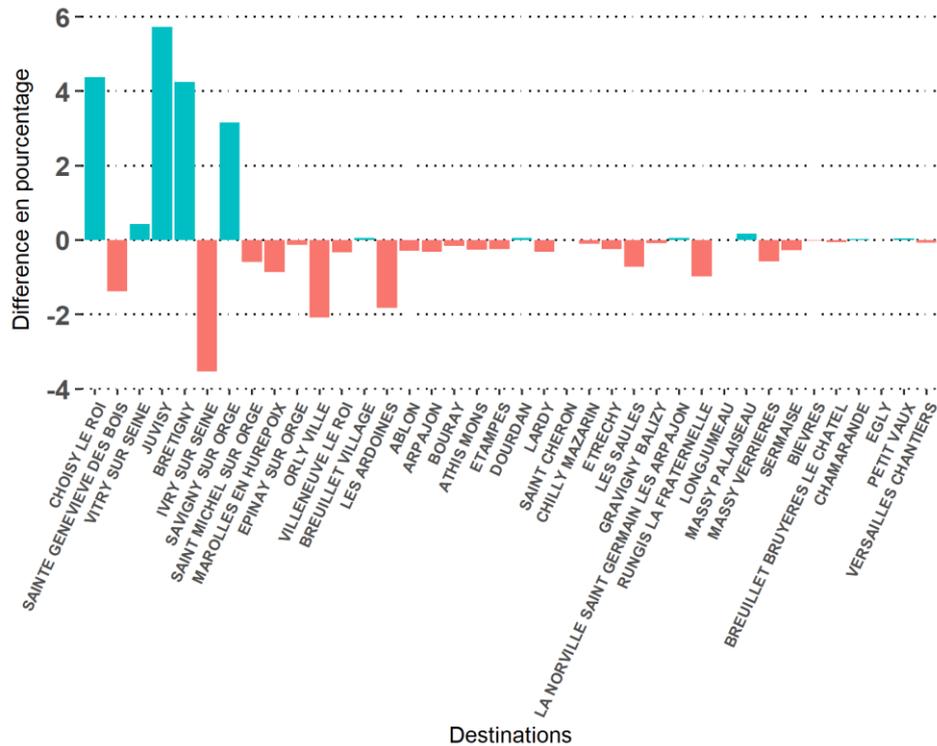


Figure 121. Différence entre les pourcentages destinations recueillis dans le questionnaire par rapport à la simulation

Ce biais vient de deux facteurs importants (i) certaines missions sont plus fréquentes que d'autres (ii) certaines destinations sont desservies par plus de missions que d'autres (Figure 122). En conséquence, certaines destinations sont plus desservies que d'autres. Ceci implique que le cumul des personnes d'une destination très desservie est rapidement supprimé par l'arrivée d'un train, et inversement : le cumul de destination très peu desservie amplifie le pourcentage de cette destination.

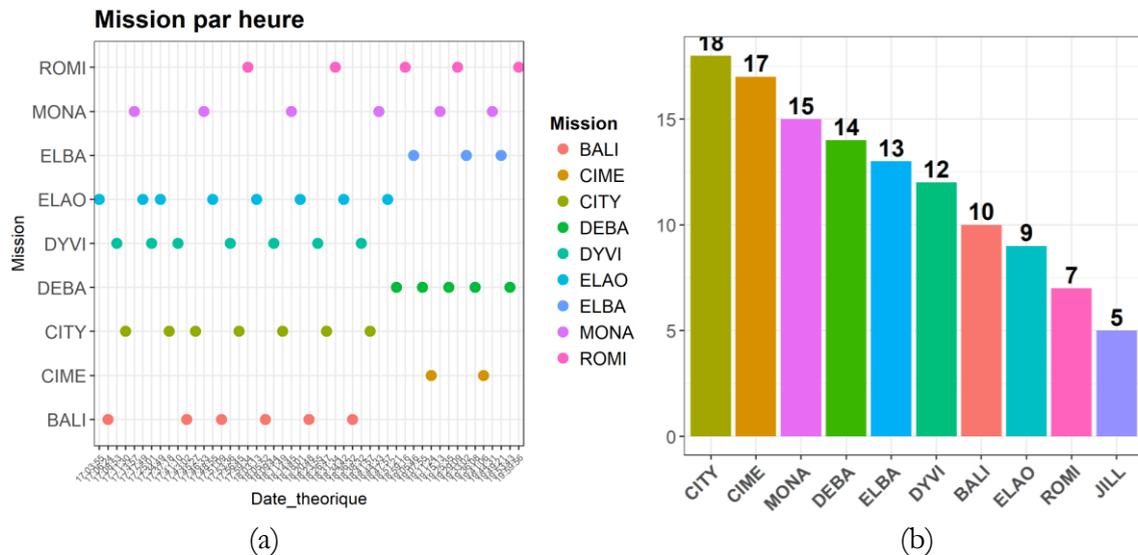


Figure 122. (a) fréquence des missions de 17h à 20h (b) nombre de destinations desservies, par mission

Lors du recueil de données, la destination de chaque personne est demandée. Comme on l'a démontré, il existe un biais sur ces données. On propose une correction statistique afin d'estimer le nombre correct des pourcentages des destinations à partir de BFM. Chaque destination est comptabilisée dans la Figure 123 :

i	1	2	...	10	F : Fréquence mission	N : Nombre recueilli destination	C : Correction
j							
1	M <sub>11</sub>	M <sub>21</sub>	...	M <sub>101</sub>	F <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>
2	M <sub>12</sub>	M <sub>22</sub>	...	M <sub>102</sub>	F <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>
...	...	...	...	...	...	...	...
44	M <sub>144</sub>	M <sub>244</sub>	...	M <sub>1044</sub>	F <sub>44</sub>	N <sub>44</sub>	C <sub>44</sub>

$$F_j = \sum_{i=1}^{10} M_{ij} \quad ; \quad C_j = N_j * \sum_{i=1}^{10} M_{ij}$$

J= 1→44 (Destinations de BFM) ; i= 1→10 (Missions de BFM sens Sud)

Figure 123. Matrice illustrant la correction statistique sur les destinations par rapport aux nombres de questionnaires par destination et de la fréquence de desserte.

Après ce réajustement de calcul, nous remarquons (Figure 124) que la différence entre la moyenne des destinations en réel (corrigée seulement par rapport au nombre de questionnaires) et en simulation est beaucoup moins importante.

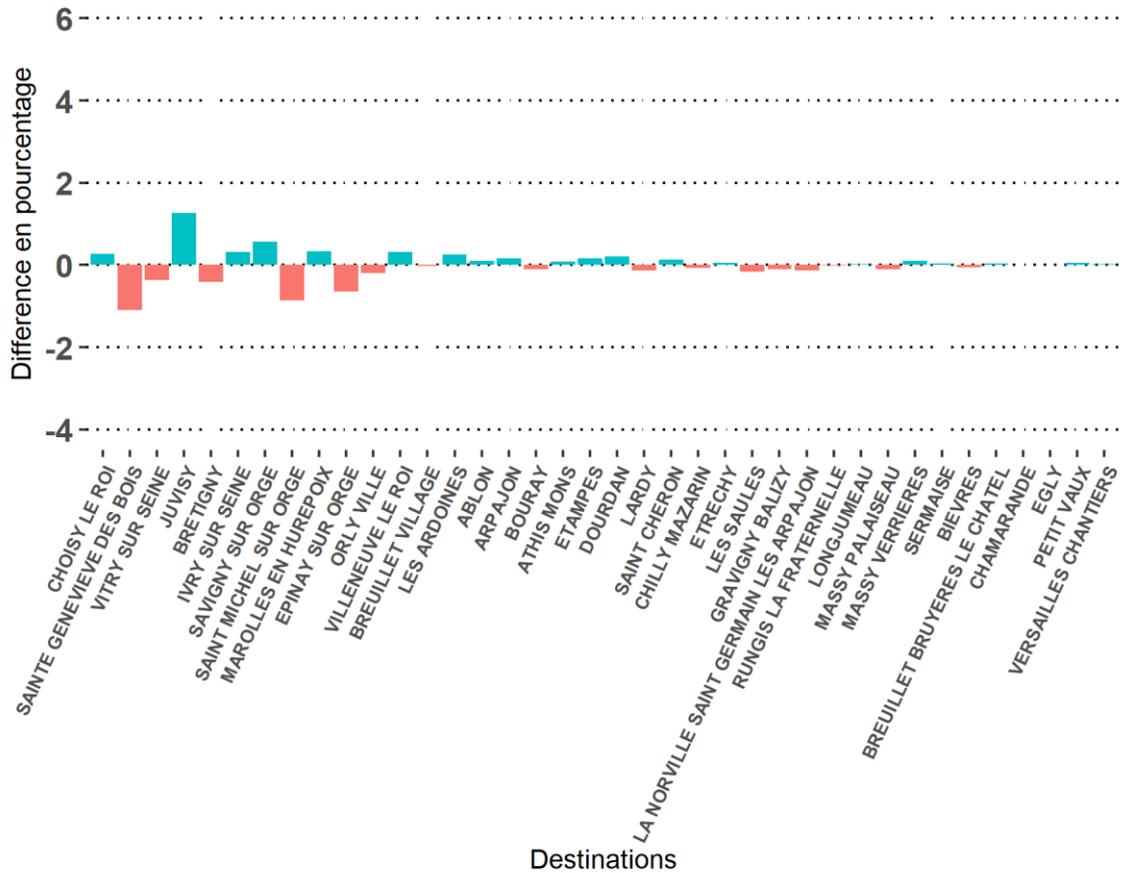


Figure 124. Différence après correction du biais entre les pourcentages destinations recueillis dans le questionnaire par rapport à la simulation

### 6.1.5 Simulation et validation

Dans cette partie, pour chaque phase, on définit un ensemble de métriques afin de valider le modèle. Le choix des métriques est important et définit le domaine de validité de la simulation. Vous remarquerez que nous avons donc utilisé les données observées lors des 3 phases d'observations (positionnement sur le quai, positionnement dans le train et échanges quai-train) pour valider les simulations.

### 6.1.5.1 Phase quai

#### 6.1.5.1.1 Métrique 1 : comptages aux entrées

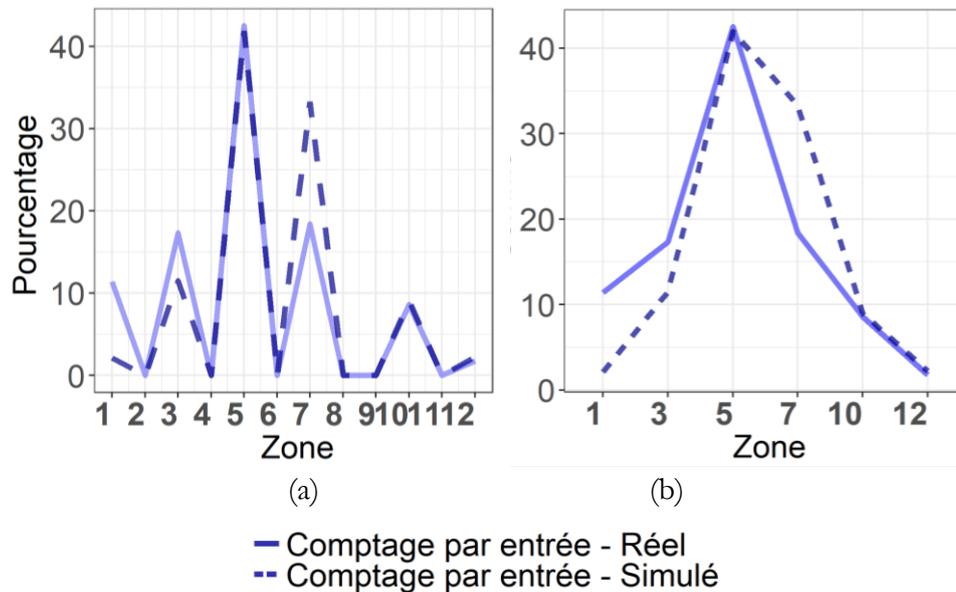


Figure 125. Comptages aux entrées réel versus simulé

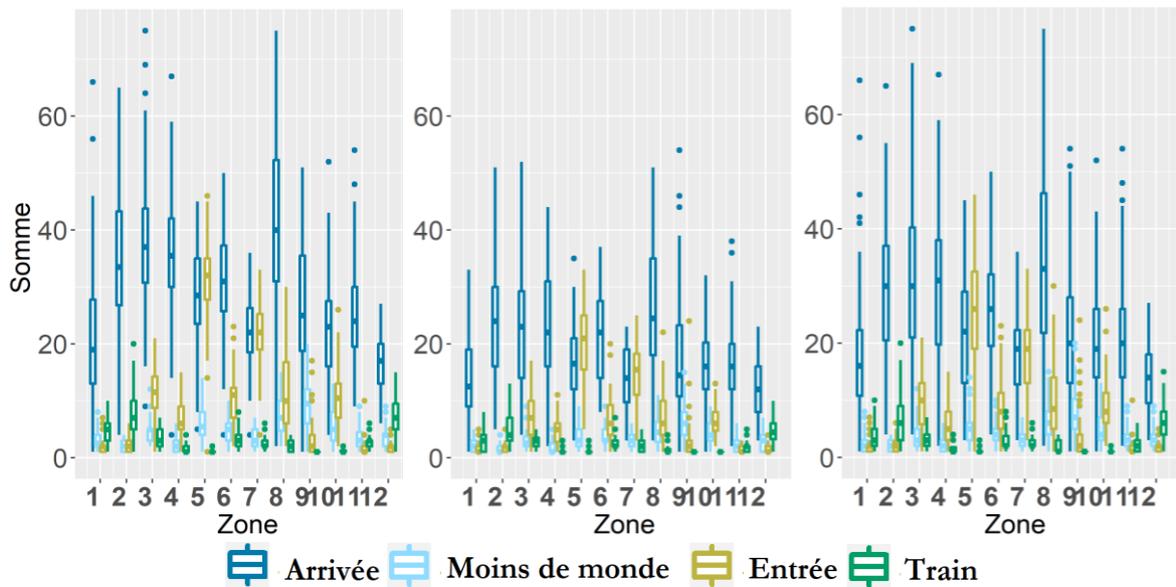
Dans la Figure 125 (a) est représenté le comptage par entrée par zone. Nous éliminons les zones qui ne contiennent pas d'entrée car les conserver peut créer de fausses corrélations (Figure 125 (b)) Les pourcentages d'entrants par zone en réel présentent une corrélation forte  $r=0.87$  par rapport au simulé, ce qui valide cette métrique. Le générateur d'utilisateur respecte donc les répartitions statistiques observées.

#### 6.1.5.1.2 Métrique 2 : Variabilité des motivations

Les boîtes à moustaches permettent de faire figurer la médiane et l'étendue interquartile afin d'assurer une meilleure mesure de la tendance centrale et de la dispersion de données. Les boîtes présentent, l'étendue interquartile du 25% au 75%, et les moustaches présentent les plages des 25% inférieurs et 25% supérieurs, à l'exclusion des valeurs aberrantes.

Les valeurs de ces graphes ont été obtenues par les échantillons de divers instants  $T$  ( $T=Arrivée$  et  $T=Départ$  et  $T=Intermédiaire$  du train), avec les attributs propres à chaque agent (stratégie, zone, etc.).

Nous remarquons (Figure 126) que l'étendue de la dispersion de la catégorie « arrivée » est plus importante. Comparant (a) par rapport à (b), on remarque une amplification des boîtes (présentant du 25<sup>e</sup> au 75<sup>e</sup> percentile) pour toutes les catégories. Ceci s'explique par le fait que juste avant l'ouverture des portes (a), nous disposons d'une densité maximale sur le quai. Les deux conditions (Arrivée, Départ) comportent des valeurs extrêmes ce qui suggère une forte variance. En revanche, après le départ du train, nous disposons d'une densité minimale sur le quai.



(a) T= Arrivée

(b) T= Départ

(c) T=Intermédiaire

Figure 126. Variabilité des motivations selon plusieurs instants T, BFM

La Figure 126 (c) regroupe des échantillons pris toutes les 15 secondes, en dehors des instants  $T=Arrivée$  et  $T=Départ$ . Elle montre des valeurs de dispersion plus moyennées.

Lors du recueil des données via des questionnaires, il y a un arrêt des interviews au moment du passage d'un train ; ceci afin d'éviter tout dysfonctionnement pouvant être causé par ces interrogations quand le train est à quai. De ce fait, des données de la condition « Intermédiaire » sont considérées comme étant plus représentatives des données empiriques et de la situation générale.

Naturellement, les valeurs « Arrivée » sont les plus sujettes à une plus grande variabilité, car l'étendue interquartile de la normale de chaque destination du top dix est fixée à 13 mètres.

### 6.1.5.1.3 Métrique 2.1 : Stratégie « Arrivée »

#### Etudes des variabilités des échantillons

La Figure 127 permet d'étudier la cohérence des données entre les échantillons. Sur le graphe, il apparaît une diminution de la variabilité pour les échantillons les plus récents. La couleur noire signifie que ce sont des échantillons temporellement antérieurs aux bleus. Le dégradé est proportionnel au facteur temps. On remarque que l'allure de la courbe se stabilise au fur et à mesure du temps.

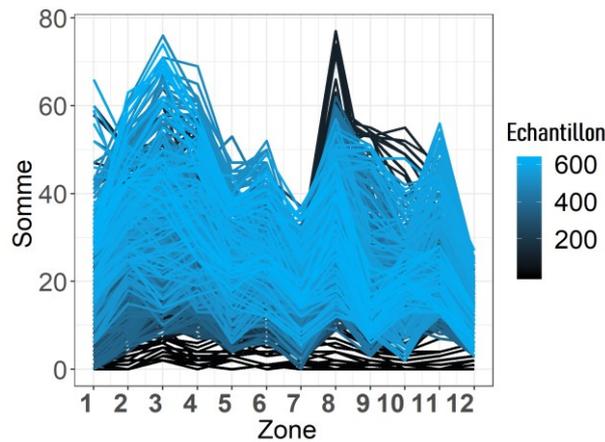


Figure 127. Etude des variabilités des échantillons de la motivation « Arrivée » selon l'évolution temporelle

Dans les graphes (a) et (b) de la Figure 128, nous représentons en noir la moyenne de toutes les valeurs, en gris l'étendue de l'écart-type. Pour Figure 128 (a) a été calculée la corrélation de chaque distribution d'un échantillon par rapport à la moyenne. La corrélation entre deux variables est le rapport de leur covariance et du produit non nul de leurs écarts types. A cet égard, elle tient compte de l'étendue de la variabilité pour l'échantillon sur les douze zones, par rapport à la variabilité de la moyenne sur les douze zones. Tout comme remarqué sur la Figure 128 (a), la corrélation devient de plus en plus fréquente avec le temps. On obtient 72% de forte corrélation contre 38% de faible corrélation ( $r < 0.5$ )

Pour la Figure 128 (b), nous avons calculé pour chaque courbe la p-value grâce au test de Kolmogorov-Smirnov (KS-test). Les courbes vertes représentent une p-value non significative ( $p > 0.05$ ) donc proche de la moyenne. On obtient 34% de ressemblance contre 66%.

Le test quantifie la distance qui existe entre deux distributions afin de vérifier si elles suivent une même loi. A cet égard, deux distributions qui présentent la même allure mais d'amplitudes différentes seront considérées comme deux courbes différentes. Une accumulation de personnes par zone, aux heures de pointes, peut être due par exemple, à un échantillon pris avant le passage d'un train. Nos distributions *Intermédiaires* peuvent donc naturellement présenter des différences d'amplitudes.

Comparer deux courbes est une question complexe car cela dépend de ce que l'on souhaite comparer dans ces deux courbes. Dans notre étude le test de Kolmogorov-Smirnov est très sensible à l'amplitude, nous continuons la validation des distributions avec des tests de corrélation qui sont plus adaptés.

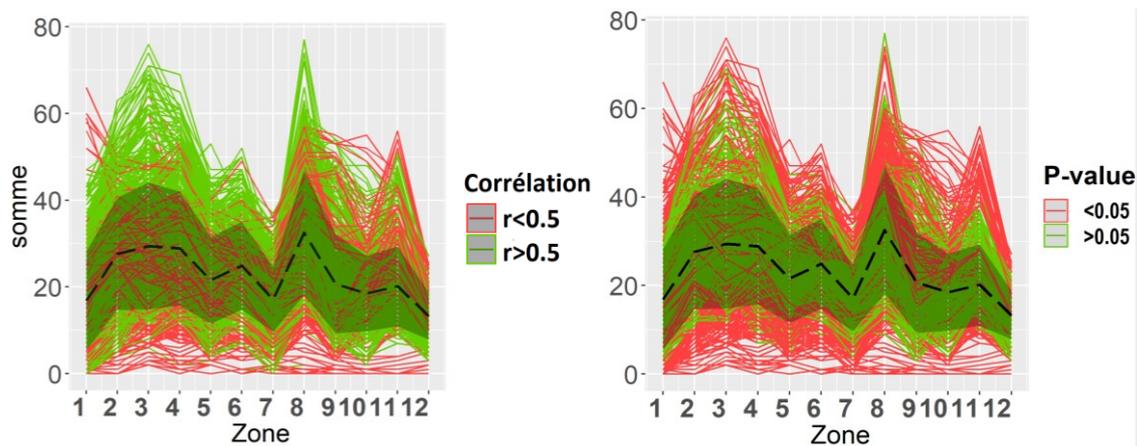


Figure 128. (a) Forte corrélation ( $r > 0.5$  et  $p\text{-value} < 0.05$ ) avec la moyenne, (b) Différence significative ( $p < 0.05$ ) selon le test de Kolmogorov-Smirnov

### Distribution entre les zones, par destination du top dix

Pour chaque destination du top dix, on a comparé sa distribution empirique des catégories « arrivée », par zone, à la distribution simulée (voir la Figure 129).

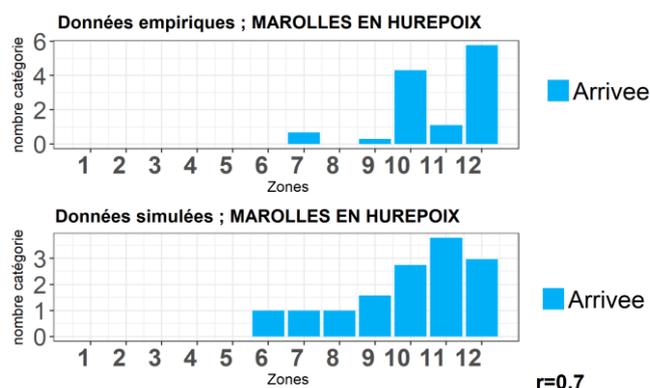


Figure 129. Comparaison des répartitions de la motivation « Arrivée » par zone, par destination.

A travers plusieurs simulations, on a pu obtenir plusieurs valeurs de corrélations fortes par destination. Par la suite, nous comparons le cumul réel des distributions du top dix avec le cumul simulé (Figure 130).

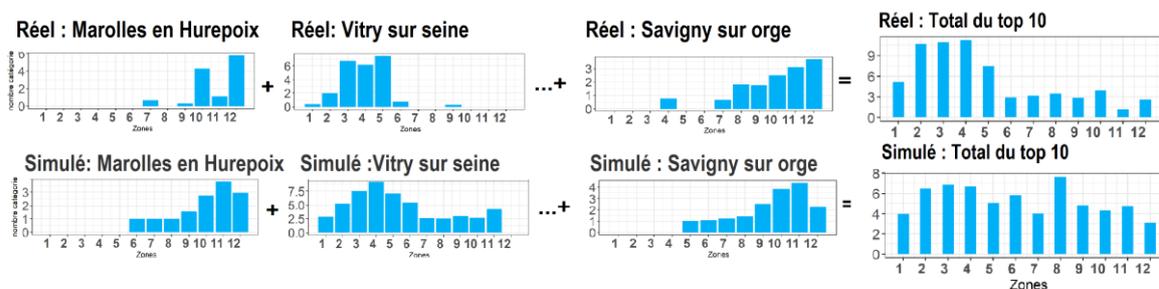


Figure 130. Cumul des répartitions par zone par destination, afin d'aboutir au cumul du top dix réel et simulé

Un constat principal découle de nos observations : l'augmentation des coefficients de corrélation par destination, ne garantit pas l'augmentation des coefficients de corrélation comparant la somme des distributions de destinations empiriques versus simulées. Ceci nous conduit à la question suivante : est-ce que les corrélations des composantes font la corrélation de l'agrégat ?

Il apparaît clairement que ce n'est pas le cas, est ceci est dû au fait que la corrélation justement teste la variabilité d'une zone à une autre même si les quantités sont amplifiées. Cela ne se verra pas en testant destination pas destination. Mais cette amplitude, cumulée dans certaines zones, contribuera au changement de la distribution finale très significativement. Ceci est illustré par la Figure 131 qui montre la contribution de chaque destination du top dix dans la construction de la distribution « réelle » et « simulée » de la motivation « Arrivée ».

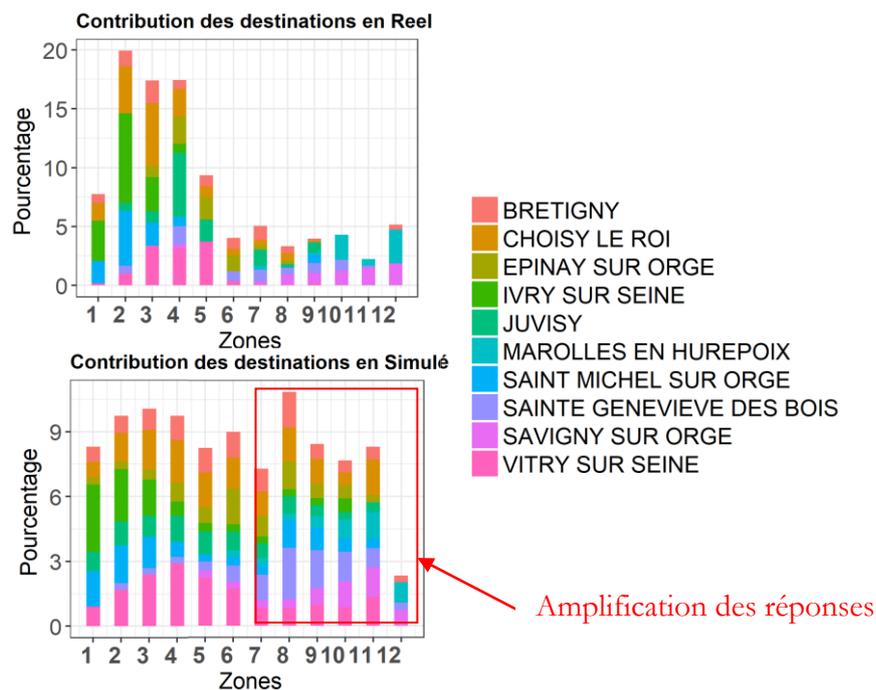


Figure 131. Contribution des destinations du top dix dans le cumul de la motivation « Arrivée » dans le réel et le simulé « final »

On remarque que l'amplification des réponses concerne la deuxième moitié du quai, et spécifiquement certaines destinations qui contribuent à cette partie. Pour cela, nous pouvons utiliser le KS-test afin de comparer les amplitudes respectives des distributions des « Arrivée » réelles et simulées.

Tableau 22. Valeurs de corrélation et p-value du ks-test pour chaque destination du top dix

Destination	Position finale (simulé) vs réelle	
	Corrélation	KS test
Choisy le roi	0.45	<b>0.035</b>
Sainte Geneviève des bois	0.331	0.25
Vitry sur seine	0.85	<b>0.01</b>
Juvisy	0.53	0.25
Brétigny sur orge	0.4	0.1
Ivry sur seine	0.85	0.1
Savigny sur orge	0.82	0.85
Saint Michel sur orge	0.78	0.1
Marolles en Hurepoix	0.7	0.52
Epinay sur orge	0.45	<b>0.03</b>

Sachant que l'on a corrigé tout biais concernant la quantification des destinations (page 198) et qu'on a vérifié la correspondance des pourcentages d'entrée et de sortie des destinations. On doit se demander : d'où vient cette amplification ? On énumère deux facteurs principaux et pertinents pour répondre à cette question.

- 1) Les agents ayant une préférence « Arrivée » essayeront de se positionner aux alentours des sorties destinations sur le quai. Mais en raison de la densité importante sur le quai, ces derniers se mettent un peu plus loin que prévu, c'est-à-dire où il y a de la place. La Figure 132 permet de comparer la distribution des positions « réelles » versus « voulues ». On remarque clairement une amélioration de l'allure de la courbe par rapport à la distribution réelle. Les résultats sont comparés statistiquement dans le Tableau 23.

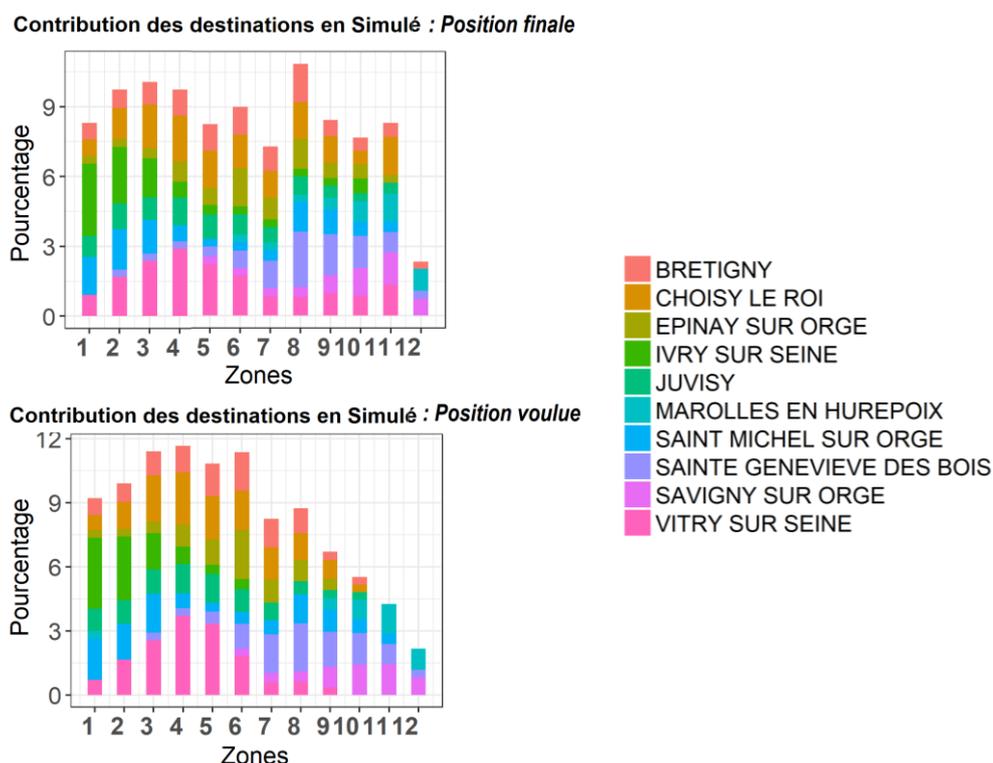


Figure 132. Contribution des destinations du top dix dans le cumul de la motivation « Arrivée » dans le simulée « finale » et « voulue »

Tableau 23. Valeurs de corrélation et p-value du ks test pour chaque destination du top dix, pour la position simulée « finale » et « voulue »

Destination	Position finale (simulé) vs réelle		Position voulue (simulé) vs réelle	
	Corrélation	KS test	Corrélation	KS test
Choisy le roi	0.45	<b>0.035</b>	0.56	0.25
Sainte Geneviève des bois	0.331	0.25	0.38	0.25
Vitry sur seine	0.85	<b>0.01</b>	0.92	0.25
Juvisy	0.53	0.25	0.6	0.51
Brétigny sur orge	0.4	0.1	0.64	0.25
Ivry sur seine	0.85	0.1	0.89	0.99
Savigny sur orge	0.82	0.85	0.84	0.99
Saint Michel sur orge	0.78	0.1	0.72	0.09
Marolles en Hurepoix	0.7	0.52	0.67	0.99
Epinay sur orge	0.45	<b>0.03</b>	0.64	0.25

- 2) Le pourcentage de la motivation « Arrivée » a été défini en corrigé à 63%. Seulement, quand cette valeur est définie en valeur d'entrée dans le simulateur, on le fait pour toutes les destinations. Autrement dit, on suppose, que chaque destination génère 63 % de catégorie « Arrivée », et si ce n'est pas le cas ? Les motivations de positionnement sont-elles dépendantes de la destination ? (page 267).

#### Distribution agrégée des « arrivées », simulé versus réel

Le coefficient de corrélation de la position « finale » simulée vs réelle est égal à  $r=0.56$ . En ce qui concerne la position « voulue » simulée vs réelle,  $r=0.68$ .

Le rassemblement des zones en deux par deux (ce qui donne au total 6 zones sur le quai), augmente la corrélation pour la simulation position finale de  $r=0.56$  à  $r=0.84$ . Cela signifie que les résultats peuvent être bien améliorés à une zone près (Tableau 24).

Tableau 24. Corrélation des valeurs Réelles et simulés (finales), et fusion des zones.

Rassemblement zone	Reel VS Top dix reel	Reel VS simulé	Topten réel VS simulé total	Topten reel VS simulé topten
1	0.97	0.56	0.5	0.65
2	0.98	0.84	0.7	0.78
3	0.99	0.87	0.66	0.82
4	0.99	0.87	0.75	0.81

#### 6.1.5.1.4 Métrique 2.2 : Stratégie « Entrée »

##### Etudes des variabilités des échantillons

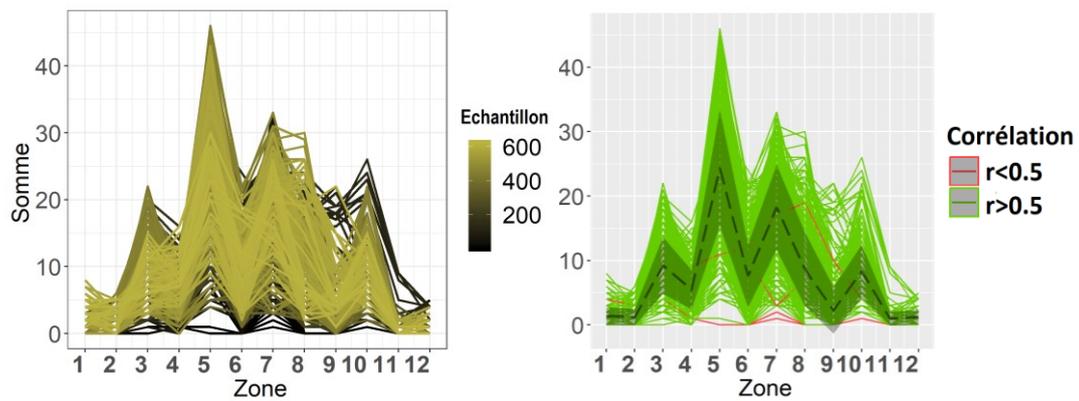


Figure 133. Etude des variabilités des échantillons de la motivation « Entrées » selon l'évolution temporelle

Il y a le même effet de stabilisation à travers le temps. Les échantillons corrèlent fortement avec la moyenne à 98.7% (Figure 133).

### Distribution entre les zones

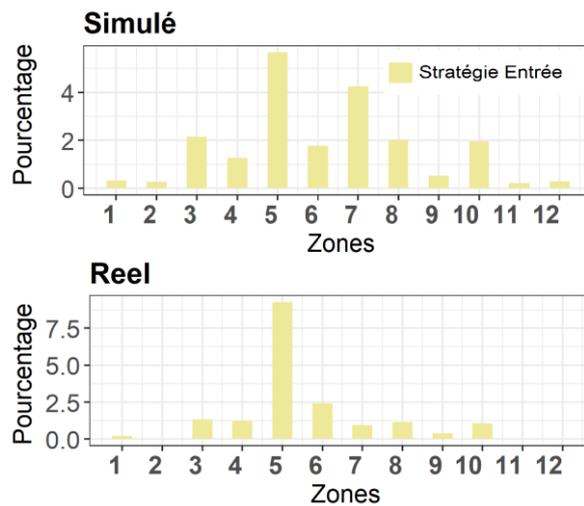


Figure 134. Comparaison des répartitions de la motivation « Entrée » par zone

La position finale simulée vs réelle affiche une corrélation  $r=0.8$  alors que la position voulue simulée vs réelle affiche une corrélation  $r=0.76$  (Figure 134).

### Relation avec les comptages aux entrées

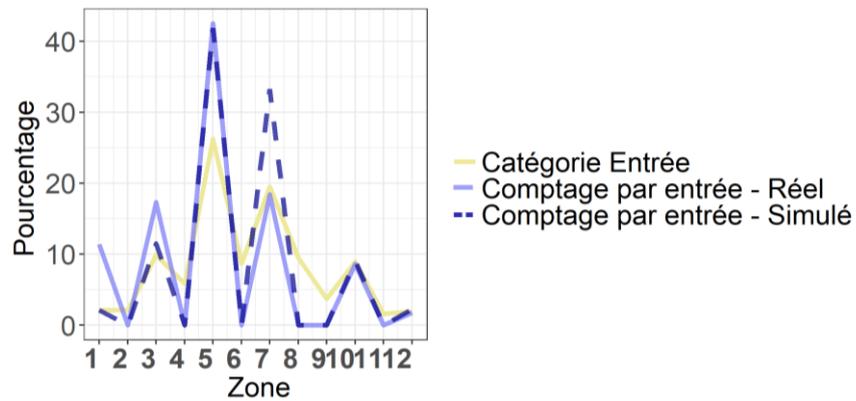


Figure 135. Comparaison des comptages réel et simulé par entrée, avec les motivations « Entrées »  
 La motivation « Entrée » a un fort coefficient de corrélation  $r=0.93$  avec les comptages par entrée de la simulation (Figure 135).

#### 6.1.5.1.5 Métrique 2.3 : Stratégie « Moins de monde » :

##### Etudes des variabilités des échantillons

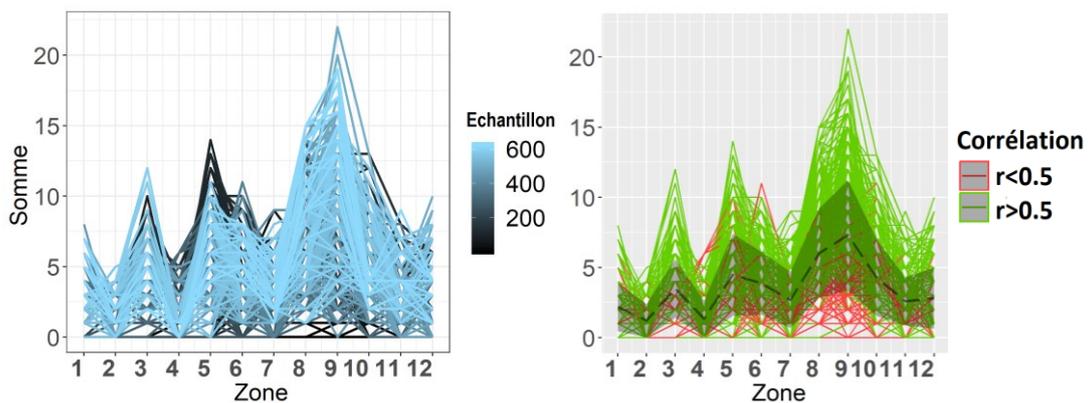


Figure 136. Etude des variabilités des échantillons de la motivation « Moins de monde » selon l'évolution temporelle

Il y a le même effet de stabilisation à travers le temps. Les échantillons corréleront fortement avec la moyenne à 79% (Figure 136).

##### Distribution entre les zones

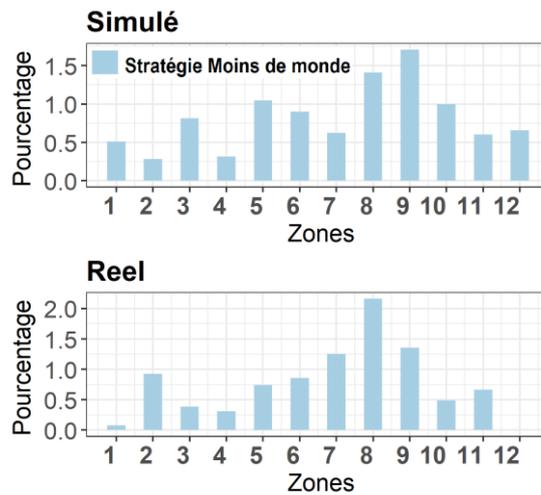


Figure 137. Comparaison des répartitions de la motivation « *Moins de monde* » par zone  
 La position finale simulée vs réelle affiche une corrélation  $r=0.6$ , alors que la position voulue simulée vs réelle affiche une corrélation  $r =0.52$  (Figure 137).

#### 6.1.5.1.6 Métrique 2.4 : Stratégie « Train »

##### Etudes des variabilités des échantillons

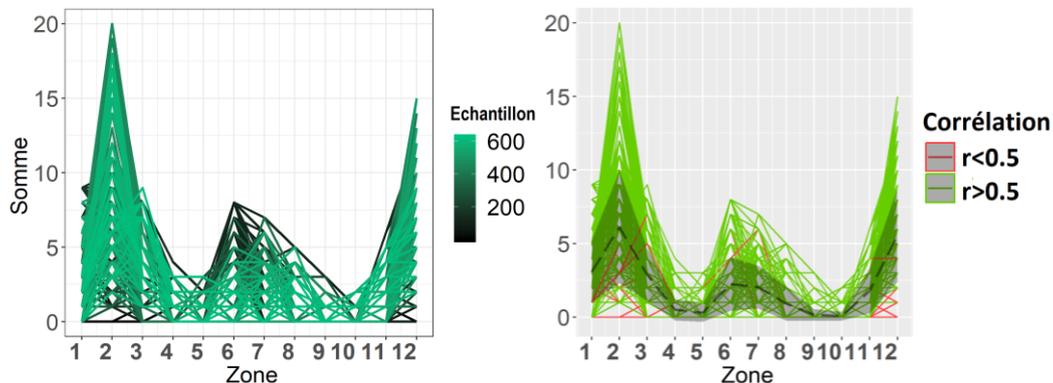


Figure 138. Etude de la variabilité des échantillons de la motivation « *Train* » selon l'évolution temporelle

Il y a le même effet de stabilisation à travers le temps. Les échantillons corréleront fortement avec la moyenne à 91% (Figure 138).

##### Distribution entre les zones

Cette motivation a été évoquée comme étant un comportement que l'on n'a pas pu valider durant nos analyses statistiques, en liant cette variable à la charge du train. Il est normal que l'on obtienne une mauvaise corrélation  $r=-0.3$ .

### 6.1.5.1.7 Métrique 3 : répartition sur le quai – densité

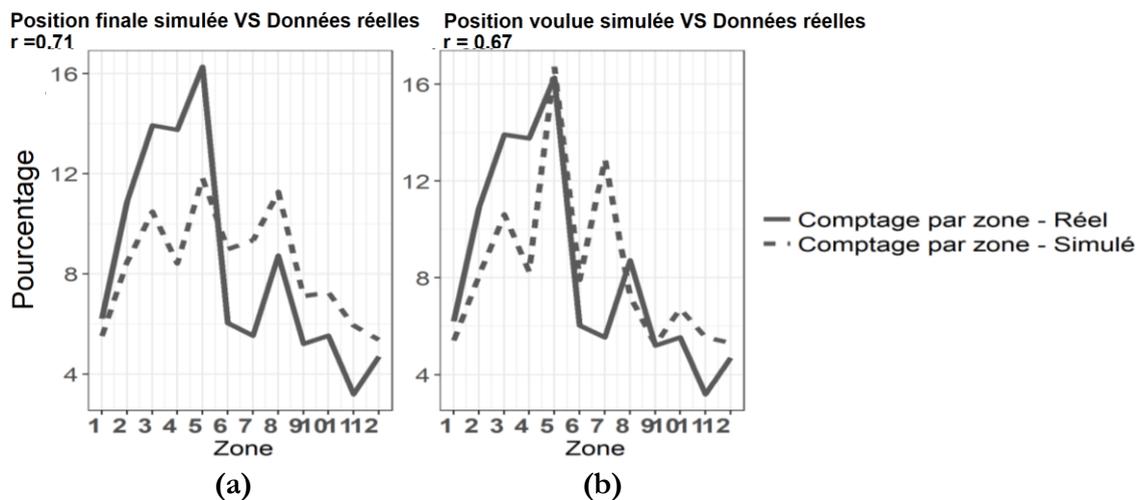


Figure 139. Comparaison de la densité finale Réelle avec la densité simulée des positions « finales » (a), et des positions « voulues » (b)

En ce qui concerne la densité, la corrélation de la position finale simulée vs réelle est  $r=0.71$ , et pour la position voulue simulée vs réelle,  $r = 0.67$  (Figure 139).

La densité des personnes est la résultante de choix de positionnement selon les motivations déjà validées, sauf pour la motivation « Train » (Tableau 25) :

Tableau 25. Récapitulatif des corrélations des motivations avec les données empiriques

	Simulé « voulue » vs Réel	Simulé « finale » vs Réel
Entrée	0.72	0.8
Moins de monde	0.52	0.6
Train	<b>-0.3</b>	<b>-0.2</b>
Arrivée	0.68	0.56

Le générateur d'utilisateurs respecte les répartitions statistiques observées à 71% pour la simulation en position « finale » et à 67% pour la simulation en position « voulue ». Ces données représentent des corrélations fortes avec les données empiriques. Ceci découle d'une démarche progressive à travers la validation d'autres micro-métriques (motivations) contribuant à la construction de la densité.

### 6.1.5.1.8 Métrique 4 : Flux de personnes

D'un point de vue descriptif, les flux de personnes théoriques et simulées se ressemblent avec une légère amplification des nombres des montées en simulé (Tableau 26).

Tableau 26. Comparaison des données des circulations réelles et simulées

	Montants	Descendants
Théorique	350 (sd : 107)	58.6 (sd : 26.2)
Simulée	413 (sd : 173)	49.2 (sd : 14)

D'un point de vue quantitatif, les données se ressemblent assez bien. On remarque par ailleurs, que les allures des courbes se ressemblent (Figure 140), avec un aspect caractéristique d'élévation de nombre de montants suivi d'une baisse prononcée. La simulation reproduit cet aspect d'une manière très satisfaisante.

Par ailleurs, ces effets de pics n'ont pas été investigués par rapport aux missions (i.e. missions qui attirent plus de montants que les autres, dépendance avec des événements antérieurs, début de chute de trafic vers 20h, etc.)

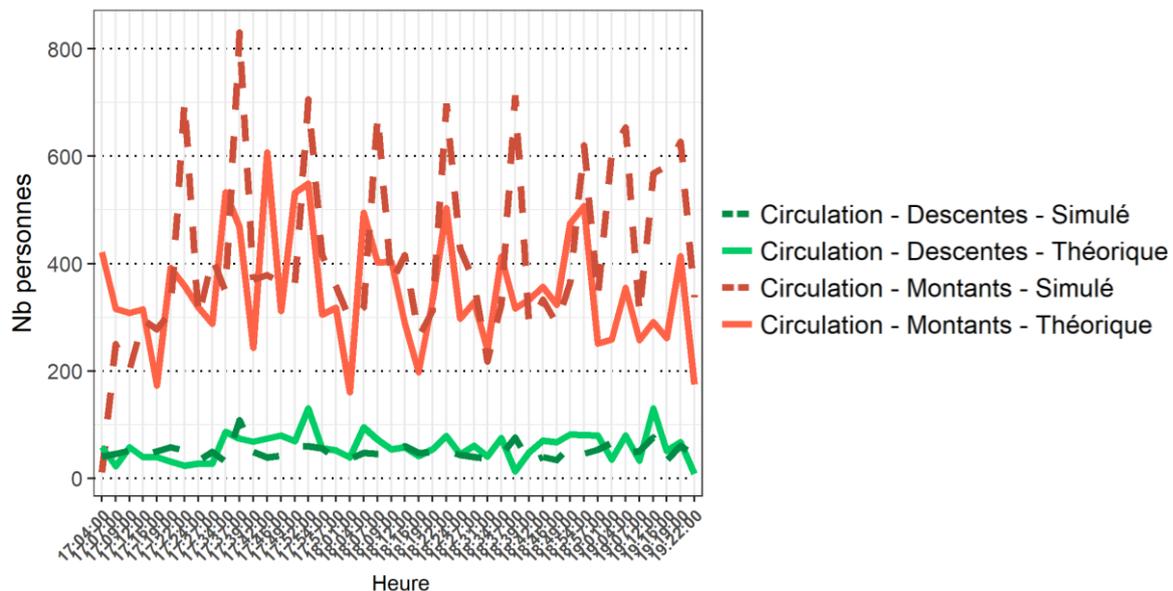


Figure 140. Circulation des trains et le nombre de montants / descendants par train

### 6.1.5.2 Phase Train

Le simulateur permet la définition des préférences en fonction du type de siège, le sens de la marche, l'étage et la proximité des portes. Nous avons implémenté un comportement de prise de siège exclusivement en fonction de la proximité des portes.

### 6.1.5.3 Phase quai-train

Pour la phase quai-train, nous allons partir de plusieurs hypothèses afin d'aboutir à une meilleure connaissance de l'écoulement des flux. Ces hypothèses vont nous permettre d'isoler plusieurs paramètres dont les effets sont connus et qui doivent être étudiés en tant que piste d'enrichissement du simulateur.

- Nous supposons que toutes descentes sont des descentes anticipées. Ainsi, il n'y a pas de descentes tardives et de croisement entre flux de « *montée* » et de « *descente* ».
- Nous mesurons et étudions tous les flux continus et non sporadiques. Toutes les arrivées tardives et entrecoupées ne seront pas étudiées.
- Par conséquent, le temps d'échange suivra le scénario « *Descentes* » puis « *Montées* ».

### 6.1.5.3.1 La navigation

#### La création de ligne

Nous pouvons observer visuellement le même phénomène dynamique de formation de ligne qui a été décrit dans la littérature [OKA 93] [HOO 04]. Voir Figure 141.

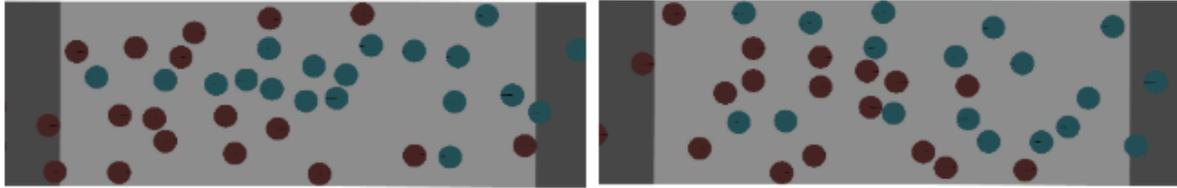


Figure 141. Formation de lignes – vue de dessus - SpirOps Crowd

#### Le « zipper effect »

Dans un couloir étroit, on peut observer des phénomènes d'optimisation de l'espace permettant aux usagers de naviguer en aménageant de l'espace libre devant leurs pieds. C'est le *zipper effect* [HOO 05]. Voir Figure 142.

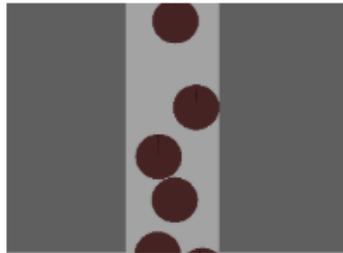


Figure 142. Le Zipper Effect –vue de dessus - SpirOps Crowd

#### Le shadow effect

Nous observons le *shadow effect* qui se traduit par des espaces inutilisés en raison de la présence de murs en début du chemin, laissant ainsi des espaces inutilisés [STI 00 : p152].

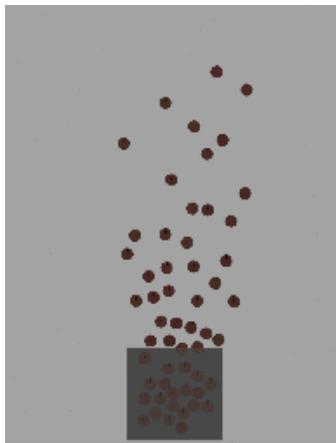


Figure 143. Shadow effect –vue de dessus - SpirOps Crowd

En somme, la navigation des agents présente des caractéristiques rapportées dans la littérature. Cela démontre la grande adaptabilité et crédibilité des agents face aux problématiques de navigation en instaurant des comportements d'optimisation et d'auto-organisation.

### 6.1.5.3.2 Les caractéristiques des flux de montants et de descendants, par porte

L'analyse suivante concerne le nombre de montants et descendants par porte. La numérotation des portes est croissante à partir de la queue de train (Figure 144).

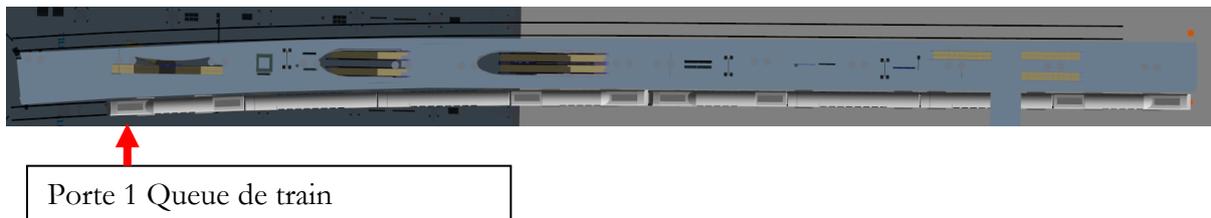


Figure 144. Position des portes, BFM

Les valeurs « Montants » et « Descendants » réelles et simulées correspondent, elles présentent un coefficient de corrélation modéré de  $r=0.51$  et  $r=0.52$ , respectivement (Figure 145).

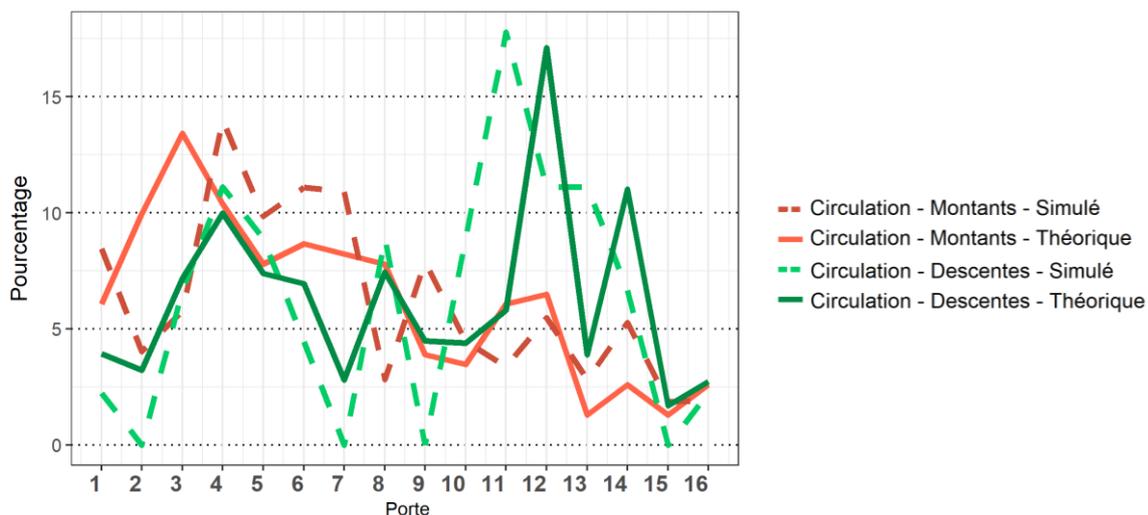


Figure 145. Flux montants et descendants, par porte, BFM

Les valeurs de « montants », par zone, corrént bien avec la densité mesurée en réel sur le quai, et ceci par zone. Le coefficient de corrélation est modéré,  $r= 0.56$ .

Le choix des portes par les montants est une résultante directe de la répartition sur le quai. Comme cette dernière a été validée, cela conduit à des quantités de montants par porte, semblables aux valeurs empiriques. Il est à noter qu'après s'être positionné sur le quai, le choix des agents, par rapport aux portes, se fait selon le principe du moindre effort (porte la plus proche et la plus visible). Ces résultats confirment, que ce mode de choix est valide, même s'il existe d'autres modes (i.e. choix entre deux portes adjacentes selon la porte la moins chargée, etc.) qui n'ont pas été implantés dans le modèle pour ces simulations.

Dans la Figure 146, sont représentées les boîtes à moustaches avec les valeurs médianes et l'écart interquartiles. On remarque que ces quantités ont un plus grand écart-type pour les premières

portes, qui correspondent vers les premières zones du quai. Cela nous rappelle la variabilité de la motivation « *Arrivée* » qui présente une étendue interquartile de 13 mètres.

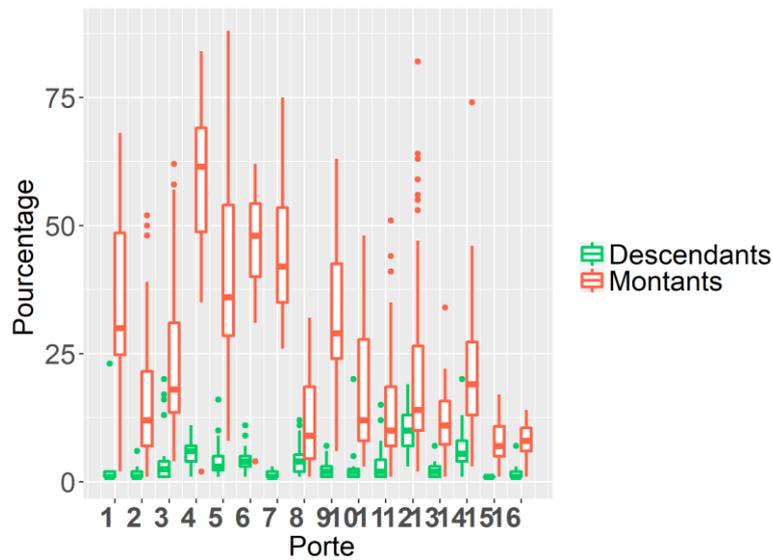
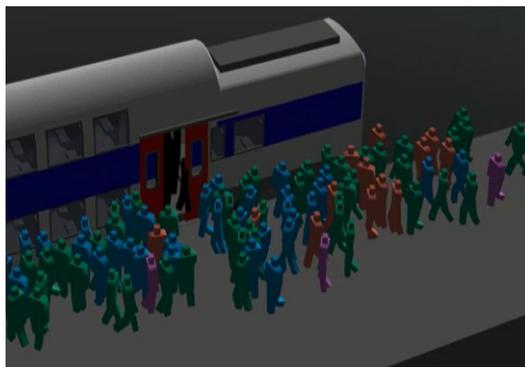


Figure 146. Variabilité des quantités des montants et descendants par porte

### 6.1.5.3.3 Les comportements des montants

#### Se rapprocher du train

Les montants n'ont pas d'idée précise sur la position des portes et de la variabilité de longueur des trains. Ainsi, ils estiment cette position à l'approche du train, à la décélération, ils se repositionnent et ils se réajustent s'ils sont dépassés par le train (Figure 147.a). Ainsi, on dispose d'une distribution de montants assez dispersées et qui se condense (Figure 147.b) en « *V inversé* » une fois que le train s'arrête et que les portes s'ouvrent. Ces dispersions créées par l'incertitude sur la position du train, sont suivies d'une concentration autour des portes. Cela a bien été observé dans la réalité (Figure 147 a.2 et b.2).



(a.1) Simulé



(a.2) Réel



(b.1) simulé

(b.2) Réel

Figure 147. Rapprochement des agents des portes lors de la décélération et réajustement lors de l'arrêt du train

**Normes contextuelles : « Laisser descendre avant de monter »**

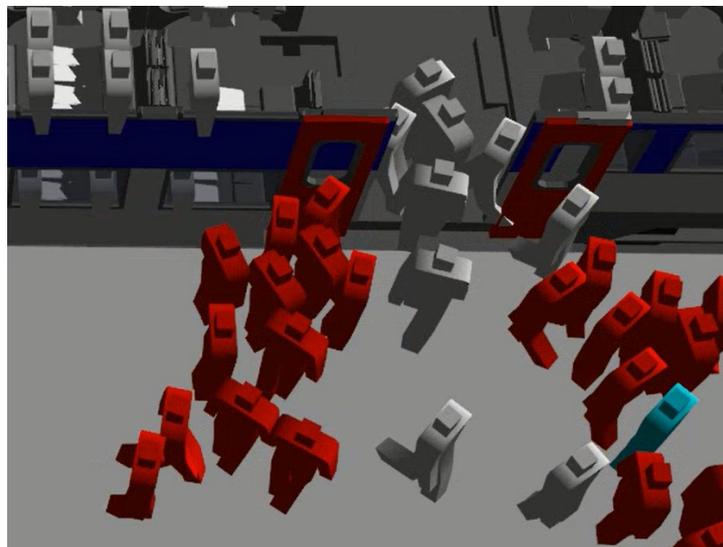


Figure 148. Positionnement en « *V inversé* » pour laisser descendre

Au moment de l'arrêt du train, les agents se regroupent autour des portes de manière à former un « *V inversé* » (Figure 148). Ils se mettent de part et d'autre des portes dans l'attente de la fin de flux de descente, dès que ce dernier s'arrête, le flux de montée s'engage. Ce positionnement en « *V inversé* » a été observé dans le réel et décrit dans la page 178 (Delta avant l'ouverture des portes). La simulation reproduit très bien cette norme contextuelle.

**Scénarios comparatifs**

Nous exécutons une série de mesures comparatives entre deux conditions (i) Largeur de porte : porte large et étroite (ii) disparition ou non des agents lors de franchissement de la porte (ce qui se passe après le franchissement n'est plus simulé).

La largeur de porte sert à tester les deux conditions des portes étroites des voitures motrices (1300 mm) et des remorques (1800 mm) qui existent naturellement dans les rames. Il a été observé, qualitativement, une diminution de la capacité des portes avec la réduction de la largeur.

La disparition des agents montants (nommé *killer*) lors du franchissement des portes va nous permettre d'apprécier les effets de ralentissement causés, par les personnes constituant le flux de devant qui se déplace à l'intérieur du train.

A travers ces mesures, nous distinguons clairement l'effet de la largeur de la porte (en condition normale : « *sans Killer* »). En effet, le temps de montée moyen pour une porte de 1300 mm passe de 0.86 à 0.67 pour 1800 mm. Les temps de descente est globalement plus diminué, pour une porte de 1300 mm, il passe de 0.85 à 0.6 pour 1800 mm (voir Figure 149 et Tableau 27).

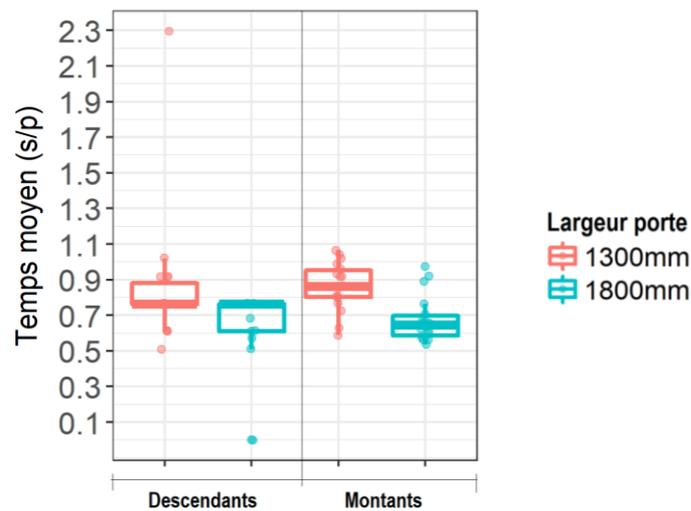


Figure 149. Valeurs moyennes de temps (s/passager) de « *montée* » et « *descente* » selon deux largeurs de portes (1300 mm et 1800 mm), en simulation

En testant la condition « *Avec Killer* », nous distinguons clairement des baisses pour les deux largeurs. Respectivement, il y a une réduction de 19% pour les « *1300 mm* » et 21% pour « *1800 mm* » pour la condition « *Avec Killer* » (Figure 150).

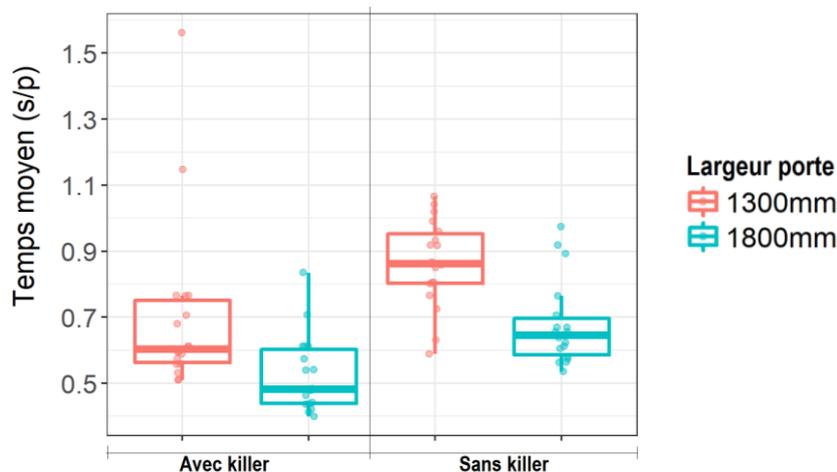


Figure 150. Valeurs moyennes de temps (s/passager) de « *montée* » selon deux largeurs de portes (1300 mm et 1800 mm) et deux conditions « *Avec Killer* » et « *Sans Killer* », en simulation

Pour les « *temps de montée* », nous avons des effets significatifs de la largeur de porte ( $\chi^2(1)= 22.5, p<0.001$ ), du « *Killer* » porte ( $\chi^2(1)= 13.8, p<0.001$ ) et un effet marginalement significatif de la

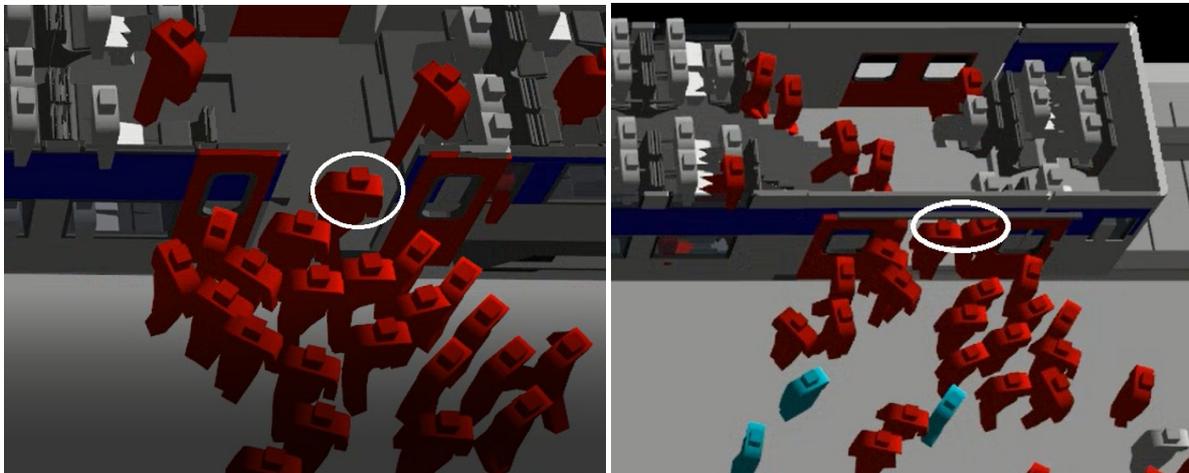
« quantité de montants » ( $\chi^2(1) = 3.2, p=0.07$ ). Le post-hoc de contraste est significatif pour les comparaisons des « portes courtes avec Killer » versus « portes courtes sans Killer » ( $p < 0.01$ ) associant une pente négative. Il en est de même pour les comparaisons des « portes longues avec Killer » versus « portes longues sans Killer ». Ce qui veut dire que le Killer contribue à l'accélération des vitesses et souligne l'effet des présences des autres personnes.

Ces effets sont étudiés pour le « temps de descente ». Pour rappel, les descendants ne sont pas concernés par l'effet du « Killer » car il ne s'applique qu'aux montants dans cette étude de scénarios. Nous avons un effet significatif de la porte ( $\chi^2(1) = 4, p < 0.05$ ) et pas d'effet significatif du nombre de descendants.

Tableau 27. Valeurs moyennes de temps de montée et descente selon la largeur de porte et la condition avec / sans Killer

Largeur porte	1300 mm		1800 mm	
	Avec killer	Sans killer	Avec killer	Sans killer
<b>Temps moyen par personne</b>				
Montées	0.7 (sd :0.26)	0.86 (sd :0.13)	0.53 (sd :0.1)	0.67 (sd :0.1)
Descentes	0.76 (sd :0.03)	0.85 (sd :0.38)	0.75 (sd :0.05)	0.6 (sd :0.24)

Les deux figures comparent les passages des flux dans la Figure 151 (a) une porte étroite et la Figure 151 (b) une porte plus large. On remarque que pour Figure 151 (a) les passages des flux de personnes se font un par un, pour ce qui de la Figure 151 (b), il y a plus de parallélisation de montée ou de diminution de l'espace entre les montants.



(a) Porte étroite ; 1300 mm

(b) Porte plus large ; 1800 mm

Figure 151. Capacité des portes de différentes largeurs et parallélisation des flux

Ceci est en cohérence avec les données théoriques de la littérature. Pour Fernandez et al. [FER 11], les valeurs obtenues sont telles que suit dans le Tableau 28 :

Tableau 28. Tableau comparatif des temps moyen (s/passagers) de la littérature, des expérimentations faites à BFM et des valeurs obtenues dans la simulation

	Fernandez et al. [FER 11]		Données empiriques BFM		Données simulées	
	800mm	1600mm	1300 mm	1800 mm	1300 mm	1800 mm
<b>Montées</b>	1.4 (s)	0.79 (s)	1.1 (s)	0.82 (s)	0.86	0.67
<b>Descentes</b>	1.1 (s)	0.69 (s)	-	-	0.85	0.6

Il est à noter que certaines portes de la même largeur (1800 mm) peuvent faire passer jusqu'à trois flux simultanément, ceci est dû en grande majorité à l'installation de barres métalliques qui divisent et allouent de l'espace uniformément pour trois flux. Par conséquent, les usagers montrent des capacités d'adaptabilité vers l'espace alloué, en exerçant des déplacements transversaux et des torsions corporelles. Les effets des barres métalliques n'ont pas été étudiés à cause de la grande hétérogénéité des rénovations par rames, qui fait que le nombre d'échantillons par un design donné soit très bas pour être étudié statistiquement (i.e. par moment des portes sans barre, avec une seule barre et puis deux barres).

Nous avons mis en évidence deux faits : d'une part, l'impact du nombre des personnes sur le ralentissement des flux de montée (condition *avec* et *sans Killer*). Cette condition est impossible à tester en réalité, la simulation nous a permis d'imaginer ce scénario et l'impact du volume du flux sur le mouvement général.

D'autre part, on a confronté les données de simulation avec les données empiriques (recueillies à BFM et de la littérature) selon deux largeurs de portes différentes. Nos données de simulation sont cohérentes avec les données empiriques, et le phénomène de ralentissement se produit naturellement dans la simulation, et comme dans la réalité, à cause de la largeur insuffisante pour paralléliser les flux de personnes.

#### 6.1.5.3.4 Les comportements des descendants

##### Anticipation de la descente

Les descendants anticipent leurs descentes, majoritairement. Ils arrivent sur la plateforme avant l'ouverture des portes (Figure 152). Il arrive, cependant, d'avoir des descentes tardives (i.e. oubli, distraction, erreur, etc.), et ceci grâce à une fonction aléatoire, tout comme on l'a constaté dans la réalité.

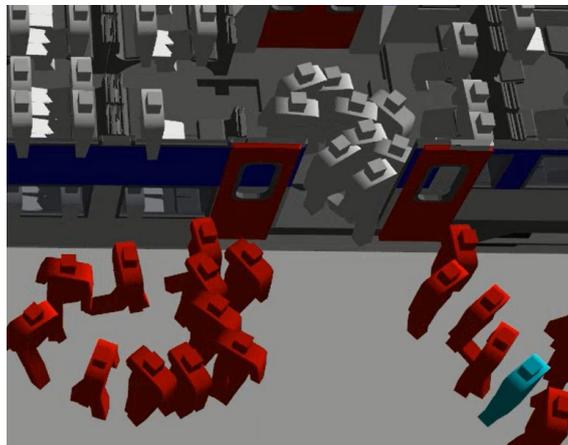


Figure 152. Anticipation des descentes

### Normes contextuelles

Les descendants ont la priorité sur les montants pour engager leur propre flux de descente. Ils se centrent, mais il arrive souvent qu'un des agents essaye de se rapprocher du centre pour diverses raisons (i.e. non perception d'une descente). Tout comme cela se passe dans le réel, les descendants, entament leurs descentes mais continuent toujours de montrer des comportements d'évitement des collisions avec les montants en attente. Avoir la priorité ne signifie pas de passer à travers les personnes qui ne respectent pas la norme recommandée (Figure 153).

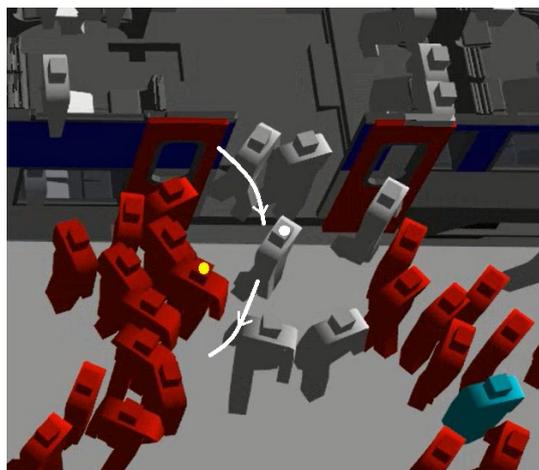


Figure 153. Les descendants contournent les montants qui sont de part et d'autre des portes

Nous avons caractérisé et quantifié les flux de montants et descendants et les avons confrontés aux données empiriques et observées. La simulation reproduit des normes contextuelles (i.e. laisser descendre puis monter, anticipation de descente), des comportements d'auto-organisation (i.e. formation de lignes, *zipper effect*, *shadow effect*), d'évitement, des comportements pouvant induire des dysfonctionnements (i.e. non perception d'une descente implique une montée précoce, descente tardive) et enfin la simulation reproduit l'effet de la largeur des portes sur les flux.

#### 6.1.5.3.5 Mesure des temps d'échanges

Nous mesurons l'étendue des durées d'échanges pour les flux montants et les descendants, et ceci pour chaque porte, à travers les échantillons recueillis. Ces temps s'expriment comme suit : pour les montants, la mesure à partir de la première et de la dernière montée, par porte. Il en est de même pour les descentes.

Globalement, on remarque que certaines portes ont une durée de montée très augmentée avec une faible variabilité (Porte 7 : moyenne 57.4s, sd=2.5). Tandis que d'autres portes sont plus sujettes à de grandes variabilités (porte 14 : moyenne= 50, sd=8.8). D'autres portes présentent de faible temps d'échanges et de variabilité (Porte 16 : moyenne= 5.7, sd=3). Voir Figure 155.

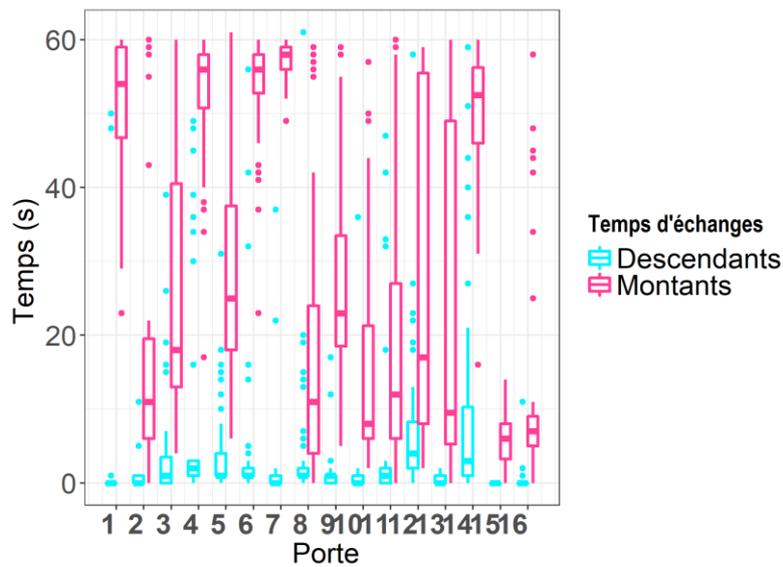


Figure 154. Temps de montée et de descente, par porte

Ces mesures englobent donc, pour les flux de montants, des flux continus et des flux sporadiques. Il est donc difficile de comprendre l'origine de ces variabilités. En premier temps, la représentation graphique suivante nous permet de vérifier les allures des temps, des mouvements (i.e. montées, descentes) et si ces temps sont continus (i.e. points successifs ou longue séparation après la prochaine montée) (Figure 155). Voir le graphique entier dans la Figure Annexe 17. Cette représentation nous permet de comparer le comportement des flux au niveau de chaque porte, à travers plusieurs échantillons.

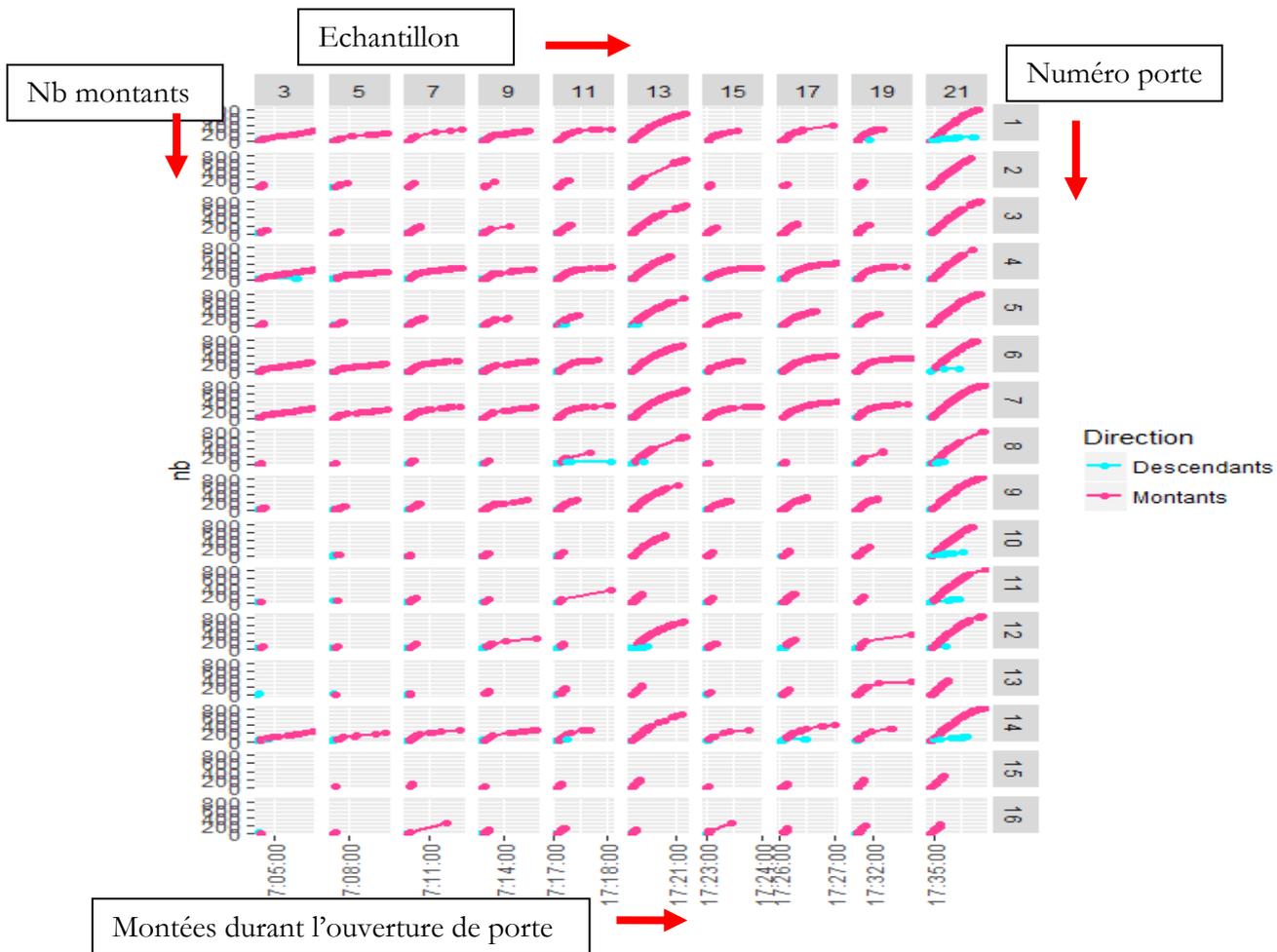


Figure 155. Temps de montée et nombre, par porte (1,16) par échantillon.

**Analyse des temps de montée et de descente dans un flux continu**

Nous procédons à une analyse comme suit : pour les temps de montée, nous enlevons toutes les montées qui n'appartiennent pas à un flux continu. Et ceci en comparant le dernier passage avec le précédent, par porte et par échantillon. Si cette durée dépasse les 3 secondes, l'on considère que le flux devient sporadique. On remarque que les valeurs sont moins importantes lorsque la dispersion est moindre (Figure 156).

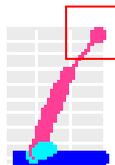


Figure 156. Flux continu suivi de montées dispersées (sporadique), Porte 8 échantillons 21

Pour les flux de descendants, nous gardons les descentes tardives car les effets de ces dernières sur la diffusion des flux de montée seront démontrés à travers les temps d'échanges.

L'allure de la Figure 157, nous rappelle la répartition des montants et des descendants.

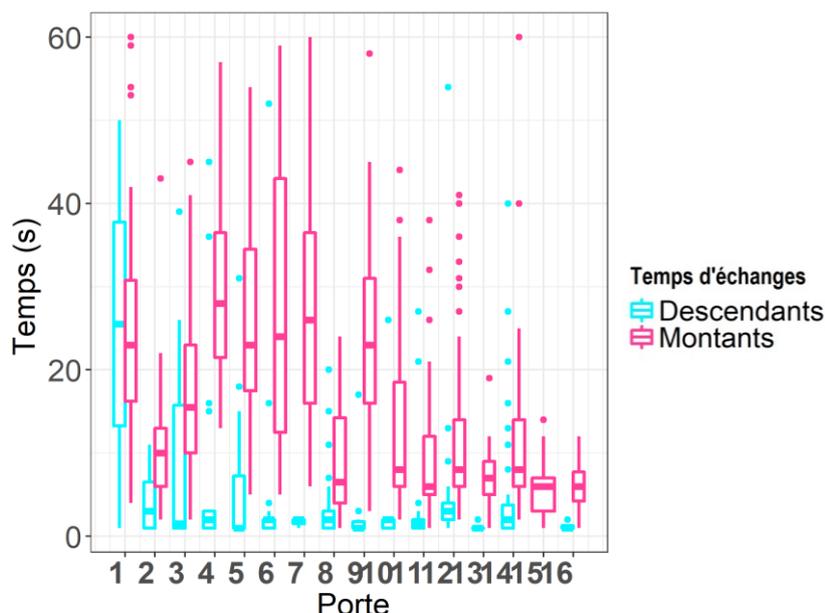


Figure 157. Sélection des flux exclusivement continus (moins de 3 secondes de séparation entre deux personnes)

A partir de ces informations, on peut déduire le temps mis par une personne pour effectuer son passage et les effets des passages tardifs sur les temps d'échanges.

En ce qui concerne les mesures des temps de montée et de descente, on relève des effets significatifs des variabilités des temps de montée et de descente par rapport à la porte ( $\chi^2(1)=19,7$ ,  $p<0.001$ ) et le nombre des personnes ( $\chi^2(1)=3367$ ,  $p<0.001$ ).

En ce qui concerne les vitesses des personnes, on relève des effets significatifs selon la porte ( $\chi^2(1)=7.8$ ,  $p<0.01$ ) et un effet marginalement significatif selon le type de mouvement (montée ou descente), ( $\chi^2(1)=3.1$ ,  $p=0.07$ ). Le post-hoc contrastant les vitesses de descente versus montée est significatif ( $p<0.05$ ) et associé à une pente négative. Cela veut dire que les vitesses de descente sont plus rapides. Nous attribuons l'accélération des vitesses de descente à un facteur clé : le nombre peu élevé de descentes à BFM, implique une diffusion plus rapide des descentes. Il y a peu de personnes devant les descendants donc ces derniers ont plus de mouvements libres. Ceci est une explication qui vient en analogie avec l'expérience des diffusions des flux montants « Avec Killer » et « Sans Killer » (Voir Scénarios comparatifs : page 218).

En ce qui concerne l'effet de la largeur des portes, nous relevons des effets significatifs pour les montants ( $\chi^2(1)=24,9$ ,  $p<0.001$ ) et non significatifs pour les descendants ( $p>0.05$ ). Le post-hoc contrastant les vitesses de montée pour les deux largeurs de porte 1300 mm – 1800 mm est significatif ( $p<0.05$ ) et est associé à une pente positive pour les montées. Cela veut dire qu'il y a augmentation des vitesses selon les types des portes, pour les montées.

Pour ce qui est du temps d'échange global (premier mouvement et dernier mouvement), on teste l'influence des montées et descentes tardives sur le prolongement de ce temps. On relève des effets significatifs de ces retards ( $\chi^2(1)=967$ ,  $p<0.001$ ). De plus, un effet significatif du nombre total des passagers sur ce temps ( $\chi^2(1)=423$ ,  $p<0.001$ ) ainsi que par porte ( $\chi^2(1)=200$ ,  $p<0.001$ ).

En catégorisant ces retards par type de mouvement (retards concernent le flux de montée ou de descente), nous étudions l'influence de chaque type de retard.

- par rapport à la situation « sans retard » dans les deux sens, l'effet d'une montée tardive est significatif ( $p < 0.001$ ) et est associé à une pente négative, égale à -27.11.
- par rapport à la situation « sans retard » dans les deux sens, l'effet d'une descente tardive est significatif ( $p < 0.001$ ) et est associé à une pente négative égale à -7.
- par rapport à la situation « sans retard » dans les deux sens, l'effet de descentes et de montées tardives est significatif sens et est associé à une pente négative égale à -28.5.

Pour ces trois résultats, cela signifie que les temps d'échange sont moins longs sans retard. Les effets de direction (montées ou descentes) semblent être cumulatifs (augmentation de la valeur de la pente).

- l'effet de montée tardive par rapport à une descente tardive est significatif ( $p < 0.001$ ) et associé à une pente positive égale à 20.2. C'est-à-dire, que les temps d'échanges sont prolongés par l'effet de montées tardives que de descentes tardives

### Qu'est-ce qui crée la sporadicité ?

Nous recueillons pour chaque porte les valeurs des montées tardives qui sont espacées à plus de 3 secondes de la dernière montée.

Le khi-2 est significatif ( $\chi^2(15) = 110.34, p < 0.001$ ), cela veut dire que la répartition du nombre de montées/descentes tardives n'est pas homogène. Le post-hoc contrastant les portes entre-elles montre des effets significatifs de diminution ou d'augmentation des arrivées tardives, selon le contraste étudié (Voir plus d'information dans Tableau Annexe 9).

Cette variable est difficile à étudier car elle réunit l'aspect proximité des entrées sur le quai et la distance à parcourir pour arriver à la porte, ainsi que la position de la personne à l'arrivée du train.

Le post-hoc de contraste, porte par porte, est significatif ( $p < 0.05$ ), il nous oriente vers des effets de la proximité des entrées sur le quai, ainsi que la porte la plus proche perçue visuellement. Par exemple, le post-hoc de contraste entre la porte 5 et la porte 6 est significatif ( $p < 0.01$ ) et associe une pente négative. Cela est normal dans la mesure où l'orientation des escaliers à ce niveau mène directement vers la perception de la porte 6 (pas d'exploration de ce qui se passe en arrière). De même pour le post-hoc de contraste entre la porte 8 et la porte 9 est significatif ( $p < 0.01$ ) et associe une pente positive. En effet, la porte 8 est bien visible est la plus proche dans ce cas-là.

Par ailleurs, nous avons une augmentation nette de la porte 14 (Figure 158) par rapport aux portes 7, 4, 5, 6, 9 et 10 (Voir plus d'informations dans Tableau Annexe 9). Cet effet n'a pas été investigué davantage.

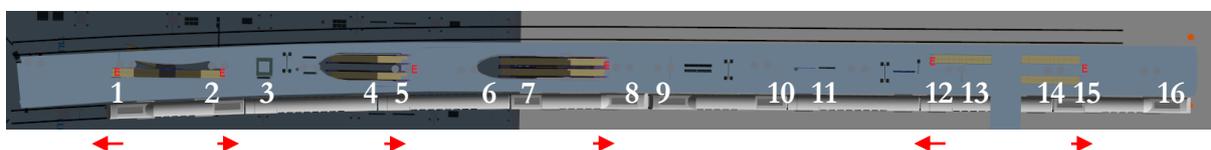


Figure 158. Position des portes, par rapport aux entrées et leurs directions - BFM

Les temps d'échange sont ainsi fonction du nombre des personnes qui est la conséquence de plusieurs motivations et de préférences de personnes, sur le quai. Ce nombre augmente les temps de passage quai-train et train-quai. Le temps de passage ou vitesse est aussi influencé par des contraintes architecturales comme la largeur d'une porte. Cette vitesse sera ralentie pour des largeurs moins importantes et, ainsi, augmente le temps de passage quai-train et train-quai. Les temps d'échanges sont, par moment, prolongés, d'une manière entrecoupée en fonction de propriétés des portes et de leurs positions respectives par rapport au quai.

En comparaison avec les données recueillies à BFM, nous reprenons les portes étudiées en vue de les comparer avec les données de simulation (Tableau 29) :

Tableau 29. Comparaison entre des temps de montée à BFM et en simulation

P	Données observées à BFM						Données simulées		
	Config niveau	Nb flux préférence	Temps montée pures (s)	Nb montants	Temps/Personne (s/p)	Descente tardive	Nb moyen montants	Temps/Personne (s/p)	Descente tardive
13	N1=Bas	6	9	12	0.75	Oui	11.7	0.57	Non
13	N1=Bas	7	22	27	0.81	Oui			
5	N1=Haut	6	24	34	0.70	Non	24.5	0.59	Non
5	N1=Haut	8	24	25	0.96	Oui	36.5	0.57	Oui
3	N1=Haut	9	23	23	1	Oui	19	0.7	Oui
3	N1=Bas	9	26	28	0.93	Non	14.5	0.76	Non
2	N1=Haut	9	22	20	1,1	Non	13.4	0.7	Non

■ Variables non testées en simulation

Globalement, les temps de montée par personne sont plus courts qu'en réel. Les paramètres comme le nombre des personnes et les descentes tardives ne permettent pas de faire une étude comparative avec les données de BFM. On a établi auparavant, une hypothèse selon laquelle la configuration de la rame et la position de l'étage bas créent des flux de « préférence » et d'« aisance ». Cette variable est englobée dans des préférences à l'intérieur du train (i.e. préférence étage) qu'on n'a pas modélisées dans la présente étude. Il est possible que l'introduction de cette variable puisse contribuer au prolongement des temps de montée et par la suite de l'échange. De plus, l'une des difficultés à laquelle on est confronté dans l'étude des échanges quai-train est le nombre faible d'échantillons.

#### 6.1.5.3.6 Le conducteur

Dans les précédentes analyses de la simulation, deux conditions doivent être remplies, pour la décision de fermeture de portes : (i) le temps théorique d'arrêt est atteint (ii) il n'y a plus de trois personnes sur la bordure du quai (partie directement adjacente à la bande podotactile), et ceci par wagon.

Il est à noter que ces temps d'arrêt restaient invariants avec cette condition. Dans 100% des cas les temps d'arrêt sont respectés (Ligne bleue, Figure Annexe 17). Cela signifie, que selon cette règle,

les temps théoriques prévus d'arrêt respectés seront intégralement respectés en simulation. Dans ce qui suit, nous apportons des réflexions complémentaires sur l'influence de la prise de décision du conducteur, sur le temps d'arrêt.

### 6.1.5.3.7 Les temps d'arrêts

Nous disposons d'une vue globale des temps d'arrêts, qui a été étudiée en plusieurs parties. D'un côté, les temps de montée et descente continus, et d'un autre côté, des analyses sur les flux additionnels non continus. On implémente un caractère hypothétique du comportement du conducteur qui est facilement possible de modifier, comme par exemple en vue de tester plusieurs comportements de conducteurs et leurs impacts sur les temps d'arrêts.

Pour cela nous lançons une série de simulations avec la règle suivante : « *Nb personnes* » est une variable mesurée sur un périmètre de 2 m du centre de la porte. On fait varier ces valeurs selon des scénarios conditionnels et on mesure le temps d'attente du conducteur, après l'achèvement du temps théorique.

Tableau 30. Scénarios comparatifs de règles comportementales du conducteur. Deux missions étudiées BALI, avec un pic important de montées et DYVI avec une diminution des montées

<b>Nb personnes</b> \ <b>Mission</b>	<b>BALI</b>	<b>DYVI</b>
7-10	0	
7	13s	
6	15s	
5	97s	0
4	97s	0
3	97s	0
2	110s	20s

#### ■ Variables non testées en simulation

Dans le Tableau 30 on remarque que plus le « *Nb personnes* » augmente, plus les temps d'attente diminuent. Cela est normal car l'on ne dispose pas d'une aussi grande densité par porte, et ceci à cause de la grande variabilité de charge par porte. Pour la mission « *BALI* », pour « *Nb personnes* = 2 », on a un temps d'arrêt prolongé de 257 % de la durée prévue. Pour « *Nb personnes* = 3 ou 4 ou 5 », on a un temps d'attente prolongé de 238 % de la durée prévue. Pour « *Nb personnes* = 6 ou 7 », on a un temps d'attente prolongé de 121 % de la durée prévue. Cela souligne que cette variabilité ne se joue qu'à quelques personnes de plus ou de moins par porte. C'est la résultante directe des stratégies de positionnement sur le quai.

D'un autre côté, on a fait un comparatif entre deux missions qui présentent des taux de montées différents. Dans cette simulation, la mission DYVI montre une chute du nombre de montants, conformément aux caractéristiques des flux d'un train à un autre (voir les effets d'augmentation des montées sur la Figure 140). C'est cette chute des nombres de personnes montantes, au niveau de toutes les portes, qui atténue l'effet des conditions testées. Ainsi, la variabilité des nombres de personnes et son effet, par porte, sont moindres.

On dispose de temps d'arrêt des trains à quai, pour BFM. Mais, la comparaison de ces données simulées avec ces données n'est pas appropriée. Ces temps d'arrêts réels sont la résultante d'une

prise de décision humaine et de ce que permet le système ferroviaire. Pour cela, il est nécessaire de procéder à une expérimentation présentant la vue globale sur le quai (et surtout aux alentours des portes), l'expression du choix du conducteur ainsi que la possibilité technique pour démarrer le train (i.e. ouverture du signal).

Nous obtenons, comme coefficient de corrélation pour la motivation « *arrivée* » de  $r=0.56$ , pour « *entrée* » un lien fort  $r=0.8$  et pour « *moins de monde* » nous obtenons un lien fort de  $r=0.6$ . Pour ce qui est de la motivation « *Train* » nous obtenons un lien inverse faible de  $r=-0.2$ . A travers nos analyses, nous n'avons pas pu valider cette motivation avec l'occupation dans le train. Statistiquement, nous disposons d'indicateurs concernant l'influence des montants, descendants et occupation sur le quai. Cette motivation a la plus faible représentativité parmi celles qui sont étudiées (7.5%), dans la présente étude, elle n'a pas été investiguée davantage.

Globalement, les motivations de positionnement sur le quai sont valides pour « *arrivée* », « *moins de monde* » et « *entrée* ». La densité résultante du cumul des usagers et de leurs motivations corrèle à 71% comparant à la densité réelle à BFM, ce qui représente une forte corrélation.

La circulation des trains montre un aspect d'augmentation suivi d'une chute, pour les montants. Ce pattern est presque répétitif à travers le temps et correspond bien à l'allure des courbes des montants, en réel. En ce qui concerne les nombres de « Montants » et « Descendants » réels et simulés, par porte, ils présentent un coefficient de corrélation modéré de  $r=0.51$  et  $r=0.52$ , respectivement (Figure 145). Les montants sont des personnes qui choisissent la porte la plus proche (principe du moindre effort), et se trouvent déjà dans une position sur le quai, résultante de leur motivation.

Concernant les comportements dans le train, le choix des sièges dans la simulation se base sur la proximité.

Pour ce qui des comportements de navigation, d'évitement, des normes de politesse. La simulation reproduit, grâce à des processus dédiés pour ces comportements, des phénomènes observés empiriquement (i.e. *zipper effect*, *shadow effect*, création de lignes, positionnement en V inversé, etc.) qu'on a évoqué dans la section « Echanges quai-train ». Nous avons aussi confronté les données quantitatives empiriques avec les données simulées (nombre de montants et descendants, vitesse de montée, vitesse de descente, temps d'échange) et caractérisé l'aspect sporadique des flux dans certaines portes et son implication dans le prolongement des montées et des descentes.

Nous avons globalement des vitesses de montée cohérentes avec les données empiriques et de la littérature avec une légère diminution de cette vitesse en simulation (Tableau 28). Cela reste à investiguer quant à l'influence des choix à l'intérieur du train (i.e. préférence étage, flux de préférence versus aisance et croisement entre ces derniers) sur les personnes derrières.

Pour les temps d'attente du train, nous avons simulé, à travers des scénarios comparatifs, divers comportements du conducteur, sur la base du nombre de personnes (variable) dans un périmètre de 2 mètres du centre de la porte. Cette série de simulations souligne l'effet des disparités et différences de nombre de montants par porte, qui se joue à une personne près. Nous soulignons

aussi, des temps de chute des flux caractéristiques de BFM et ses effets sur la réduction des temps d'arrêt.

Cette démarche progressive permet un travail complémentaire sur le comportement du conducteur et de la signalisation sur la ligne étudiée afin d'aboutir à une vision quasi-complète des temps d'arrêts. Globalement, les données de simulation sont très satisfaisantes (Tableau 31), nous validons le modèle sur BFM.

Tableau 31. Récapitulatif des effets testés sur la simulation, à BFM

Variable - comportement	Simulé vs Réel		
Entrée	r=0.8		
Moins de monde	r=0.6		
Train	<b>r=-0.2</b>		
Arrivée	r=0.56		
Densité	r=0.71		
Allure des montants en pic	Oui		
Nombre montants total	Légèrement supérieur		
Nombre descendants total	Oui		
Montant par porte	r=0.51		
Descendant par porte	r=0.51		
Temps moyen de montée (s/p)		<b>Simulé</b>	<b>Réel</b>
	1300 mm	0.79	1.1
	1800 mm	0.71	0.82
Temps moyen de descente (s/p)		<b>Simulé</b>	<b>Réel</b>
	1300 mm	0.7	
	1800 mm	0.61	
Effet du nombre des usagers sur le temps d'échange	Oui		
Effet de largeurs de porte	Oui		
Influence des flux de préférence versus aisance	<b>Non testé</b>		
Influence de la disposition des étages	<b>Non testé</b>		
Sporadicité	Oui		
Comportement du conducteur	<b>Données insuffisantes</b>		
Temps d'arrêts	<b>Nécessite une connaissance du comportement conducteur + signalisation du système ferroviaire.</b>		
Zipper effect	Oui		
Création de ligne	Oui		
Shadow effect	Oui		
Comportement grégaire	Existe mais non déployé pour cette étude		
Stop & go, turbulence, freezing by heating, faster is slower	<b>Non testé</b>		

■ Variables testées sans effets significatifs

# Chapitre 2

## 6.2 Le transfert à Paris Nord

### 6.2.1 Le choix de la gare

L'objectif est maintenant d'observer le modèle de BFM sur une autre gare, ici la Gare du Nord. Par rapport à BFM, la Gare du Nord présente deux possibilités de quais : le sens Sud et le sens Nord. Le sens Nord présente un accroissement de la moyenne du nombre de montants et de la moyenne de descendants, et à peu près une même moyenne d'occupation. Le sens Sud, en revanche présente un accroissement de la moyenne du nombre de descendants et une diminution de l'occupation (Tableau 32). Nous choisissons donc de maintenir la variable « nombre de montants », d'introduire une augmentation du nombre de descendants, et un allègement de l'occupation et ce en choisissant le sens Sud.

Tableau 32. Etude comparative des deux gares : BFM (RER C, sens Sud) et Paris Nord (RER D, Sens Sud et Nord)

	<b>BFM- RER C - EF</b>	<b>PN – RER D – 41 Nord</b>	<b>PN – RER D- 42 Sud</b>
<b>Heure de pointe</b>	17h -20h	17h-20h	17h-20h
<b>Typologie voyageurs</b>	Fin de journée Domicile	Fin de journée Domicile	Fin de journée Domicile
<b>Nombre montants</b>	<b>M=330</b> (SD=114)	<b>M=431</b> (SD=191)	<b>M=351</b> (SD=120)
<b>Nombre descendants</b>	<b>M=59</b> (SD=29)	<b>M=333</b> (SD=136)	<b>M=352.8</b> (SD=191.2)
<b>Occupation (après échange)</b>	<b>M=888</b> (SD=314)	<b>M=854</b> (SD=345)	<b>M=605</b> (SD=245)
<b>Changement voie</b>	Régulièrement	Inversion B et D en situation dégradée	Inversion B et D en situation dégradée
<b>Type quai</b>	Central	Central	Central
<b>Provenance flux</b>	Flux en provenance des accès quai	- Flux en provenance des accès quai - Du RER B en face	- Flux en provenance des accès quai - Du RER B en face
<b>Matériels roulants</b>	5600-8800- <b>20500</b> -20900	<b>20500</b> (normale hybride, recomposée)	<b>20500</b> (normale hybride, recomposée)
<b>Nombre de voiture</b>	4V (hors heure de pointe) 6V-8V (heure de pointe)	5V (hors heure de pointe) 10V (heure de pointe)	5V (hors heure de pointe) 10V (heure de pointe)
<b>Nombre de portes par voiture</b>	2	2	2

**Caractéristiques de la ligne :** la ligne D (Figure Annexe 18) comporte au total 3 branches de circulation, elle dessert 59 gares au totale. Nous recueillons plusieurs types de missions dans les

deux sens et allant vers les diverses branches. Certaines de ces missions sont plus fréquentes et d'autres apparaissent spécifiquement aux heures de pointes.

**Caractéristiques des quais :** les quais sont des quais centraux. Pour chaque ligne et direction, plusieurs missions sont desservies.

**Exploitation des voies d'un même quai :** ces quais desservent d'une part le RER D et d'autre part le RER B : quai 41/43 pour le sens Nord et quai 42/44 pour le sens Sud. Ces quais présentent une courbure. Le RER B, constitue une source de flux allant vers le RER D. En effet 15% des flux qui se rabattent sur le RER D proviennent du RER B, sur le quai en face.

**Caractéristiques du matériel roulant :** il existe un seul type de matériel roulant sur la ligne D de la famille des Z2N: les Z20500. Ces matériels roulant de la ligne D présentent une autre particularité. Il existe plusieurs longueurs de remorques (courtes ou longues). Ce qui donne pour une seule rame (5V) plusieurs combinaisons différentes. Ces différentes combinaisons nous confrontent encore une fois à la variabilité de la longueur du train (Tableau Annexe 7) et la difficulté de situer les emplacements des portes sur le quai, à l'arrivée du train.

Tout comme les Z20500 de la ligne C, ces trains sont des trains à deux niveaux, l'agencement des sièges est de type 2+3. L'avantage du choix de la ligne D est que nous conservons les propriétés du matériel roulant sur la C.

## 6.2.2 Expérimentation et recueil de données

Il est temps maintenant de regarder ce que donne le modèle de BFM sur la Gare du Nord. Nous avons donc procédé aux mêmes recueils d'informations que pour BFM pour la Gare du Nord. Ces informations vont nous permettre de pouvoir valider ou invalider le modèle et d'étudier plus avant sa transférabilité.

### 6.2.2.1 Expérience I : phase quai

#### 6.2.2.1.1 Expérimentation I.1 : Questionnaire de motivations de positionnement sur le quai

##### 6.2.2.1.1.1 Problématique et hypothèses

**Problématique.** Nous constatons des hétérogénéités de distribution des voyageurs sur le quai. Nous souhaitons investiguer cette répartition. En effet, il est peu probable que ces données soient transposables. Elles sont dépendantes des gares desservies par les trains. Les lignes B et D ne desservant pas les mêmes gares, il y a donc peu de chances que les données soient identiques.

**Hypothèse.** La répartition des voyageurs sur le quai est hétérogène et résulte de motivations différentes. Nous procédons à une campagne de recueil de données subjectives via des questionnaires afin d'obtenir des informations sur le choix du lieu d'attente des usagers.

##### 6.2.2.1.1.2 Méthode

###### **Participants**

Pour l'étude de motivations de positionnement sur le quai, il faut choisir des montants en attente sur le quai (voir questionnaire dans Figure Annexe 16). Le nombre total recueilli est de 297

personnes sur le quai (151 femmes et 143 hommes avec une moyenne d'âge de 37.7 (Écart-type= 13.4)).

### Matériel

Questionnaire sur les caractéristiques individuelles, contextuelles et les motivations.

### Procédure

Nous avons procédé à une campagne de recueil de données subjectives via des questionnaires. L'objectif de ces questionnaires est d'obtenir des informations sur le choix du lieu d'attente des usagers, sur la longueur du quai 42 (RER D). Quatorze zones sur le quai ont été identifiées, discernables facilement pour l'enquêteur, afin de pouvoir recueillir dans chaque zone des réponses aux questionnaires (Figure 159).

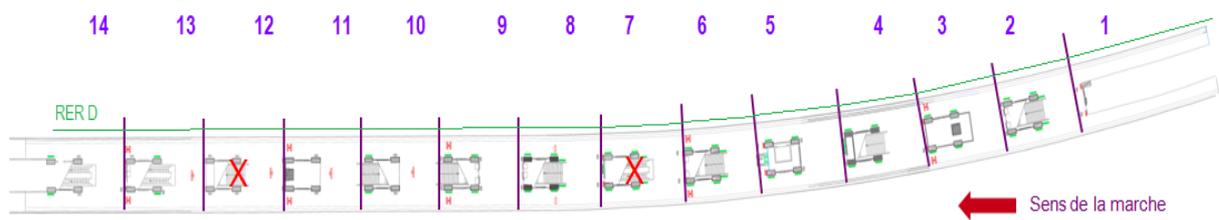


Figure 159. Identification de quatorze zones sur le quai 42/44 du RER D

### Recueil et traitement de données

Comme pour BFM, on observe des intentions qu'on a catégorisées en motivations. Nous obtenons 62.3% de motivation « Arrivée », de 3.6% de motivations « Train » et 23.6% de motivation « Quai ». Les sous-motivations de « Quai » se répartissent comme suit : 10.7% pour « Entrée », 6.7% pour « Moins de monde » et 6.2% de personnes qui se positionnent par rapport aux autres composantes du quai : sièges assis, infogare, point de rendez-vous, etc. Voir Figure 160.

#### 6.2.2.1.1.3 Résultats

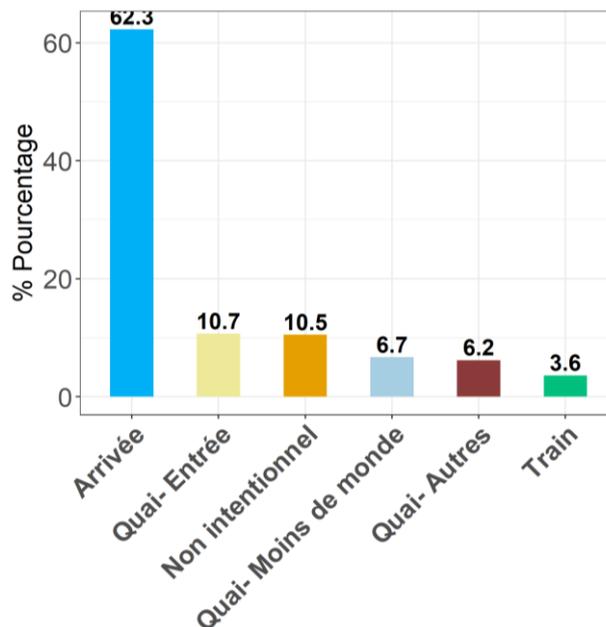


Figure 160. Motivations de positionnement sur le quai de RER D de Paris Nord

Nous observons la même répulsion entre les motivations « *Arrivée* » et « *Quai* » qui s'exprime par un coefficient de corrélation  $r=-0.91$  (Figure 161).

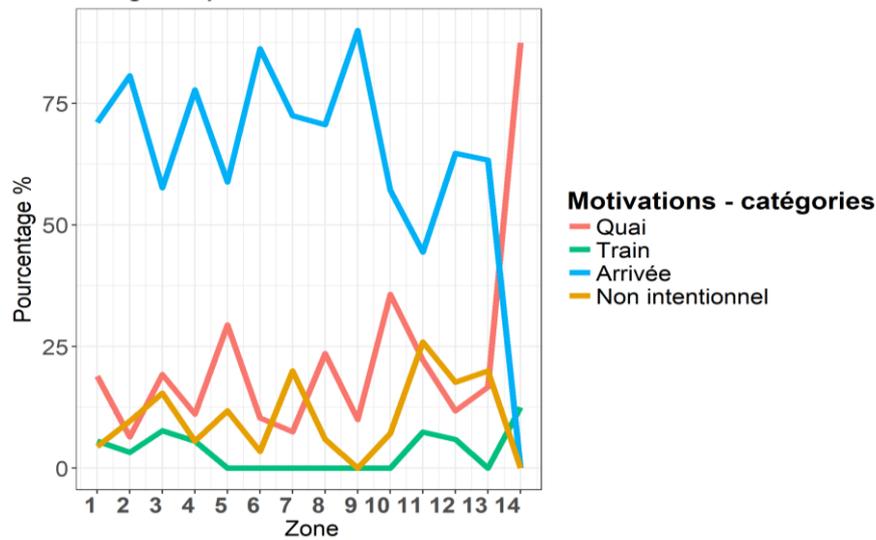


Figure 161. Evolution des motivations tout au long du quai de PN

#### 6.2.2.1.1.4 Discussion

Dans cette gare, nous observons une augmentation de la motivation « *Arrivée* » et une diminution des autres motivations. La « *non intentionnalité* » est plus importante qu'à BFM (2.5%). Nous n'avons pas observé de nouvelle motivation pour cette gare. Nous disposons des mêmes connaissances qu'à BFM. Nous ne disposons pas d'une connaissance sur la cause de « *non intentionnalité* » et la catégorie « *Quai- autres* » regroupe des comportements directement liés au positionnement des infogares et des sièges assis de chaque zone. Pour le reste des motivations, elles représentent 83.3% du total des comportements sur ce quai. La simulation à PN se basera alors sur ces motivations qui sont assez représentatives. Ainsi, nous disposons de 81.4% de motivation « *Arrivée* », de 3.6% de motivations « *Train* », de 11.8% pour « *Entrée* », 3.8% pour « *Moins de monde* ».

#### 6.2.2.1.2 Expérimentation I.2 : Comptage aux entrées en gare

##### 6.2.2.1.2.1 Problématique et hypothèse

**Problématique.** Les personnes de la catégorie « *Quai – Entrées* » rapportent qu'ils se positionnent juste à côté de l'entrée empruntée. Afin de pouvoir valider cette catégorie, nous devons disposer du nombre de personnes par entrée sur le quai. Là encore, il y a très peu de chances que ces données soient identiques depuis BFM. Il est donc important de procéder à un nouveau recueil.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que les catégories « *Quai – Entrées* » se positionnent à côté des entrées. Nous prévoyons une corrélation positive entre nos données de comptage aux entrées et notre catégorie « *Quai – Entrées* ».

### 6.2.2.1.2.2 Méthode

#### Participants

Toutes les personnes qui empruntent les entrées vers les quais 42/44. Le nombre total recueilli est de 2542 personnes, qui empruntent les quais 42/44.

#### Matériel

Des compteurs manuels sont utilisés pour comptabiliser le nombre de personnes qui empruntent les quais, pendant 15 minutes.

#### Procédure

Neuf personnes se positionnent à côté des accès descendants vers les quais 42/44 et appuient sur leur compteur à chaque passage.

#### Recueil et traitement de données

Nous confrontons les résultats de comptages réels avec la répartition des motivations « Entrée »

### 6.2.2.1.2.3 Résultats

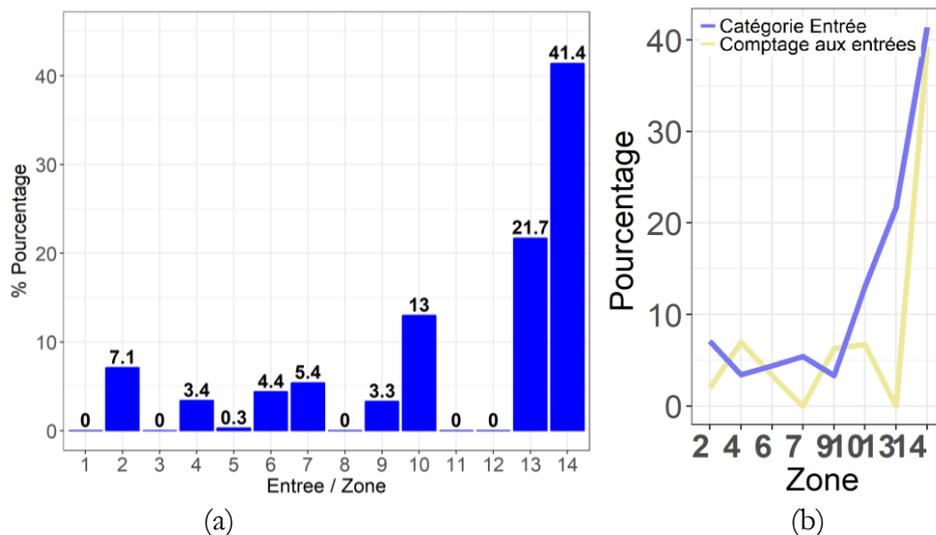


Figure 162. Comptages aux entrées du quai 42/44 (a) Comptage aux entrées (b) Comptages versus motivations « Entrée »

Les résultats indiquent que les flux majoritaires proviennent des zones 13 et 14. Il existe une corrélation forte entre les comptages et la catégorie « Entrée »,  $r=0.81$  (Figure 162).

### 6.2.2.1.2.4 Discussion

Les flux proviennent en majorité du côté des zones 13 et 14 en raison de la diffusion des flux des métros RATP (ligne 4 et ligne 5).

On remarque aussi une préférence claire pour les premiers accès qui sont des escalateurs.

Une des limites de ces données est que ces flux ne sont pas propres au RER D, ils vont se diviser (d'une manière certainement pas équivalente) entre les deux RER B et D.

Pour cela, nous récupérons des données de la SNCF concernant cette répartition.

- (i) Pour toutes les personnes présentes sur le quai 42/44 : 40 % vont vers le RER D et 60 % pour le RER B
- (ii) 15 % des flux des descendants du RER B vont aller directement vers le RER D, juste en face. De ce fait, les 40 % englobent déjà 15% du RER B.
- (iii) Nous récupérons le nombre de descendants du RER B, aux heures de pointe et sur 15 minutes, et estimons les 15 % qui vont vers la D.
- (iv) Nous estimons les 40 % du RER D en nombre et déduisons les 15% en nombre.
- (v) Nous aboutissons à la division finale des flux entrants: 31 % vers le RER D et 69 vers le RER B.

### 6.2.2.1.3 Expérimentation I.3 : Comptage sur le quai 42/44

#### 6.2.2.1.3.1 Problématique et hypothèse

**Problématique.** Les personnes de la sous-catégorie « *Quai – Moins de monde* » rapportent qu'ils se positionnent par rapport aux zones les moins denses. Afin de pouvoir valider cette catégorie, nous devons disposer de quantité ou de proportion de personnes par zone du quai. Il n'est pas question cette fois de transférer des paramètres existants mais d'utiliser ces données pour la validation du transfert.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que les personnes de catégorie « *Quai – Moins de monde* » se positionnent par rapport aux zones les moins denses sur le quai.

#### 6.2.2.1.3.2 Méthode

##### **Participants**

Tous les usagers, en attente sur les quais 42 et 44. Le nombre total recueilli est de 275 personnes sur le quai 42 (côté RER D).

##### **Matériel**

Un Smartphone et l'application *Gopro* permettant la visualisation en direct de la scène filmée, pour des ajustements éventuels de postures ou d'angles (le même dispositif pour enregistrer les échanges quai-train, voir Figure 102).

##### **Procédure**

Deux personnes, chacune du côté d'une des deux voies, se déplacent lentement d'une zone à une autre et d'une manière synchrone, en filmant les usagers en attente du prochain train. Chaque personne est équipée de caméra *Gopro* (voir Figure 102). Des opérations de comptages de personnes par zone et par voie sont faites lors du visionnage des enregistrements vidéo.

##### **Recueil et traitement de données**

Nous confrontons les résultats de comptages réels avec la répartition des personnes sur le quai.

### 6.2.2.1.3.3 Résultats

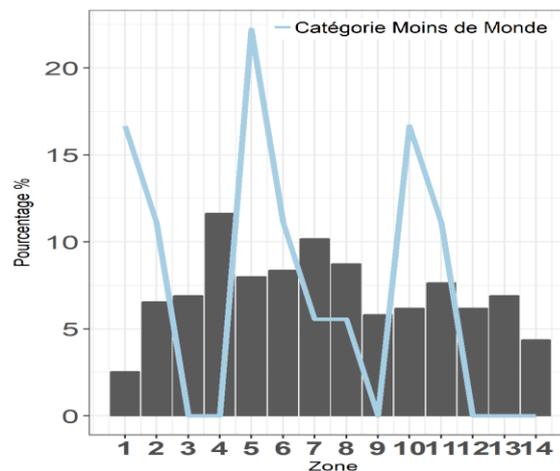


Figure 163. Densité sur le quai et la motivation « Moins de monde »

Le coefficient de corrélation est très faible ( $r=-0.15$ ) entre la charge quai et la motivation « Moins de monde » (Figure 163). Il n'existe pas de relation entre la densité sur le quai et cette motivation à PN.

### 6.2.2.1.3.4 Discussion

Le lien de la motivation « Moins de monde » avec la densité quai ne s'exprime pas sur PN. Nous disposons de peu de données sur cette catégorie ( $N=23$ ). Il est aussi important de mentionner que la densité sur le quai a été prise en une seule fois. La densité est une variable très fluctuante d'une zone à une autre. Il aurait fallu procéder à plusieurs recueils en prenant compte divers instants T ( $T1=$  après départ d'un train,  $T2=$  durée intermédiaire séparant deux trains,  $T3=$  avant l'arrivée d'un train). La densité dont on dispose est sûrement correcte pour un instant donné, mais peut ne pas l'être pour d'autres.

Nous ne prévoyons pas un grand effet sur la transférabilité dans la mesure où cette motivation se présente en proportion plus diminuée qu'à BFM (3.8% à PN par rapport à 10% à PN).

### 6.2.2.1.4 Expérimentation I.4 : Comptage de densité de personnes dans le train

#### 6.2.2.1.4.1 Problématique et hypothèse

**Problématique.** Les personnes de la catégorie « Train » rapportent qu'elles se positionnent sur le quai par rapport à la voiture qui va leur permettre d'avoir plus de chance d'obtenir un siège assis. Il est donc important de connaître les densités des voitures à leur arrivée à PN.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que les personnes de catégorie « Train » se positionnent par rapport aux véhicules les moins denses, lors de leur attente sur le quai.

#### 6.2.2.1.4.2 Méthode

##### Participants

Tous les usagers, dans le RER D, au départ de la gare qui précède Paris Nord, soit « Stade de France – Saint Denis ». Le nombre total recueilli est de 1014 personnes à bord du train, en moyenne.

### Matériel

Un compteur manuel pour compter le nombre de personnes dans le véhicule.

### Procédure

Dix personnes se mettent devant les positions approximatives des portes et montent simultanément dans le RER D et chacun parcourt la voiture en comptant le nombre de personnes ainsi que la répartition « *Haut* » et « *Bas* ».

### Recueil et traitement de données

Nous confrontons les résultats de comptages réels dans le train avec les personnes qui ont la stratégie « *Train* ». Le quai a été rééchantillonné en 20 zones selon les positions portes des trains et ceci afin de faire correspondre la motivation « *Train* » aux comptages dans le train.

#### 6.2.2.1.4.3 Résultats

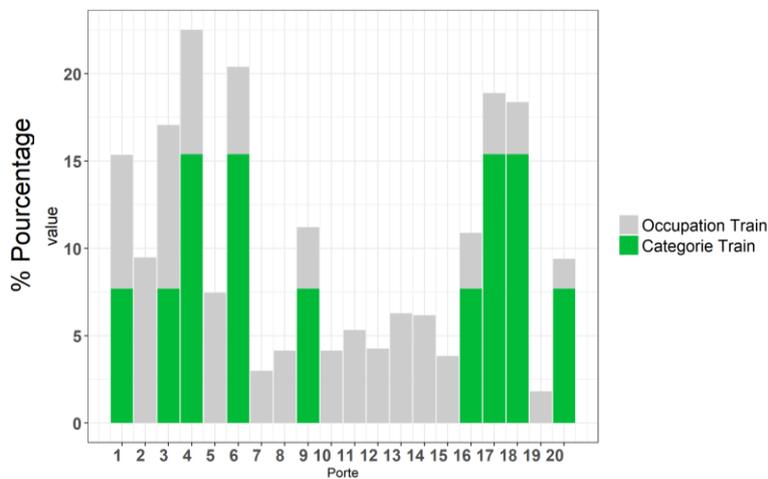


Figure 164. Densité dans le train et la motivation « *Train* »

Le coefficient de corrélation est très faible ( $r=-0.06$ ) entre la charge du train (par véhicule) et la motivation « *Train* » (Figure 164).

#### 6.2.2.1.4.4 Discussion

Le lien avec la charge de train ne s'exprime pas aussi sur Paris Nord. Il est à noter que le nombre d'échantillons est faible ( $N=13$ ). Tout comme à BFM, le lien avec la charge du train ne s'exprime pas. En termes de transférabilité, nous ne prévoyons pas un grand effet dans la mesure où cette motivation se présente en proportion plus diminuée qu'à BFM (3.6% à PN par rapport à 10% à PN).

#### 6.2.2.1.5 Expérimentation I.4 : Comptage des montants et descendants du train

##### 6.2.2.1.5.1 Problématique et hypothèse

**Problématique.** Les personnes de la catégorie « *Train* » indiquent qu'elles se positionnent sur le quai par rapport à la voiture qui va leur permettre d'avoir le plus de chance d'obtenir un siège assis. Nous n'avons pas obtenu d'effet significatif. Nous décidons d'investiguer d'autres variables comme : le nombre de montants, de descendants, la densité sur le quai.

**Hypothèse.** Nous partons de l'hypothèse que le nombre de personnes montantes et descendantes, et l'occupation sur le quai ont une influence sur le choix de type « *Train* ».

### 6.2.2.1.5.2 Méthode

#### **Participants**

Tous les usagers descendants du RER D sur le quai, à PN et les montants du RER D.

Le nombre total recueilli, des montants, est de 470 personnes, du quai vers le train. Le nombre total recueilli, des descendants, est de 504 personnes, du train vers le quai.

#### **Matériel**

Des compteurs manuels servent à compter le nombre de personnes descendantes et montantes.

#### **Procédure**

Deux personnes, pour chaque porte. Une personne comptera le nombre de descendants et une autre le nombre de montants.

#### **Recueil et traitement de données**

Nous confrontons les résultats de comptages réels des montants et descendants avec la motivation « *Train* ».

### 6.2.2.1.5.3 Résultats

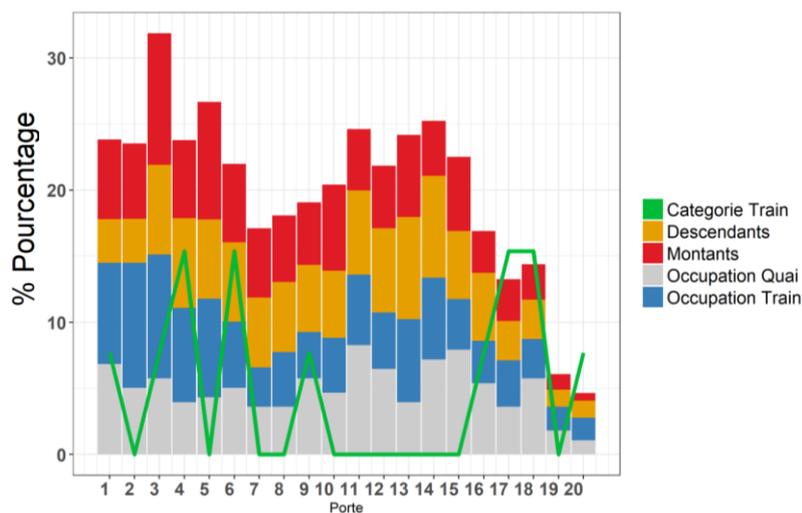


Figure 165. Montants, descendants, charge quai et train et motivation « *Train* »

Nous relevons pour ce modèle un effet marginalement significatif du nombre de montant ( $\chi^2(1)=3.2$   $p=0.07$ ). Nous n'avons pas d'autres effets pour le nombre de descendants, occupation quai et train ( $p>0.05$ ). Voir Figure 165.

#### 6.2.2.1.5.4 Discussion

La même dépendance avec le nombre de montants fait apparaître un effet marginalement significatif, en comparant à BFM. Quand le nombre de montants croît, par porte, la motivation « *Train* » décroît au niveau des zones les plus proches de ces portes.

Cette motivation reste à investiguer avec un plus grand nombre d'échantillons d'occupation de train, par mission. En effet, il est possible qu'il y ait des variabilités considérables de la charge par mission. De plus, le nombre de questionnaires est très bas (N=13) pour pouvoir établir des hypothèses et les valider.

### 6.2.2.2 Expérience II : Phase train

La phase Train étudiée à BFM inclut les architectures des trains qui circulent sur PN, de ce fait nous reprenons ces mêmes données (voir page 149).

### 6.2.2.3 Expérience III : Phase quai-train

#### 6.2.2.3.1 Problématique et hypothèse

***Problématique.*** Les échanges quai-train se déroulent dans un cadre spatio-temporel très restreint. Ceci rend l'étude de ces comportements très difficile, voire impossible si on utilise des méthodes d'auto-confrontation des motivations. Dans cette phase, il y a la proximité physique, le contact, l'inconfort et, peut-être, la concurrence pour atteindre le train ou y descendre.

***Hypothèse.*** Les préférences sur le quai et dans le train engendrent, des charges différentes de personnes (montantes et descendantes) par porte. Ces charges différentes impliquent des variabilités dans les temps d'échanges.

#### 6.2.2.3.2 Méthode

##### Participants

Les personnes observées sont des usagers montants et descendants du RER D à la Gare PN sur le quai 42.

##### Matériel

Chronomètres afin d'enregistrer les temps de montée et descente.

##### Procédure

Neuf portes (cas unique) ont été sélectionnées (Tableau Annexe 6) sur la base de paramètres d'influence (charge du train, densité quai, nombre de montants et de descendants). Pour chaque porte est recueilli un ensemble de deux échantillons de mesures (Tableau 33).

Tableau 33. Sélection des cas uniques de portes selon trois paramètres d'influence : Montants, occupation quai et train. En rouge, les cas doublons.

Porte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Quai	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+
Montants	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Descendants	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Train	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-

#### Recueil et traitement de données

Quatre personnes positionnées devant la porte étudiée.

La première personne mesure les données concernant la circulation des flux de montants : le temps des premières montées par rapport à l'ouverture des portes. Puis la dernière montée et le temps de fermeture des portes. Cette personne note à quel moment les flux de montée deviennent sporadiques (flux non prévisibles et épisodiques et discontinus). La seconde personne fait des comptages du nombre de montants pour les deux temps : continus et sporadiques.

La troisième personne s'occupe des flux de descendants : elle enregistre la première descente par rapport à l'ouverture des portes et la dernière descente et note des variables comme les descentes tardives. La quatrième personne, compte le nombre de descendants.

Pour chaque porte étudiée, une réunion rapide permet de recueillir le maximum de caractéristiques constatées (respect du positionnement en V inversé, enchaînement descente puis montée, descente tardive, nature des flux, présence de bagages et poussettes).

Il n'a pas été possible pour nous de lancer une procédure d'enregistrement vidéo, à cause des mouvements sociaux ayant eu lieu durant l'année 2018. Nous avons donc opté pour un protocole expérimental plus facile à mettre en place.

### 6.2.2.3.3 Résultats

Globalement, il y a une légère baisse des valeurs de descentes par rapport aux montées. Pour les montées et les descentes, on remarque que les vitesses moyennes sont plus faibles pour les portes les plus larges (Tableau 34).

Tableau 34. Valeurs moyennes des temps de montée et descente, selon la largeur de portes

	1300 mm	1800 mm
<b>Montants</b>	1.23 ( <i>sd</i> :0.42)	1.09 ( <i>sd</i> : 0.36)
<b>Descendants</b>	0.91 ( <i>sd</i> :0.13)	0.85 ( <i>sd</i> : 0.32)

Les boîtes à moustaches permettent de mieux apprécier la médiane et l'étendue interquartile (Figure 166).

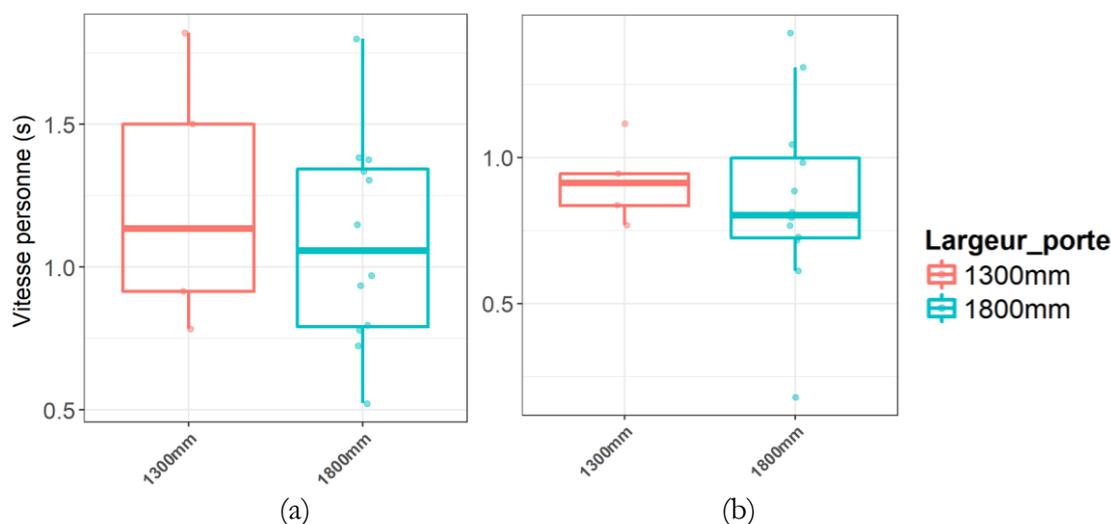


Figure 166. Variabilité des temps moyens par porte, de montants (a) et des descendants (b)

Pour la durée de montées, on relève un effet significatif du nombre de montants ( $\chi^2(1)=32.6, p<0.001$ ). De même, pour la durée de descente, on relève un effet significatif du nombre de descendants ( $\chi^2(1)=74, p<0.001$ ). Pour les deux durées, pas d'effet significatif de la « largeur de porte », des « descentes tardives » et de la présence des « bagages ».

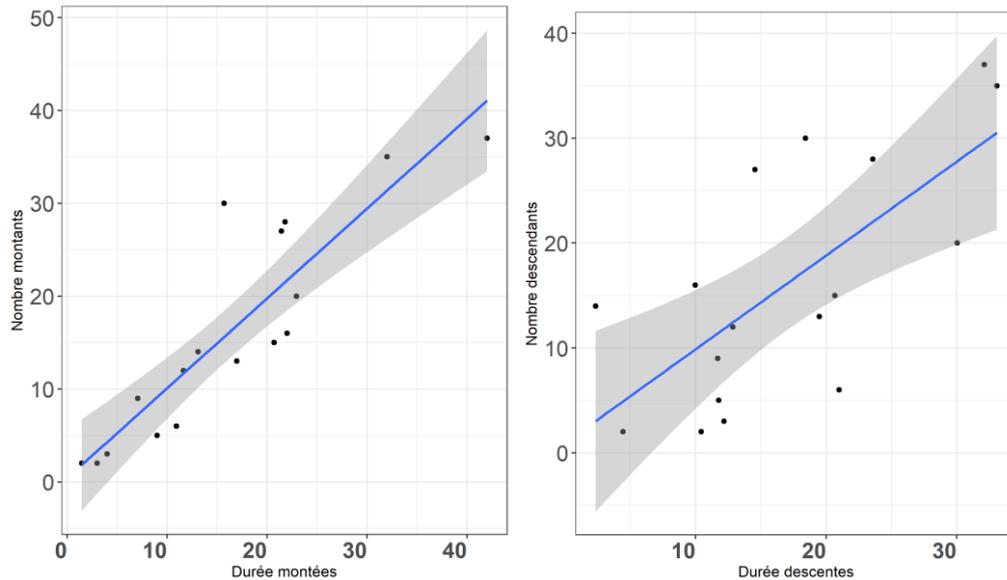


Figure 167. Variation du temps de montée en fonction (a) du nombre de montants et (b) de descente en fonction du nombre de descendants

Afin d'expliquer le temps de montée et de descente (Figure 167), une équation de régression significative a été établie pour chaque temps.

Pour le temps de montée : ( $F(4,12)=12.2, p<0.001$ ) avec  $R^2=0.73$ . La valeur de temps de montée peut être représentée par l'équation suivante :

$$T_m = 5.01 + 0.78 * (\text{nombre de montants})$$

Pour le temps de descente : ( $F(4,12)=3.44, p<0.05$ ) avec  $R^2=0.38$ . La valeur de temps de descente peut être représentée par l'équation suivante :

$$T_d = 11.12 + 0.52 * (\text{nombre de descendants})$$

#### 6.2.2.3.4 Discussion

On remarque la dépendance de la vitesse du flux selon son type (montants ou descendants). On relève aussi des variabilités des vitesses des flux selon la largeur des portes en lien avec sa capacité. Naturellement, ces temps sont prolongés par le volume (nombre de personnes) qui crée de l'attente et restreint les mouvements des agents. Dans nos expérimentations, les effets des bagages, poussettes, sur les temps de montée et de descente n'apparaissent pas clairement.

En comparaison avec BFM (Tableau 35), nous notons les mêmes effets de diminution de temps par personne pour la montée, lorsque la porte est plus large.

D'un autre côté, nous notons une légère augmentation du temps de montée mis par une personne, pour les portes de mêmes largeurs. Ceci peut s'expliquer par la légère augmentation du nombre de montants à PN (pour PN une moyenne de 351 personnes, écart-type=120 contre une moyenne de 330, écart-type=114 pour BFM - Tableau 32). L'effet du nombre des montants a été démontré (Figure 166 à PN, Figure 113 à BFM).

*Tableau 35.* Comparatif entre les valeurs obtenues des temps moyens réels, de montée et de descente à BFM et à PN

Largeur portes	PN		BFM	
	1300 mm	1800 mm	1300 mm	1800 mm
Montants	1.23 (s)	1.09 (s)	1.1 (s)	0.82 (s)
Descendants	0.91s (s)	0.85(s)	-	-

### 6.2.3 Série de simulations

Il est temps d'étudier le modèle de BFM sur PN. Dans ce chapitre nous étudions les résultats obtenus avec le modèle de BFM. Lorsque des incohérences apparaissent nous procédons aux modifications nécessaires sur le modèle et étudions la nature et la cause de ces modifications pour essayer d'analyser au mieux la transférabilité.

#### 6.2.3.1 Simulation 1

##### 6.2.3.1.1 Définition des paramètres

Pour cette simulation, nous conservons une majorité de données et de processus concernant les comportements de navigation dans la foule (i.e. politesse, évitement, etc.). Par ailleurs, nous changeons quatre paramètres d'entrée qu'on a mesurés au travers des expérimentations à PN (page 232). Il s'agit de (i) la mesure des flux majoritaires provenant de l'étage en haut et qui diffusent vers les accès au quai (ii) la quantification des destinations à partir de PN sens sud (iii) la classification des destinations en top dix et la mesure des sorties de ces destinations (iv) la quantité des usagers des trains qui arrivent, à savoir l'occupation actuelle de la voiture et les descendants (voir Tableau 36).

Tableau 36. Conservation et réévaluation des paramètres endogènes et exogènes – PN - Simulation 1

Comportement	Variables considérées comme endogènes	Variables considérées comme exogènes	Changement
Le choix des entrées		Flux d'entrants aux quais	Mesure des flux majoritaires diffusant vers les accès au quai.
La motivation « Arrivée »	Pourcentage de la motivation	Matrice origine-destination (OD). Position des sorties du top dix de PN.	Matrice OD. Mesure des positions des sorties
La motivation « Entrée »	Pourcentage de la motivation		
La motivation « Train »	Pourcentage de la motivation		
La motivation « Moins de monde »	Pourcentage de la motivation		
La motivation et les possibilités du contexte	Processus		
La connaissance de l'agent des lieux	Processus		
Comportement d'évitement	Processus		
Rattraper le train	Processus		
L'engagement dans un contexte spatial	Processus		
Règles de sécurité	Processus		
Confort et normes de politesse	Processus		
La proxémie	Processus		
Les descendants		Flux de descendants de la ligne	Mesures des flux de descendants
Les occupants		Usagers par véhicules	Mesure de l'occupation
Monter à bord du train			
Préférence dans le train	Préférence selon la proximité		
Le conducteur	Processus		

Nous lançons la simulation 1 à PN sur cette base et procédons au processus de validation du transfert.

### 6.2.3.1.2 Validation

#### 6.2.3.1.2.1 Métrique 1 : comptages aux entrées

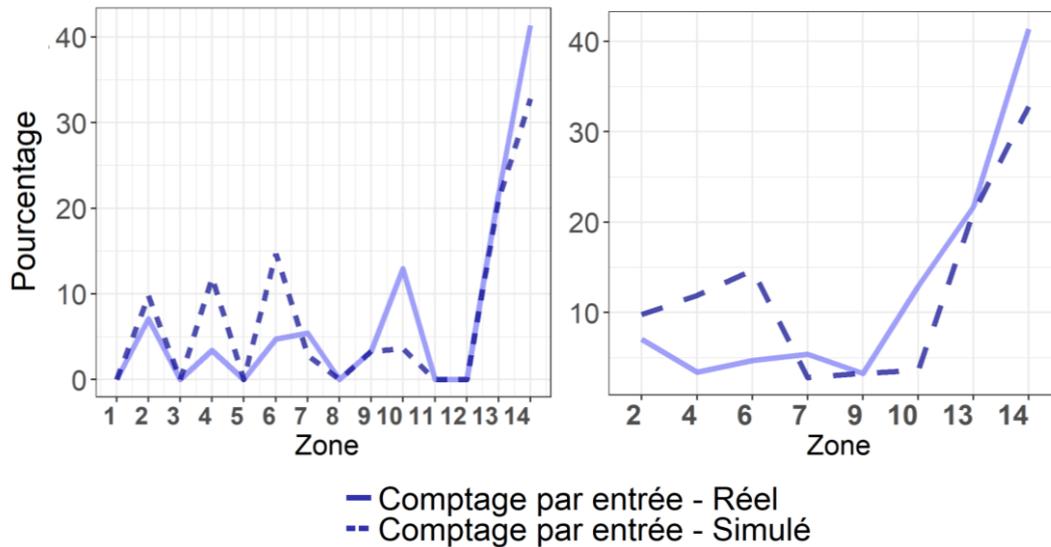
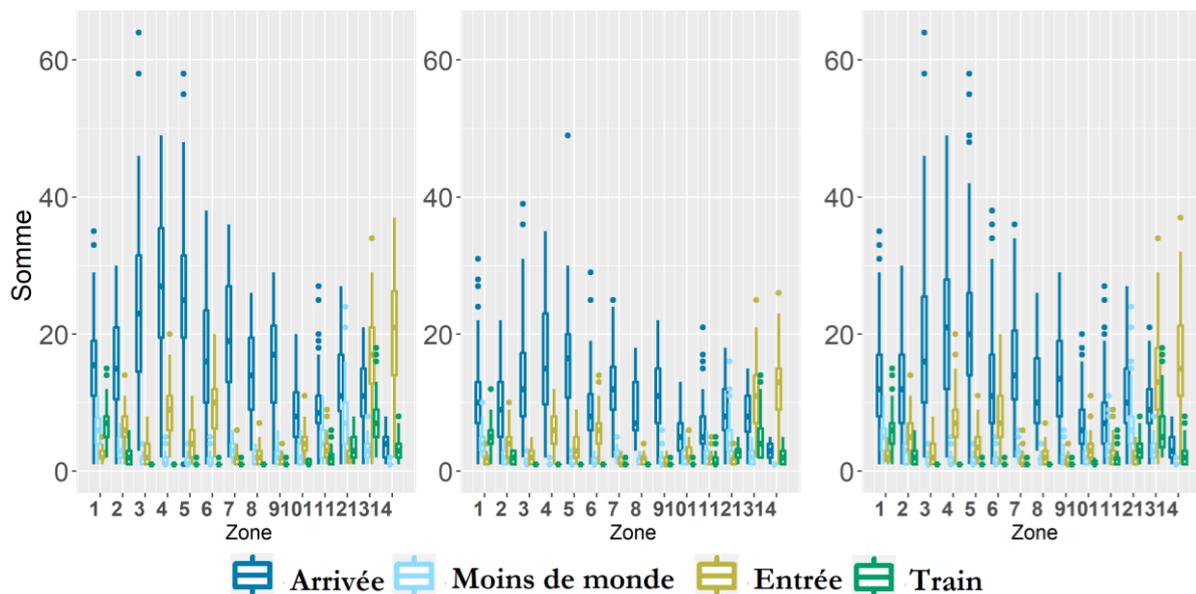


Figure 168. Comptage aux entrées, données réelles et simulée, PN - Simulation 1

Dans la Figure 168 (a) est représenté le comptage par entrée par zone. Nous éliminons les zones qui ne contiennent pas d'entrées car les conserver peut créer de fausses corrélations dans la Figure 168 (b). Les pourcentages d'entrants par zone en réel présentent une corrélation forte  $r=0.85$  par rapport au simulé, ce qui valide cette métrique.

#### 6.2.3.1.2.2 Métrique 2 : Les motivations



(a) T= Arrivée

(b) T= Départ

(c) T=Intermédiaire

Figure 169. Variabilité des motivations selon plusieurs instants T, Paris nord, PN - Simulation 1

Les valeurs de ces graphes (Figure 169) ont été obtenues par les échantillons de divers instants T (T=*Arrivée* et T=*Départ* et T=*Intermédiaire* du train), avec les attributs propres à chaque agent (stratégie, zone, etc.). Nous remarquons que l'étendue de la dispersion de la catégorie « *arrivée* » est plus importante. Comparant (a) par rapport (b), on remarque une amplification des valeurs pour toutes les catégories. Ceci s'explique par le fait que juste avant l'ouverture des portes (a), nous disposons d'une densité maximale sur le quai. Les deux conditions (*Arrivée*, *Départ*) comportent des valeurs extrêmes ce qui suggère une forte variance. En revanche, après le départ du train, nous disposons d'une densité minimale sur le quai.

La Figure 169 (c) regroupe des échantillons pris toutes les 15 secondes, en dehors des instants T=*Arrivée* et T=*Départ*. Elle montre des valeurs de dispersion plus moyennées. Naturellement, les valeurs « *Arrivée* » sont les plus sujettes à une plus grande variabilité, car l'étendue interquartile de la normale de chaque destination du top dix est fixée à 13 mètres.

Cette variabilité des valeurs des motivations est très semblable à celle obtenue pour BFM.

### **Etude des variabilités des échantillons**

Pour toutes les motivations, il apparaît un effet de diminution de la variabilité pour les échantillons les plus récents. En effet, l'allure de la courbe se stabilise au fur et à mesure du temps. Pour la motivation « *Arrivée* », on obtient 91% de forte corrélation avec la moyenne des échantillons contre 8% de faible corrélation ( $r < 0.5$ ). Pour la motivation « *Entrée* » 100 % de forte corrélation avec la moyenne. Pour « *Moins de monde* », 86.6% de forte corrélation contre 14.4% de faible corrélation et pour « *Train* », 96.7% de forte corrélation contre 3.3 % de faible corrélation.

Le chi-deux des p-value entre les catégories est significatif ( $\chi^2(3) = 45, p < 0.001$ ). Cela signifie que la distribution de la cohérence entre les échantillons n'est pas homogène d'une catégorie à une autre. Nous prévoyons de faibles effets de variabilité pour les deux motivations « *arrivée* » et « *moins de monde* » et ceci d'une simulation à une autre. D'un côté, pour « *arrivée* », cela vient de l'étendue interquartile de la normale de chaque destination du top dix fixés à 13 mètres. La motivation « *moins de monde* » étant une motivation hautement réactionnelle à la densité produite par les autres motivations, celle-ci fluctue considérablement.

Par conséquent, il suffit qu'une autre motivation ne soit pas transférable pour impacter négativement la transférabilité de « *moins de monde* ».

#### **6.2.3.1.2.3 Métrique 2 .1 : Stratégie « Arrivée »**

##### **Distribution entre les zones, par destination du top dix**

Pour chaque destination du top dix nous avons comparé sa distribution empirique des catégories « *Arrivée* », par zone, par rapport à la distribution simulée (voir Tableau 37).

Tableau 37. Valeurs de corrélation et p-valeur du KS-test pour chaque destination du top dix, en simulé « finale » et « simulé », PN - Simulation 1

Destination	Position finale (simulé) vs réelle		Position voulue (simulé) vs réelle	
	Corrélation	KS test	Corrélation	KS test
Yerres	0.81	0.61	0.89	0.9
Créteil Pompadour	0.47	0.33	0.5	0.9
Evry Courcouronnes	<b>0.09</b>	<b>0.002</b>	<b>0.1</b>	0.06
Juvisy	<b>-0.18</b>	0.15	<b>-0.38</b>	0.6
Brunoy	0.77	0.33	0.75	0.9
Lieusaint Moissy	0.55	0.15	0.64	0.99
Corbeil Essonnes	<b>0.13</b>	<b>0.02</b>	<b>0.14</b>	<b>0.02</b>
Vigneux sur seine	<b>0.2</b>	<b>0.02</b>	<b>0.005</b>	0.9
Orangis bois de l'épine	0.42	0.9	0.63	0.99
Savigny le temple Nandy	0.57	0.9	0.62	1

■ Variables testées sans effets significatifs

### Distribution agrégée des « Arrivées », simulée versus réelle

Le coefficient de corrélation de la position « finale » simulée (Figure 170) versus réelle est fort et est égal à  $r=0.66$ . En ce qui concerne la position « voulue » simulée vs réelle,  $r =0.77$ .

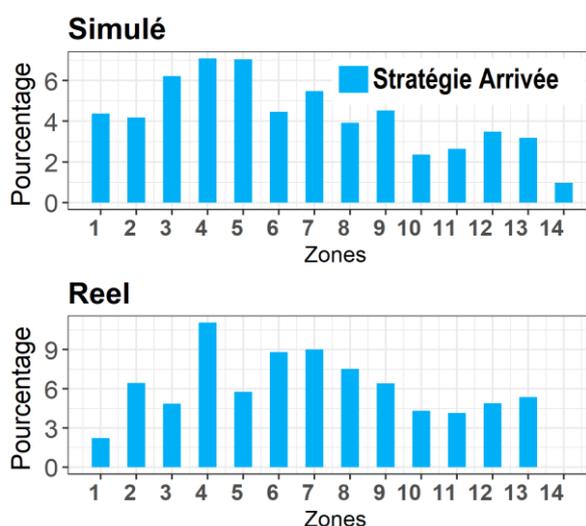


Figure 170. Comparaison des répartitions de la motivation « Arrivée » par zone. Réelle versus simulée – position finale, PN - Simulation 1

Le rassemblement des zones deux par deux (ce qui fait, en total 7 zones sur le quai), augmente la corrélation pour la simulation position « finale » de  $r=0.66$  à  $r=0.75$ . Cela signifie que les résultats sont à une zone près d'une forte amélioration (voir Tableau 38).

Tableau 38. Corrélation des valeurs réelles et simulées, et fusion des zones, PN

Rassemblement zone	Réel VS Top dix réel	Réel VS simulé	Top dix réel VS simulé total	Top dix réel VS simulé Top dix
1	0.86	0.66	0.75	0.83
2	0.9	0.82	0.96	0.96

La simulation reproduit très bien la répartition des personnes selon la motivation « *Arrivée* ». Cette motivation (connaissance de la position des sorties en destination) est tout à fait transférable moyennant l'obtention de la nouvelle matrice origines destinations.

#### 6.2.3.1.2.4 Métrique 2 .2. Stratégie « Entrée »

##### Distribution entre les zones

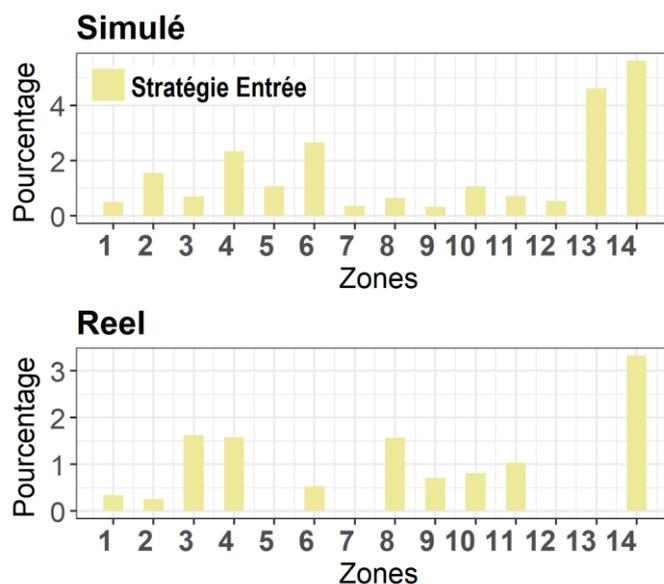


Figure 171. Comparaison des répartitions de la motivation « *Entrée* » par zone, PN - Simulation 1

La position « *finale* » simulée vs réelle affiche une corrélation modérée de  $r=0.46$ . En ce qui concerne la position « *voulue* » simulée vs réelle, le lien est modéré est de  $r=0.53$  (Figure 171).

La position « *voulue* » améliore les résultats car les entrants en zone 13 se décalent vers la zone 14, pour plus d'espace, dans le sens de la perception visuelle (escalier en direction de la zone 14).

##### Relation avec les comptages aux entrées

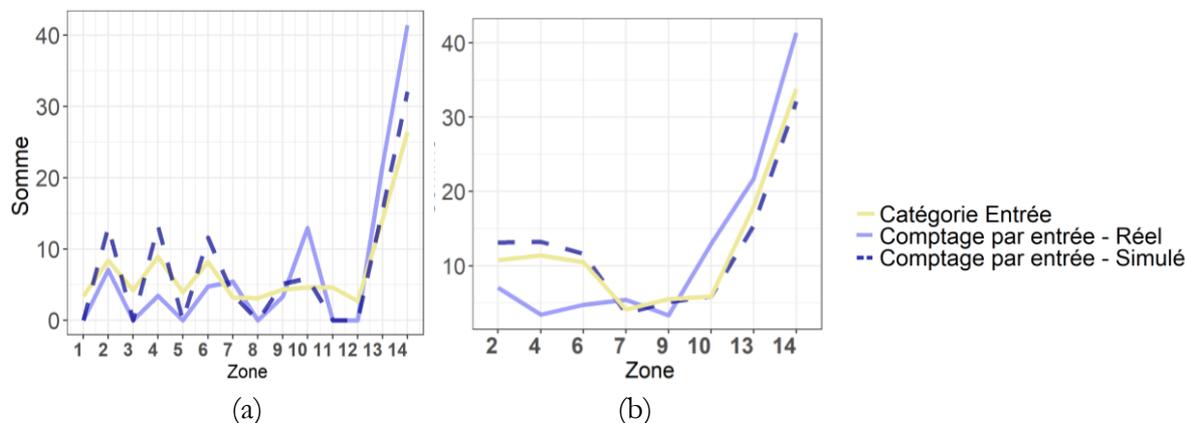


Figure 172. Comparaison des comptages réels et simulés sur toutes les zones (a) et par la zone d'entrée (b), avec les motivations « *Entrées* », PN - Simulation 1

La Figure 172 (b) permet d'éviter d'avoir de fausses corrélations créées par l'absence d'entrée par zone, donnant des valeurs égales à zéro. La motivation « *Entrée* » a un fort coefficient de corrélation  $r=0.92$  avec les comptages par entrée de la simulation (Figure 172). Par ailleurs, les comptages en réel et en simulé corrélent à  $r=0.86$ . Nous remarquons que la courbe des entrants, par entrée, est légèrement amplifiée pour les zones 2, 4, 6 est plus basse pour la zone 10.

Cela vient du fait que l'on simule les choix d'entrées, de manière identique à BFM. Nous avons mentionné auparavant la fusion partielle, de ce comportement, avec le positionnement sur le quai. En effet, une partie du positionnement sur le quai se fait à l'étage, car les usagers disposent de plus d'espace pour avancer. Nous ne disposons pas de plus de connaissances sur ce type de comportement. Le comportement de positionnement par rapport aux entrées corréle moins bien qu'à BFM ( $r=0.46$  à PN contre  $r=0.8$  à BFM). En revanche, la courbe de motivation « *Entrée* » corréle très bien avec les comptages simulés. Cela veut dire que la simulation fonctionne exactement comme on l'a implémentée pour la motivation « *Entrée* ». C'est ce léger déséquilibre des comptages qui implique partiellement une corrélation moindre de la motivation « *Entrée* » avec les valeurs empiriques.

Par ailleurs, la position « *voulue* » augmente plus la corrélation à  $r = 0.53$ . Cela veut dire que les agents se décalent plus qu'il n'en faut, comme constaté à BFM. Nous prévoyons des effets négatifs sur la densité globale.

#### 6.2.3.1.2.5 Métrique 2 .3. Stratégie « Moins de monde »

##### Distribution entre les zones

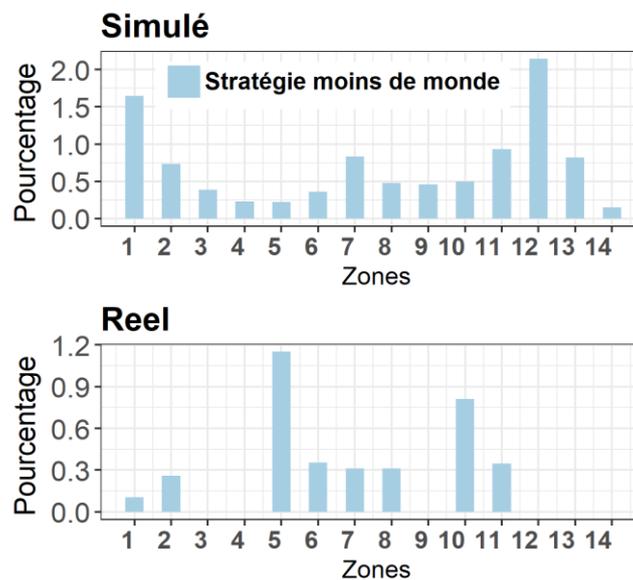


Figure 173. Comparaison des comptages réel et simulé par entrée, avec les motivations « *Moins de monde* », PN - Simulation 1

La position finale simulée vs réelle affiche une corrélation  $r=-0.27$ . En ce qui concerne la position voulue simulée vs réelle, la corrélation est négative est faible  $r = -0.3$  (Figure 173).

Cette motivation n'a pas été validée vis-à-vis de la densité sur le quai, à PN. Il est donc normal qu'elle ne soit pas valide sur la simulation. Nous ne prévoyons pas d'effets majeurs de cette motivation sur la densité globale, vu sa représentativité faible.

#### 6.2.3.1.2.6 Métrique 2.4. Stratégie « Train »

##### Distribution entre les zones

Cette motivation a été évoquée comme étant un comportement qu'on n'a pas pu valider durant nos analyses statistiques. Il est normal qu'on obtienne une mauvaise corrélation  $r=-0.3$  car on a lié cette variable à la charge du train (voir Analyses statistiques étendues à partir de la page 138)

#### 6.2.3.1.2.7 Métrique 3 : répartition sur le quai – densité

En ce qui concerne la densité, la corrélation de la position finale simulée vs réelle est  $r=0.1$ , et pour la position voulue simulée vs réelle,  $r=0.23$ . Ces deux valeurs sont faibles (Figure 174).

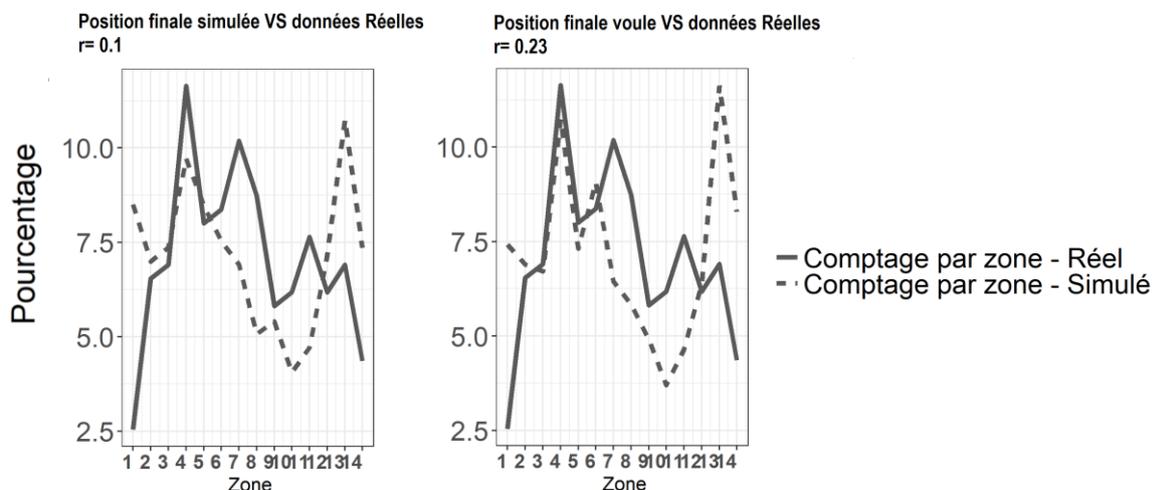


Figure 174. Comparaison de la densité finale Réelle avec la densité simulée des positions « finales » (a), et des positions « voulues » (b) - PN - Simulation 1

Il s'agit des coefficients de corrélation très faibles pour les positions « finales » et « voulues ». La densité des personnes est le résultat des choix de positionnement selon les motivations. On a pu valider la motivation « Arrivée ». Pour le restant des motivations, le coefficient de corrélation demeure faible en position « finale » (Tableau 39).

Tableau 39. Récapitulatif des corrélations des motivations avec les données empiriques

	Simulé « voulue » vs Réel	Simulé « finale » vs Réel
Entrée	0.53	0.46
Moins de monde	-0.3	-0.27
Train	<b>-0.1</b>	<b>-0.08</b>
Arrivée	0.77	0.65

#### ■ Variables testées sans effets significatifs

On a vu clairement qu'il y avait une différence dans les proportions des motivations. Il est possible que cette différence soit responsable de l'écart qu'on a avec la densité. En effet, il suffit que le degré de représentativité varie pour faire varier le résultat final.

### 6.2.3.1.2.8 Métrique 4 : Flux de personnes

D'un point de vue quantitatif, le nombre de montants est légèrement sous-estimé par rapport au réel. Par ailleurs, le nombre de descendants est légèrement surestimé par rapport au réel. (Tableau 40).

Tableau 40. Comparaison des données des circulations réelles et simulées– PN Simulation 1

	Montants	Descendants
<b>Théorique</b>	397.6 ( <i>sd</i> :122)	430 ( <i>sd</i> :192)
<b>Simulée</b>	358 ( <i>sd</i> : 62)	499 ( <i>sd</i> :22)

D'un point de vue descriptif, la dynamique pour les circulations théoriques et simulées se ressemblent, hormis pour les descentes qui, en réalité présentent plus de variabilités d'un train à un autre. Les descentes sont dépendantes de motivations qui se sont réalisées dans des gares en amont. Afin d'aboutir aux comportements des descendants, il faudrait simuler tout ce qui se passe en amont de PN. Cela n'est pas l'objet de cette étude. La quantité des descendants a été mesurée à travers nos expérimentations à PN (Expérimentation I.4 : Comptage des montants et descendants du train - page 238). Ces mesures ont été injectées dans le simulateur en tant que variables exogènes.

On remarque par ailleurs, que les allures des courbes des montants se ressemblent (Figure 175). Nous avons une légère baisse des montants, en simulé, par rapport au réel, mais avec un écart-type moindre qu'en réalité. Il est à noter que le nombre global des montants dans le RER D est calculé par le simulateur, à travers la réévaluation de la variable exogène « Flux d'entrants aux quais ». Cette variable est assez bien calculée.

Nous remarquons le même aspect caractéristique d'élévation de nombre de montants suivi d'une baisse prononcée, déjà constaté à BFM (Figure 140). La simulation reproduit une dynamique de circulation d'une manière satisfaisante, à PN.

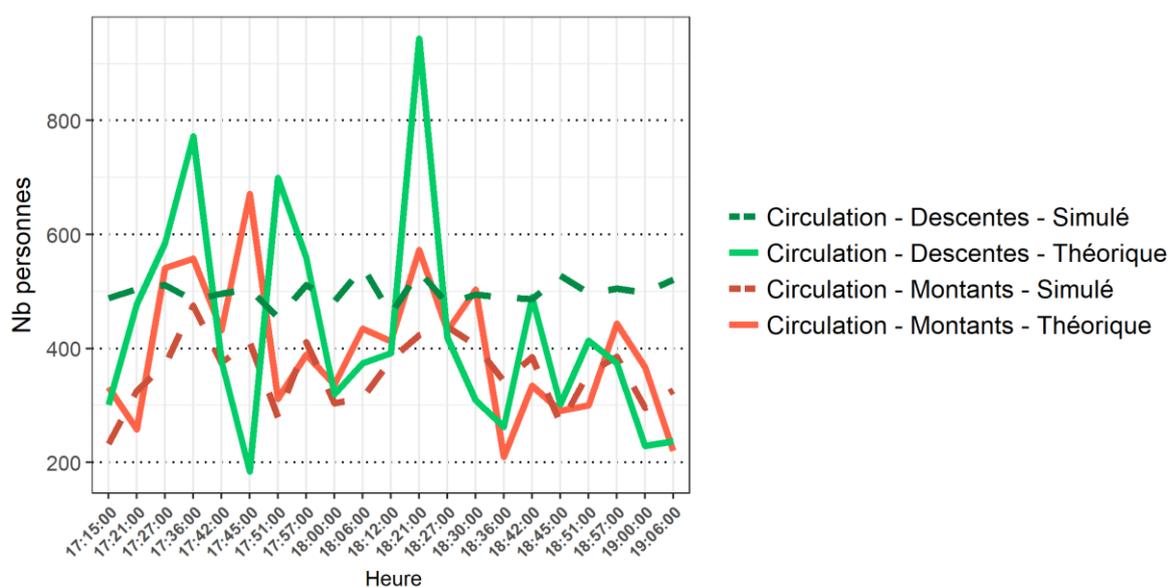


Figure 175. Circulation des trains et le nombre de montants / descendants par train

### 6.2.3.1.2.9 Comportement dans le train

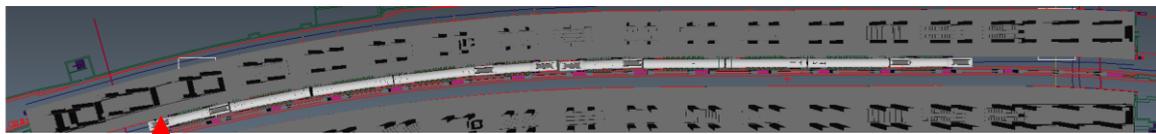
Nous conservons le même comportement que BFM de la prise de siège exclusivement en fonction de la proximité des portes.

### 6.2.3.1.2.10 Comportement aux interfaces quai-train

D'un point de vue qualitatif, nous conservons sur les rendus de simulation de PN les mêmes comportements de politesse. Pour les montants le positionnement en V inversé et le centrage des flux de descente vers le centre avec anticipation de descente. Par ailleurs, on conserve aussi les mêmes comportements d'évitement et de contournement.

### 6.2.3.1.2.11 Les caractéristiques des flux de montants et de descendants

L'analyse suivante concerne le nombre de montants et descendants par porte. La numérotation des portes est croissante à partir de la queue de train (Figure 176).



Porte 1 Queue de train

Figure 176. Position des portes, PN – Quai 42/44, vue de dessus

Les valeurs « Montants » et « Descendants » réelles et simulées correspondent, elles présentent un coefficient de corrélation modéré de  $r=0.42$  et fort de  $r=0.63$ , respectivement (Figure 177).

Le lien entre les valeurs des montants par porte, en réel et simulé, est modéré. Nous avons démontré que les montants prennent la porte la plus proche de leur position choisie sur le quai. Actuellement, la densité sur le quai en simulé, correspond faiblement aux données empiriques (10%). Cela pourrait expliquer la corrélation modérée des montants, en simulé et en réel.

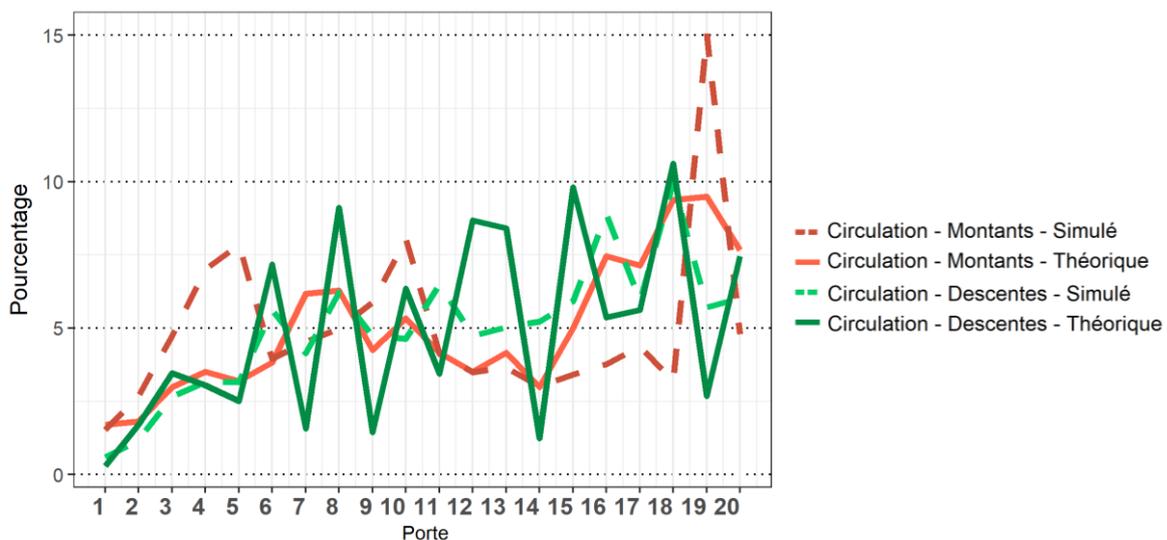


Figure 177. Flux montants et descendants, par porte, BFM

Dans la Figure 178, sont représentées les boîtes à moustaches avec les valeurs médianes et l'écart interquartiles. On remarque que les moyennes de montées sont nettement plus élevées au niveau

de la porte 19 avec une faible variabilité. Cela correspond aux valeurs théoriques des montants, mais avec une amplitude beaucoup plus importante que la normale. Cette zone englobe le pic additionnel, de la motivation « *Entrée* », en zone 13 et qui ne correspond pas à la réalité (Figure 171). Ici, on voit clairement l'impact de cette motivation sur la densité, et par conséquent sur le nombre de montants par porte.

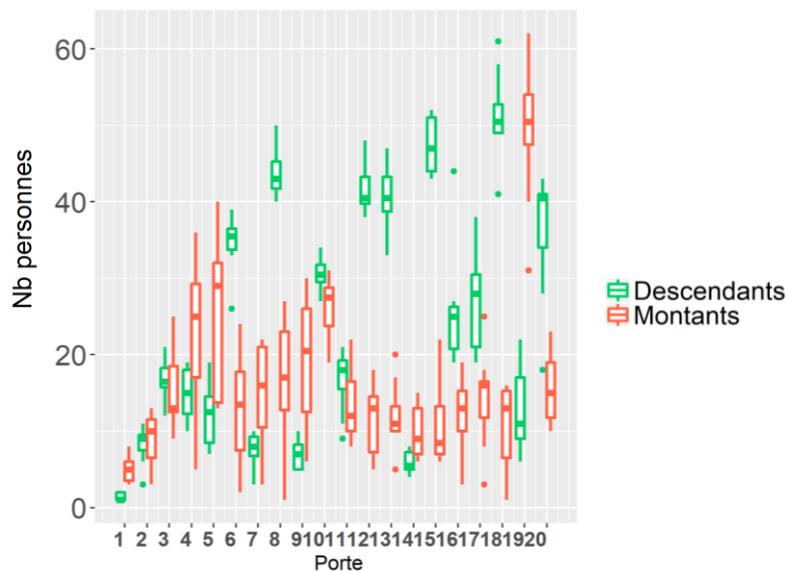


Figure 178. Variabilité des quantités des montants et descendants par porte

#### 6.2.3.1.2.12 Mesures des temps d'échange

Nous mesurons l'étendue des durées d'échanges pour les flux montants et les descendants, et ceci pour chaque porte, à travers les échantillons recueillis. Par exemple, le temps de montée est la mesure à partir de la première et de la dernière montée, par porte. Il en est de même pour les descentes. Globalement, on remarque que certaines portes ont une durée de montée très augmentée avec une faible variabilité (Porte 19 : moyenne 53.2s, sd=4.8 ; porte 4, moyenne=46, sd=7). Tandis que d'autres portes sont plus sujettes à de grandes variabilités (porte 17, moyenne=29.5, sd=21). D'autres portes présentent de faible temps d'échanges et de variabilité (Porte 11, moyenne=10, sd=4.5). Voir Figure 179.

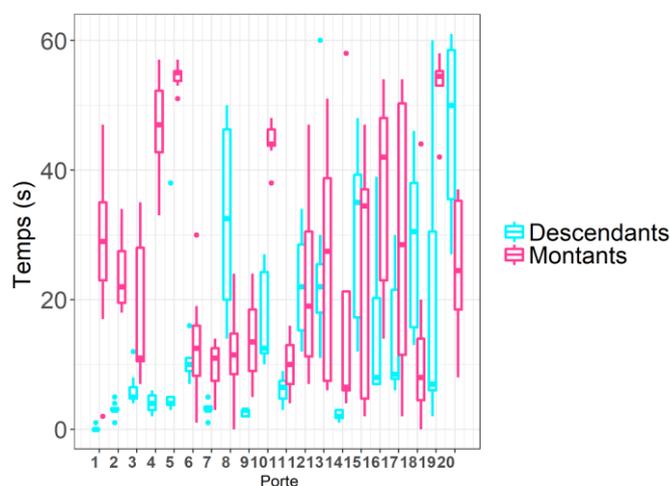


Figure 179. Temps de montée et de descente, par porte, PN Simulation 1

Ces mesures englobent donc, pour les flux de montants, des flux continus et des flux sporadiques. La représentation graphique suivante nous permet de vérifier les allures des temps, des mouvements (i.e. montée, descente), et si ces temps sont continus (i.e. points successifs ou longue séparation après la prochaine montée) (Figure 180). Cette représentation nous permet de comparer le comportement des flux au niveau de chaque porte, à travers plusieurs échantillons.

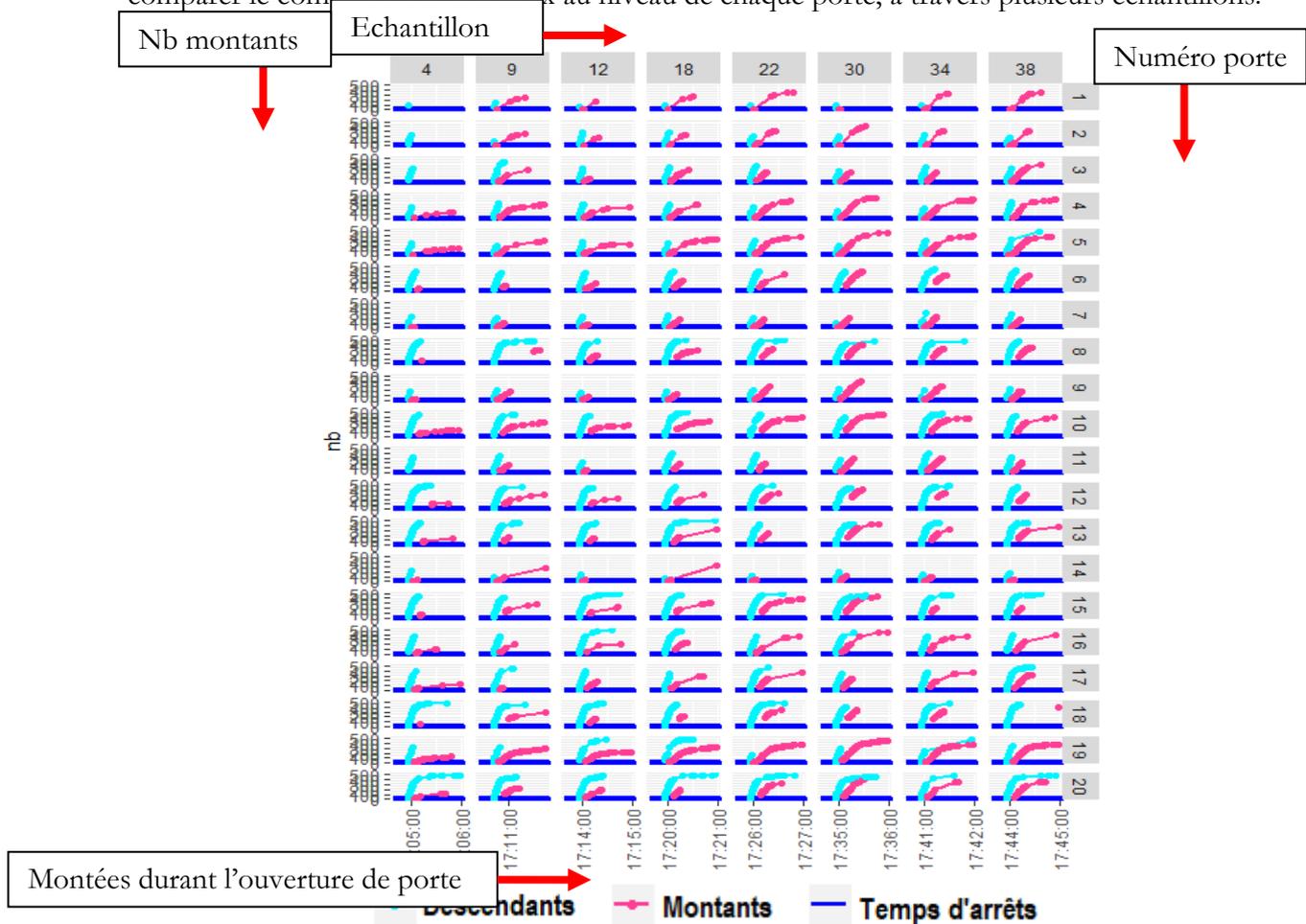


Figure 180. Temps de montée et nombre, par porte (1,20) par échantillon.

### Analyse des temps de montée « continus » et de descente

Nous procédons à une analyse comme suit : pour les temps de montée, nous enlevons toutes les montées qui n'appartiennent pas à un flux continu. Et ceci en comparant le dernier passage, numéro porte et échantillon avec le précédent. Si cette durée dépasse les 3 secondes, on considère que le flux devient sporadique. Pour les flux de descendants, nous gardons les descentes tardives tout comme pour BFM.

On remarque que les valeurs sont moins importantes que la dispersion est moindre. L'allure de la Figure 181, nous rappelle la répartition des montants et des descendants.

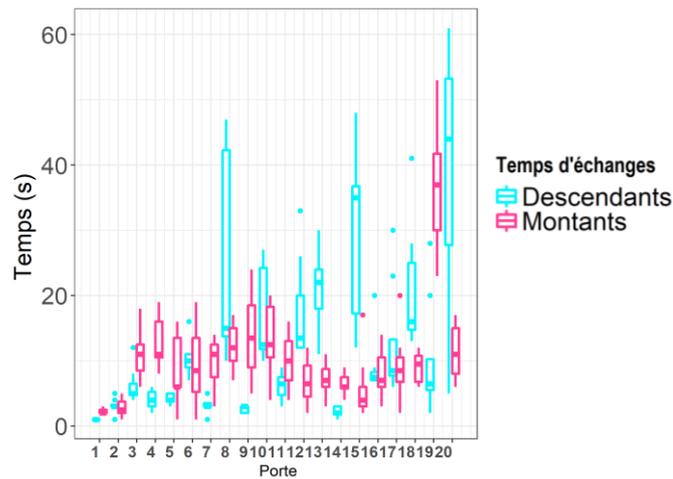


Figure 181. Sélection des flux exclusivement continus (moins de 3 secondes de séparation entre deux personnes)

A partir de ces informations, on peut déduire le temps mis par une personne pour effectuer son passage et les effets des passages tardifs sur les temps d'échanges.

En ce qui concerne les mesures des temps de montée et de descente, on relève des effets significatifs des variabilités des temps de montée et de descente par rapport à la porte ( $\chi^2(1)=14.4$ ,  $p<0.001$ ) et le nombre des personnes ( $\chi^2(1)=355.1$ ,  $p<0.001$ ).

En ce qui concerne les vitesses des personnes, on relève des effets significatifs selon la largeur de la porte ( $\chi^2(1)=20.35$ ,  $p<0.001$ ) et un effet significatif selon le type de mouvement (montée ou descente), ( $\chi^2(1)=82.9$ ,  $p<0.001$ ). Le post-hoc contrastant les vitesses de descente versus montée est significatif ( $p<0.0001$ ) et associé à une pente négative. Cela veut dire que les vitesses de descente sont plus rapides.

Dans le cas de BFM, nous avons attribué cette baisse du temps de descente au nombre de descendants diminué, qui implique moins d'attente et donc plus de mouvements libres. Le cas PN est différent sur ce point. Il y a plus de descentes que de montées, au niveau de certaines portes (i.e. porte 20, 18, 15, 13, 12, 8). Nous comparons les temps de montée et descente pour ces portes. Nous avons un effet significatif uniquement pour la variable largeur de porte ( $\chi^2(1)=5.7$ ,  $p<0.05$ ). Nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle il y a une différence significative entre les temps de montée et descente.

En ce qui concerne l'effet de la largeur des portes, nous relevons des effets significatifs pour les montants ( $\chi^2(1)=11.4$ ,  $p<0.001$ ) et des effets significatifs pour les descendants ( $\chi^2(1)=14$ ,  $p<0.001$ ). Le temps de montée n'est pas influencé par le nombre d'utilisateurs ( $p>0.05$ ) alors que c'est le cas pour les descentes ( $\chi^2(1)=10.3$ ,  $p<0.05$ ).

Le post-hoc contrastant les vitesses de montée et de descente, pour les deux largeurs de porte 1300 mm – 1800 mm est significatif ( $p<0.05$ ) et est associé à une pente positive pour les deux directions (montée et descente). Cela veut dire qu'il y a une augmentation des vitesses selon les types des portes, peu importe la direction.

Pour ce qui est du temps d'échange global (premier mouvement et dernier mouvement), on teste l'influence des montées et descentes tardives sur le prolongement de ce temps. On relève des effets significatifs de ces retards ( $\chi^2(1)= 115.06$ ,  $p<0.001$ ). De plus, un effet significatif du nombre total des passagers sur ce temps ( $\chi^2(1)=11.64$ ,  $p<0.001$ ) ainsi que par porte ( $\chi^2(1)= 59.8$ ,  $p<0.001$ ).

En catégorisant ces retards par type de mouvement (retards des montées ou des descentes), nous étudions l'influence de chaque type de retard.

- par rapport la situation « sans retard » dans les deux sens, l'effet d'une montée tardive est significatif ( $p<0.001$ ) et est associé à une pente négative, égale à -26.2.
- par rapport la situation « sans retard » dans les deux sens, l'effet d'une descente tardive est non significatif ( $p>0.05$ )
- par rapport la situation « sans retard » dans les deux sens, l'effet de descentes et de montées tardives est significatif sens et est associé à une pente négative égale à -27.9.

Pour ces trois résultats, cela signifie que les temps d'échange sont moins longs sans retard. Les effets de direction (montées ou descentes) semblent être cumulatifs (augmentation de la valeur de la pente).

- l'effet de montée tardive par rapport à une descente tardive est significatif ( $p<0.001$ ) et associé à une pente positive égale à 26.3. Cela veut dire que les temps d'échanges sont prolongés par l'effet de montées tardives que de descentes tardives.

Nous avons des effets du nombre des personnes, largeur de porte, direction du mouvement, ainsi que des mouvements tardifs, sur les temps d'échanges. On obtient presque les mêmes effets qu'à BFM. Ceci est normal car on a maintenu les mêmes processus comportementaux sans changement d'une gare à une autre. Ces derniers montrent un haut niveau d'adaptabilité de la simulation à un nouveau contexte. Par conséquent, les comportements d'échange aux interfaces quai-train sont transférables.

### **Qu'est-ce qui crée la sporadicité ?**

Nous recueillons pour chaque porte les valeurs des montées tardives qui sont espacées à plus de 3 secondes de la dernière montée.

Le khi-2 est significatif ( $\chi^2(19)= 119.7$ ,  $p<0.001$ ), cela veut dire que la répartition du nombre de montées/descentes tardives n'est pas homogène. Le post-hoc contrastant les portes entre-elles montre des effets significatifs de diminution ou d'augmentation des arrivées tardives.

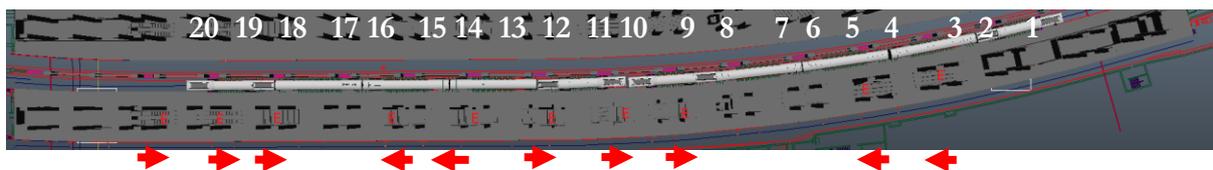


Figure 182. Position des portes, par rapport aux entrées et leurs directions - PN

Cette variable est difficile à étudier car elle réunit l'aspect proximité des entrées sur le quai, ainsi que la porte la plus proche perçue visuellement. Cela va donc dans le sens de l'escalier qui mène

vers le quai (flèches rouges, Figure 182). Le post-hoc de contraste porte par porte, nous oriente vers cet aspect. Par exemple, on relève des effets significatifs pour la porte 18 comparativement à 20 ( $p < 0.001$ ) associant une pente négative. Cela veut dire que la porte 18 est moins sujette à la sporadicité du fait que l'entrée du quai a plus de chance de desservir la porte 20, qui est la première porte perçue dans le sens de l'escalier (voir plus d'informations dans Tableau Annexe 10). De même, on a une nette augmentation de la sporadicité sur la porte 20 comparant aux portes 6 et 8. Nous avons une augmentation pour la porte 1 en comparaison avec plusieurs portes. Cet effet n'a pas été investigué davantage.

Nous disposons d'effets similaires qu'à BFM sur le choix de la porte en fonction de la direction d'arrivée, donc de la perception visuelle, et de la proximité. Tout comme à BFM, il y a une porte avec une grande sporadicité qui ne peut être expliquée par notre théorie et n'a pas été investiguée davantage (porte 1 à PN et porte 4 à BFM). Le processus est tout à fait transférable.

#### 6.2.3.1.2.13 Temps d'arrêts

Tout comme pour BFM, nous disposons d'une vue globale des temps d'arrêts, qui a été étudiée en plusieurs parties. D'un côté, le temps de montée et descente continus, et d'un autre côté, des analyses sur les flux additionnels non continus. On implémente un caractère hypothétique du comportement du conducteur qui se base sur : « déclencher la fermeture des portes si, 3 personnes et plus sont présentes sur la bordure du quai, par porte ». Cette règle ne montre aucune modification des temps d'arrêts du train qui restent invariants. Cette condition, à BFM, ne provoque pas de variabilité des temps d'arrêt. Comme on l'a démontré dans le Tableau 30 à travers divers scénarios comparatifs, ces variabilités sont liées au nombre total des montants (hausse ou diminution du total des flux) et à la variabilité des personnes par porte. Ces variabilités des personnes par porte sont directement liées à des stratégies de positionnement sur le quai et au caractère sporadique des flux. A ce titre, on ne peut pas parler de transférabilité car il nous manque une donnée essentielle, qui est, la prise de décision du conducteur.

#### 6.2.3.1.2.14 Conclusion et discussion

La circulation des trains et les flux associés présentent des allures similaires entre les données empiriques et simulées. De même pour le nombre de montants et de descendants par porte. Les valeurs des motivations « Arrivée » et « Entrée » sont valides si l'on compare leurs distributions avec les données théoriques. La motivation « Moins de monde » et « Train » n'est pas valide. La densité par zone corrèle faiblement avec la densité empirique  $r=0.1$ . De plus, nous disposons de 4 destinations du top dix qui présentent de faible corrélation avec les distributions théoriques. Par ailleurs, les pourcentages des motivations ne sont pas les mêmes qu'à BFM. En effet, on remarque une variabilité dans les pourcentages des motivations, par rapport à BFM. On a une augmentation très nette de la motivation « Arrivée » (Tableau 41).

Tableau 41. La différence de pondération (représentativité) des motivations, d'un contexte à un autre (BFM versus PN).

Motivation	Avant correction statistiques à PN	Après correction à PN	BFM
Arrivée	80.8	81.4	63
Train	4.3	3.6	7
Moins de monde	3.7	3.8	10
Entrée	11.22	11.18	20

### 6.2.3.2 Simulation 2

#### 6.2.3.2.1 Définition des paramètres

Pour cette simulation nous rajoutons un autre changement par rapport à la simulation 1 : nous modifions les pourcentages des motivations avec ceux obtenus par des mesures à PN (page 232), et nous considérons cette variable comme étant exogène (Tableau 42). L'a priori que les préférences étaient communes semblent s'avérer faux. Nous espérons ainsi corriger le problème de répartition des usagers sur le quai.

Tableau 42. Conservation et réévaluation des paramètres endogènes et exogènes- PN Simulation 2

Comportement	Variables endogènes	Variables exogènes	Changement
Le choix des entrées		Flux d'entrants aux quais	Mesure des flux majoritaires diffusant vers les accès au quai.
La motivation « <i>Arrivée</i> »		Matrice origine-destination (OD). Position des sorties du top dix de PN. <b>Pourcentage de la motivation</b>	Matrice OD. Mesure des positions des sorties <b>Mesure du pourcentage de la motivation « <i>Arrivée</i> »</b>
La motivation « <i>Entrée</i> »		<b>Pourcentage de la motivation</b>	<b>Mesure du pourcentage de la motivation « <i>Entrée</i> »</b>
La motivation « <i>Train</i> »		<b>Pourcentage de la motivation</b>	<b>Mesure du pourcentage de la motivation « <i>Train</i> »</b>
La motivation « <i>Moins de monde</i> »		<b>Pourcentage de la motivation</b>	<b>Mesure du pourcentage de la motivation « <i>Moins de monde</i> »</b>
La motivation et les possibilités du contexte	Processus		
La connaissance de l'agent des lieux	Processus		
Comportement d'évitement	Processus		
Rattraper le train	Processus		
L'engagement dans un contexte spatial	Processus		
Règles de sécurité	Processus		
Confort et normes de politesse	Processus		
La proxémie	Processus		
Les descendants		Flux de descendants de la ligne	Mesures des flux de descendants
Les occupants		Usagers par véhicules	Mesure de l'occupation
Monter à bord du train			
Préférence dans le train	Proximité porte		
Le conducteur	Processus		

## 6.2.3.2.2 Validation

### 6.2.3.2.2.1 Métrique 1 : comptages aux entrées

Les comptages réels et simulés corrèlent très bien et se comportent de la même manière que la simulation1- PN ( $r=0.85$ ). Ce comportement de choix des entrées est transférable.

### 6.2.3.2.2.2 Métrique 2.1. Stratégie « Entrée »

La position « *finale* » simulée vs réelle affiche une forte corrélation  $r=0.60$ . En ce qui concerne la position « *voulue* » simulée vs réelle, la corrélation est forte est de  $r=0.62$ . La diminution de la représentativité de cette motivation, conformément aux proportions de PN, améliore les résultats. Cette motivation est transférable. Voir plus d'information sur la Figure Annexe 21.

### 6.2.3.2.2.3 Métrique 2.2. Stratégie « Moins de monde »

Pour *Moins de monde*, les résultats présentent un coefficient de corrélation très faible  $r=-0.3$ . Cette motivation n'est pas transférable, en l'état (Figure Annexe 21). Cela peut être en lien avec la mesure de densité sur le quai, qui a été prise en une seule fois. La densité est une variable très fluctuante, d'une zone à une autre. Il est possible que ces effets de fluctuation soient plus saillants à des instants bien précis. De plus, la perception de la densité peut être liée à des facteurs subjectifs d'évaluation que l'on a évoqués (i.e. luminosité, etc.).

### 6.2.3.2.2.4 Métrique 2.3. Stratégie « Train »

Pour *Train*, les résultats présentent un coefficient de corrélation très faible  $r=-0.2$ . Cette motivation n'a pas été validé sur BFM donc on ne peut pas parler de transférabilité (Figure Annexe 21).

### 6.2.3.2.2.5 Métrique 2.4. Stratégie « Arrivée »

#### **Distribution entre les zones, par destination du top dix**

Pour chaque destination du top dix on a comparé sa distribution empirique des catégories « *Arrivées* », par zone, par rapport à la distribution simulée (voir Tableau 43).

Nous remarquons une amélioration de corrélation de certaines destinations et davantage pour la position « *voulue* ».

On note quatre destinations pour lesquelles les répartitions ne correspondent pas bien : *Evry Courcouronnes*, *Juvisy*, *Corbeil Essonnes*, *Vigneux sur Seine*. Cela nous rappelle le cas de *Juvisy* évoqué dans la partie d'analyses pour BFM (page 138). Selon ces analyses, les répartitions ne correspondent pas, pour deux hypothèses possibles : (i) l'effet de préférence d'une sortie plus qu'une autre (ii) la non utilisation d'une sortie par rapport à une autre quand ces deux mènent au même point au niveau de l'étage (bas ou haut).

Tableau 43. Valeurs de corrélation et p-value du KS-test pour chaque destination du top dix, en simulé « finale » et « réelle » - PN Simulation 2

Destination	Position finale (simulé) vs réelle		Position voulue (simulé) vs réelle	
	Corrélation	KS test	Corrélation	KS test
Yerres	0.84	0.9	0.9	0.9
Créteil Pompadour	0.53	0.15	0.56	0.9
Evry Courcouronnes	<b>-0.18</b>	<b>0.006</b>	<b>0.16</b>	0.06
Juvisy	<b>-0.05</b>	0.06	<b>-0.13</b>	0.15
Brunoy	0.81	0.5	0.76	0.9
Lieusaint Moissy	0.59	0.15	0.66	0.99
Corbeil Essonnes	<b>0.16</b>	<b>0.02</b>	<b>0.23</b>	<b>0.02</b>
Vigneux sur seine	<b>0.17</b>	<b>0.02</b>	<b>-0.005</b>	0.9
Orangis bois de l'épine	0.61	0.6	0.71	0.99
Savigny le temple Nandy	0.7	0.15	0.73	0.99

■ Variables testées sans effets significatifs

### Distribution agrégée des « arrivées », simulée versus réelle

Les valeurs des motivations, par zone, en agrégé sont bien meilleures que la simulation 1 - PN. Le coefficient de corrélation de la position « finale » simulée (Figure 183) versus réelle est fort et est égal à  $r=0.7$ . En ce qui concerne la position voulue simulée vs réelle, la corrélation est  $r=0.82$ .

Cette motivation se transfère très bien sur PN. L'effet de l'augmentation de la proportion de cette motivation vient à son avantage. Par ailleurs, il est toujours possible d'améliorer en prenant en compte les questions abordées sur les quatre destinations qui corrélerent moins bien.

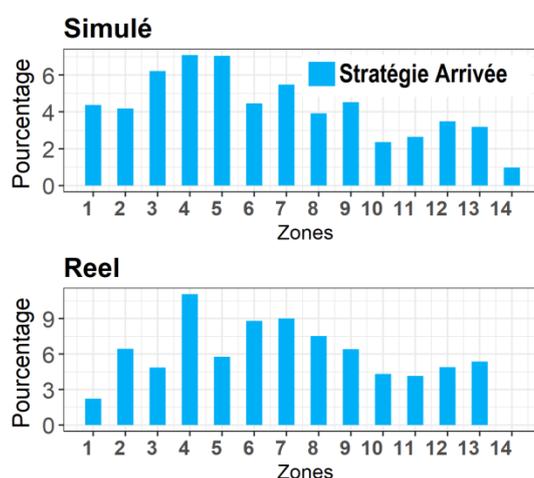


Figure 183. Comparaison des répartitions de la motivation « Arrivée » par zone. Réel versus simulée – position finale – PN Simulation 2

Le rassemblement des zones deux par deux (ce qui fait au total 7 zones sur le quai), augmente la corrélation pour la simulation position « finale » de  $r=0.7$  à  $r=0.85$ . Cela signifie que les résultats sont à une zone près d'une forte amélioration (Tableau 44). La fusion de zone a le même effet qu'à BFM, sur l'amélioration des résultats.

Tableau 44. Corrélations des valeurs Réelles et simulées, et fusion des zones, PN

Rassemblement zone	Reel VS Top dix reel	Reel VS simulé	Top dix réel VS simulé total	Top dix réel VS simulé Top dix
1	0.86	0.7	0.84	0.88
2	0.9	0.85	0.98	0.96

### 6.2.3.2.2.6 Métrique 3 : répartition sur le quai – densité

En ce qui concerne la densité, la corrélation de la position « *finale* » simulée vs réelle est modérée,  $r=0.5$ , et pour la position « *voulue* » simulée vs réelle, est forte,  $r = 0.71$  (Figure 184).

Ces deux valeurs sont nettement meilleures que la simulation 1 (Figure 174), pour laquelle on avait obtenu des liens faibles : pour la position « *finale* » simulée vs réelle,  $r=0.1$ , et pour la position « *voulue* » simulée vs réelle,  $r = 0.23$ .

Nous avons une amélioration nette de la densité avec les proportions de motivation de PN. Ce changement de représentativité des motivations améliore les résultats de densité.

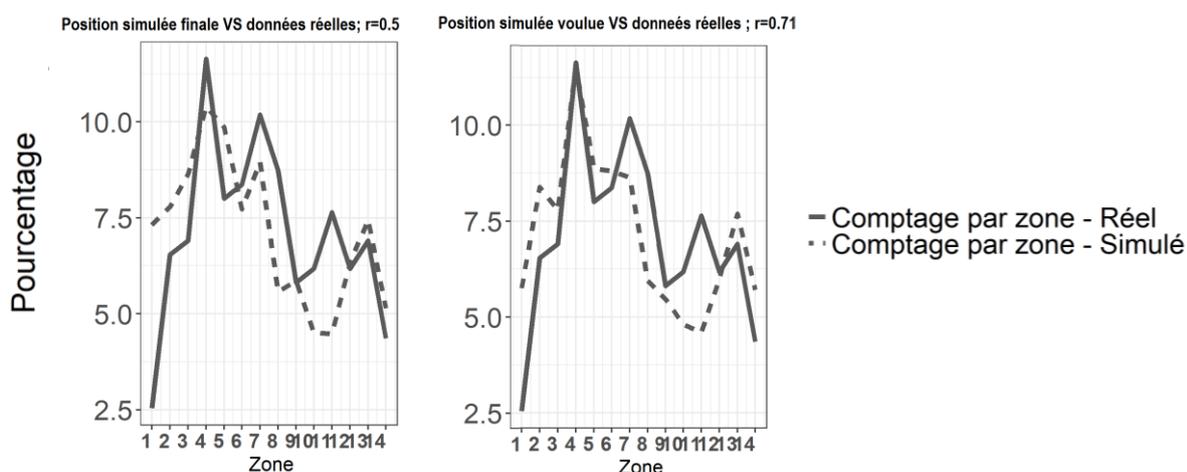


Figure 184. Comparaison de la densité finale Réelle avec la densité simulée des positions « *finales* » (a), et des positions « *voulues* » (b), PN Simulation 2

La densité des personnes est la résultante des choix de positionnement selon les motivations validées, soit « *Arrivée* » et « *Entrée* » (Tableau 45).

Tableau 45. Récapitulatif des corrélations des motivations avec les données empiriques

	Simulé « <i>voulue</i> » vs Réel	Simulé « <i>finale</i> » vs Réel
Entrée	0.62	0.6
Moins de monde	-0.3	-0.22
Train	-0.1	0.04
Arrivée	0.83	0.7

### ■ Variables testées sans effets significatifs

Au vu des résultats, le générateur d'utilisateur respecte les répartitions statistiques observées à 50% pour la simulation en position « *finale* » et à 71% pour la simulation en position « *voulue* ». Le cumul des motivations conduit à une bonne densité et par conséquent, le résultat est transférable.

#### 6.2.3.2.2.7 Métrique 4 : Flux de personnes

Nous avons presque les mêmes allures des courbes que celles obtenues dans la Figure 175. Cela est normal car le changement se traduit par une modification des proportions des motivations et par la suite modification de la densité sur le quai. On s'attend à des modifications notables concernant le nombre de montants, par porte.

#### 6.2.3.2.2.8 Comportements dans le train

Nous conservons le même comportement que BFM de la prise de siège exclusivement en fonction de la proximité des portes.

#### 6.2.3.2.2.9 Les caractéristiques des flux de montants et de descendants

Les valeurs « Montants » et « Descendants » réelles et simulées présentent un coefficient de corrélation de  $r=0.34$  et  $r=0.63$ , respectivement (Figure 185)..

La corrélation entre la densité théorique et le nombre de montants théorique est elle-même faible :  $r= 0.35$ . La corrélation entre la densité théorique et le nombre de montants simulé est modérée :  $r= 0.4$ . Cela est bien logique puisque l'on raisonne sur la densité en tant que métrique de validation. Il est donc un peu difficile de valider les chiffres par rapport à la charge par porte, car les données empiriques, entre elles-mêmes, présentent des variabilités. En revanche, on remarque une augmentation nette du nombre de montant sur la porte 4, qui ne correspond pas aux valeurs empiriques.

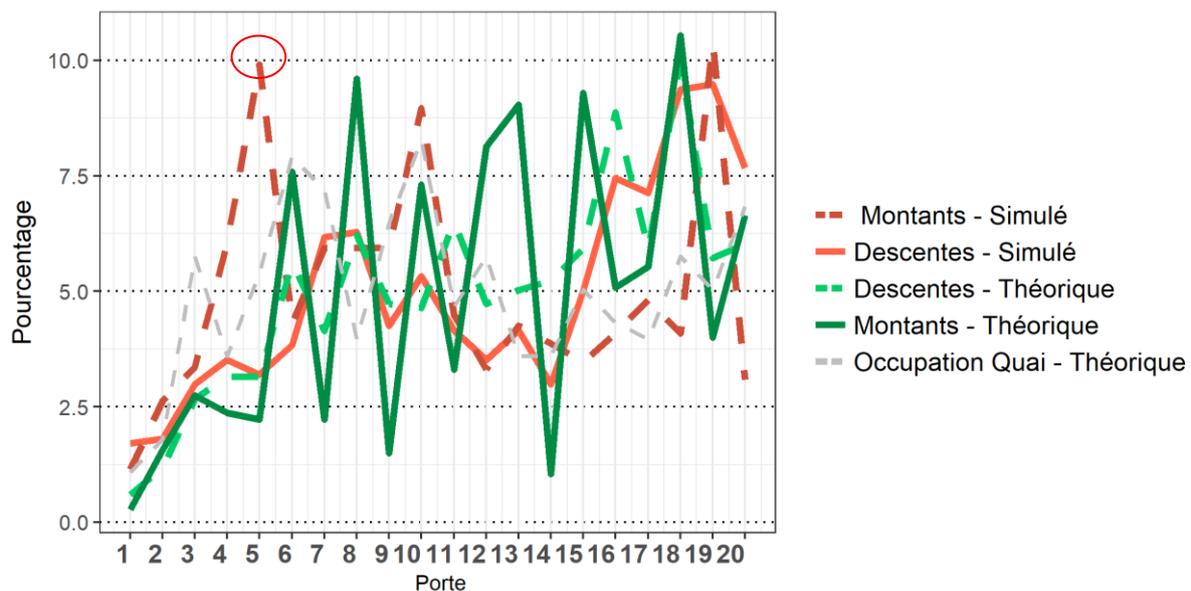


Figure 185. Flux montants et descendants, par porte, PN Simulation 2

On attribue cette augmentation à un facteur clé : les motivations « Arrivée » pour les 3 sur 4 destinations qui corrélient moins bien avec les données empiriques à savoir : *Juvisy*, *Evry Courcouonnes*, et *Vigneux sur seine*. C'est bien le cumul des motivations sur les zones 4 de ces destinations qui amplifie le nombre de montants sur la simulation. De plus, l'augmentation de la représentativité de la motivation « Arrivée » contribue à l'accentuation de cet effet. Nous évoquons encore une fois cette problématique : pour certaines destinations, il semble y avoir un comportement de préférence des sorties, ainsi la distribution des motivations « Arrivée » autour

des positions de sortie ne doit pas être uniformément répartie (Figure 186). On voit clairement les effets sur cette simulation.

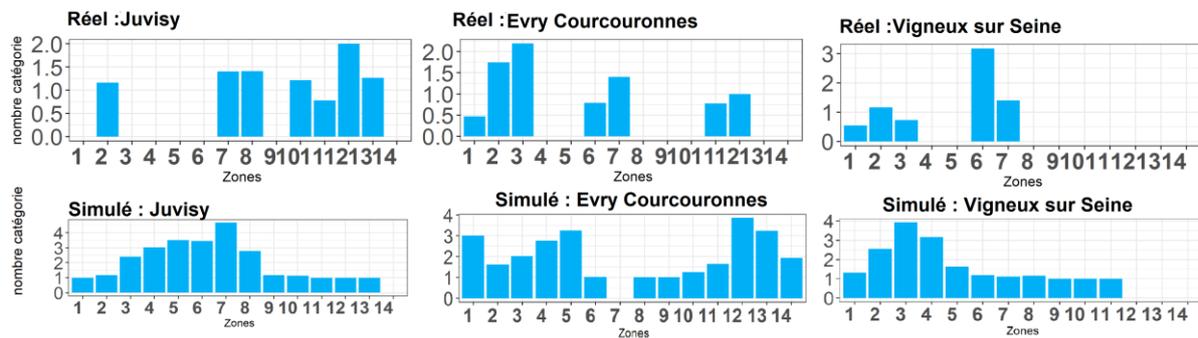


Figure 186. Préférence selon la sortie pour certaines destinations et impact sur le nombre de montants en simulé - PN Simulation 2

Dans la Figure 187 sont représentées les boîtes à moustaches avec les valeurs médianes et l'écart interquartile. On remarque que les moyennes de montées sont nettement plus élevées au niveau de la porte 4 et 19. La répartition sur le quai est assez bonne, néanmoins, les effets de l'amplification des réponses vers les zones de la porte 4 conduisent à des différences avec les résultats théoriques. Cela nécessite la compréhension des sorties préférées des destinations, afin d'éviter d'avoir ce cumul, non réel, et qui pourrait prolonger faussement les temps d'échanges et les temps d'arrêts. Nous ne pouvons pas considérer le nombre des montants, par porte, comme étant transférable. Cela est bien intéressant car l'on dispose d'une très bonne répartition selon la motivation « Arrivée », qui correspond à 70 % au réel. Cependant, ces 30 % restantes sont suffisantes pour créer une différence notable sur le rendu du système global.

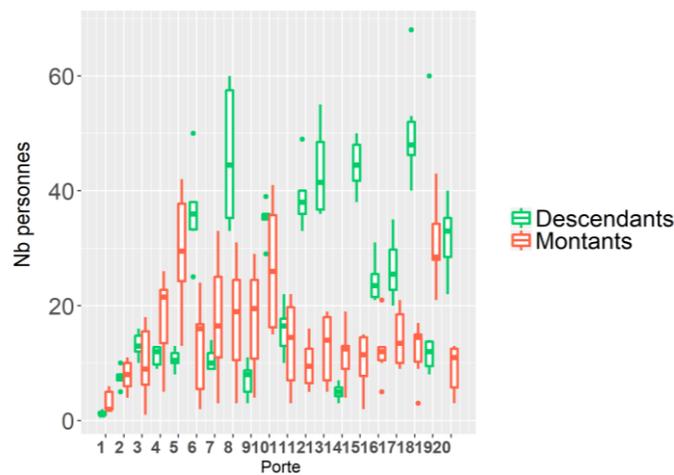


Figure 187. Variabilité des quantités des montants et descendants par porte, PN Simulation 2

#### 6.2.3.2.2.10 Mesures des temps d'échange

Nous mesurons l'étendue des durées d'échanges pour les flux montants et les descendants, et ceci pour chaque porte, à travers les échantillons recueillis. Par exemple, le temps de montée est la mesure à partir de la première et de la dernière montée, par porte. Il en est de même pour les descentes. Globalement, on remarque que certaines portes ont une durée de montée très augmentée avec une faible variabilité (Porte 19 : moyenne 52.8, sd=4.8 ; porte 4, moyenne=49.3,

sd=5.3). On note une augmentation des valeurs moyennes pour la porte 34 avec une diminution de l'écart-type, par rapport à la simulation 1 de PN, (Figure 179). Tandis que d'autres portes sont plus sujettes à de grandes variabilités (porte 17, moyenne=29.8, sd=16). D'autres portes présentent de faible temps d'échanges et de variabilité (Porte 11, moyenne=9.66, sd=6.5) (voir Figure 188).

Ces mesures ressemblent à celles obtenues dans la simulation 1 (Figure 179), à l'exception de l'amplification des temps pour la porte 4, qui n'est pas réaliste. Voir plus de données par échantillon, Figure Annexe 20. Nous ne disposons pas de temps d'échange au niveau de cette porte.

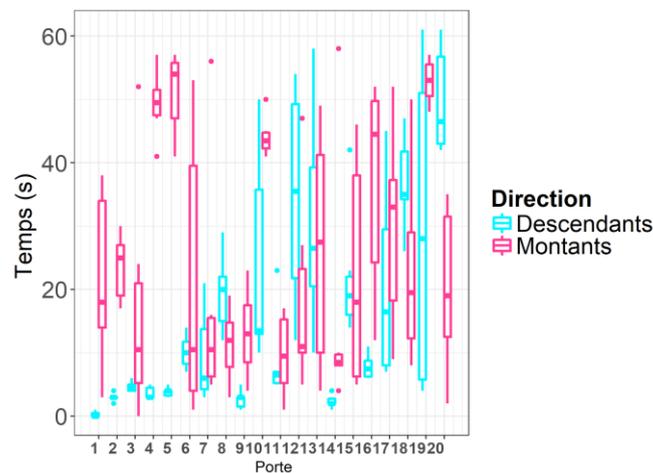


Figure 188. Temps de montée et de descente, par porte, PN Simulation 2

### Analyse des temps de montée « continu » et de descente

Nous procédons à une analyse comme suit : pour les temps de montée, nous enlevons toutes les montées qui n'appartiennent pas à un flux continu (la différence entre deux passages successifs est inférieure à 3 secondes). On remarque que les valeurs sont moins importantes que la dispersion est moindre. Voir Figure 189.

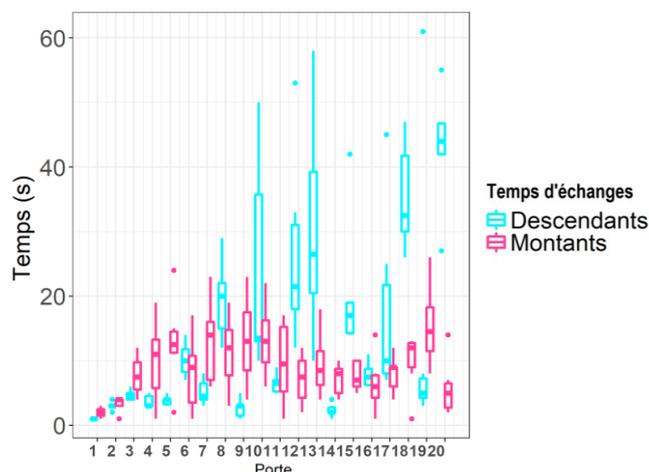


Figure 189. Sélection des flux exclusivement continus (moins de 3 secondes de séparation entre deux personnes) - PN Simulation 2

Nous reprenons les valeurs empiriques et les comparons avec les données simulées dans le Tableau 46.

Tableau 46. Temps de montée et de descente continus réels et simulés – PN – Simulation 2

Porte	Montée : Moyenne et écart-type : Réel	Montée : Moyenne et écart-type : Simulée	Descente : Moyenne et écart-type : Réel	Descente : Moyenne et écart-type : Simulée
1	1.5 (sd :2.1)	2.33 (sd : 0.57)	3.22 (sd :1.75)	1
3	2.72 (sd :1.8)	11 (sd : 4)	11.3 (sd :1.23)	6.12 (sd :2.6)
6	17.3 (sd :8)	9.23 (sd :6.15)	21.4 (sd :12.1)	10.3 (sd :2.6)
7	18.8 (sd : 2.6)	9.8 (sd :3.9)	20.1 (sd :0.84)	3.2 (sd :1.2)
9	8.9 (sd :2.7)	13.75 (sd :6.7)	6.4 (sd : 6.5)	2.6 (sd :0.5)
13	15.2 (sd :8.8)	7.37 (sd : 2.66)	13.2 (sd :1.9)	20.8 (sd :5.8)
15	17.5 (sd : 6.3)	5.8 (sd :4.9)	6.16 (sd :5.4)	29.5 (sd :13)
17	18.8 (sd :4.3)	9.25 (sd : 5.3)	21 (sd : 3.6)	12.6 (sd :8.8)
19	37 (sd :7)	37 (sd :1.16)	19 (sd : 32.6)	10 (sd :9)

Il subsiste des écarts en comparant les temps de montée et de descente simulés avec le réel. Nous obtenons des résultats semblables à ceux obtenus à BFM (Tableau 29). Ces écarts viennent :

- d'une part, de la variabilité du nombre de descendants, et d'autre part, du nombre de montants différent de la réalité, en conséquence de la motivation « *Arrivée* » qui s'effectue selon une préférence de sortie. Il s'agit de problématiques liées au transfert à PN.
- de plus, on a évoqué un possible effet des flux de « *préférence* » et « *d'aisance* » en lien avec l'architecture interne du quai, qui n'a pas été pris en compte dans la simulation. Il existe aussi des effets de lacunes induits par les espacements entre le quai et le train. Ces effets pourraient ralentir les flux d'une manière considérable. Il s'agit de problématique qu'on n'a pas pu, tester et valider à BFM.

#### 6.2.3.2.2.11 Temps d'arrêts

Nous disposons d'une vue globale des temps d'arrêts, qui a été étudiée en plusieurs parties (i) le temps de montée et descente continus (ii) des analyses sur les flux additionnels non continus. Nous avons implémenté un caractère hypothétique du comportement du conducteur qui se base sur la règle suivante : « *déclencher la fermeture des portes si, 3 personnes et plus sont présentes sur la bordure du quai, par porte* ». Cette règle ne montre aucune modification des temps d'arrêts du train qui restent invariants, à BFM. Comme on l'a démontré dans le Tableau 30 à travers divers scénarios comparatifs, ces variabilités sont liées au nombre total des montants par porte. Ces écarts quantitatifs de personnes, par porte, sont directement liés à des stratégies de positionnement sur le quai et au caractère sporadique des flux. Tout comme dans la simulation 1, nous relevons le fait que nous ne disposons pas d'une donnée clés qui conditionne les temps d'arrêt, c'est-à-dire le comportement du conducteur. De plus, de l'influence des facteurs techniques (i.e. signalisation) sur cette prise de décision. A ce titre, nous ne pouvons pas parler de transférabilité des temps d'arrêt, mais nous disposons de plusieurs processus transférables de cette macro-métrique.

#### 6.2.3.2.2.12 Conclusion et discussion

Dans le tableau suivant (Tableau 47), nous présentons un récapitulatif des variables testées, en comparaison avec BFM (Tableau 46).

Tableau 47. Récapitulatif des effets testés sur la simulation, à BFM et PN Simulation 2

Variable - comportement	Simulé vs Réel - BFM			Simulé vs Réel - PN		
Entrée	0.8			0.6		
Moins de monde	0.6			<b>-0.22</b>		
Train	<b>-0.2</b>			<b>0.04</b>		
Arrivée	0.56			0.7		
Densité	0.71			0.5		
Allure des montants en pic	Oui			Oui		
Nombre montants total	Légèrement supérieur			Légèrement inférieur		
Nombre descendants total	Oui			Légèrement supérieur		
Montant par porte	0.51			<b>0.34</b>		
Descendant par porte	0.51			0.63		
Vitesse de montée		<b>Simulé</b>	<b>Réel</b>		<b>Simulé</b>	<b>Réel</b>
	1300 mm	0.79	1.1	1300 mm	0.78	1.23
	1800 mm	0.71	0.82	1800 mm	0.69	1.09
Vitesse de descente		<b>Simulé</b>	<b>Réel</b>		<b>Simulé</b>	<b>Réel</b>
	1300 mm	0.7		1300 mm	0.58	0.91
	1800 mm	0.61		1800 mm	0.42	0.85
Effet du nombre des usagers sur le temps d'échange	Oui			Oui		
Effet de largeurs de porte	Oui			Oui		
Influence des flux de préférence versus aisance	<b>Non testé</b>			<b>Non testé</b>		
Influence de la disposition des étages	<b>Non testé</b>			<b>Non testé</b>		
Sporadicité	Oui			Oui		
Comportement du conducteur	<b>Données insuffisantes</b>			<b>Données insuffisantes</b>		
Temps d'arrêts	<b>Nécessite une connaissance du comportement conducteur + signalisation du système ferroviaire.</b>			<b>Nécessite une connaissance du comportement conducteur + signalisation du système ferroviaire.</b>		
Zipper effect	Oui			Oui		
Création de ligne	Oui			Oui		
Shadow effect	Oui			Oui		
Comportement grégaire	Existe mais non déployé pour cette étude			Existe mais non déployé pour cette étude		
Stop & go, turbulence, freezing by heating, faster is slower	<b>Non testé</b>			<b>Non testé</b>		

■ Variables testées sans effets significatifs

Les valeurs des motivations « Arrivée » et « Entrée » sont valides si l'on compare leurs distributions avec les données théoriques. La motivation « Moins de monde » et « Train » n'est pas valide. Dans le cas PN, la représentativité des catégories « Moins de monde » et « Train » est moindre qu'à BFM (10.3 % contre 17% à BFM). La densité sur le quai en position « finale » est à  $r=0.5$ . Elle peut cependant être améliorée si le système simule les positions « voulues ». Ce qui constitue une des pistes d'amélioration de la simulation.

Le modèle se transfère bien si on considère les motivations « *Arrivée* » et « *Entrée* » et la densité résultante, semblable au réel à 50 %. Cependant, cette ressemblance n'a pas assuré le bon enchaînement du processus. Des déséquilibres dans la distribution de la densité peuvent entraîner une charge importante par porte (exemple de la porte 4). Cela peut avoir des implications sur les temps d'échange, la prise de décision du conducteur et les temps d'arrêts.

## 6.2.4 Conclusion sur le transfert

Les résultats de la transférabilité sont globalement satisfaisants. Les métriques ont été validées une par une et la bonne correspondance des motivations « *Arrivée* » améliore remarquablement les résultats de la simulation.

Les pourcentages des motivations ne sont pas les mêmes qu'à BFM. Il n'y a pas d'apparition de nouvelle motivation pour Paris Nord. On remarque une variabilité dans les pourcentages des motivations, par rapport à BFM. On a une augmentation très nette de la motivation « *Arrivée* » (Tableau 41). La sous-représentation de la motivation « *Entrée* » corrige les écarts constatés dans la simulation 1. La surreprésentation de la motivation « *Arrivée* » améliore sa distribution générale et la densité. Par ailleurs, cette surreprésentation fait apparaître des déséquilibres et démontre un fait important : même avec une bonne distribution simulée de la motivation « *Arrivée* » (semblable à 70% au réel), l'enchaînement du processus n'aboutit pas au niveau de la charge de montant, par porte.

Nous arrivons à un niveau beaucoup plus fin de la simulation qui requiert d'explorer davantage d'autres dépendances avec d'autres variables. Nos analyses statistiques étendues à BFM (page 138) nous orientent vers un possible effet des propriétés des destinations (i.e. fréquence de desserte, temps de trajet). Dans ce que suit, nous lançons une étude comparative entre les deux gares afin d'ouvrir des perspectives à ce travail.

### 6.2.4.1 Bibliothèque François Mitterrand

#### *Variabilité des motivations par destination*

Nous avons défini le pourcentage de la catégorie « *Arrivée* » en corrigé à 63%. Seulement, quand nous définissons cette valeur, nous le faisons pour toutes les destinations. Autrement dit, on suppose, que chaque destination génère 63 % de catégorie « *Arrivée* », et si ce n'est pas le cas ? Les motivations de positionnement sont-ils dépendants de la destination ?

Il y a en effet, une relation entre l'occurrence des catégories de positionnement en longueur et les 12 zones ( $\chi^2(33)=135.5, p<0.001$ ). Cela peut être constaté visuellement sur la Figure 190. On observe un effet de variabilité des motivations, selon la destination.

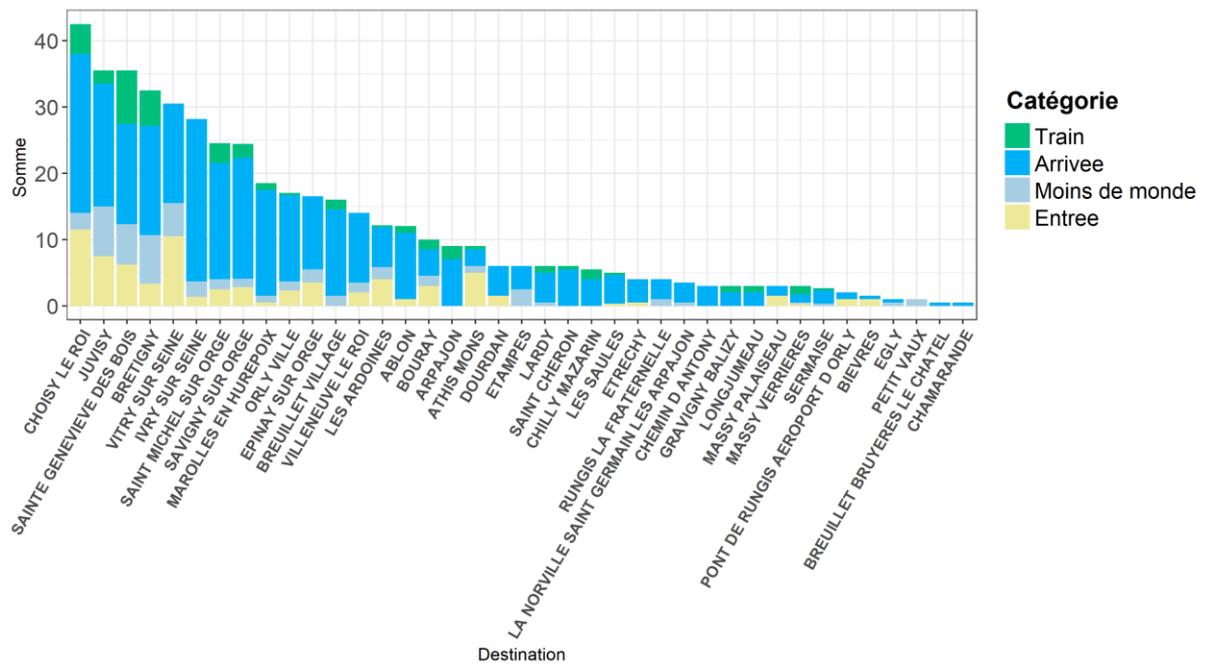


Figure 190. Variabilité des motivations, selon la destination. BFM.

Il semble y avoir une relation entre la destination et la stratégie, en effet, nous avons des effets significatifs pour les stratégies « Entrée » ( $\chi^2(38)=64, p<0.01$ ), « Train » ( $\chi^2(38)=58.5, p<0.05$ ) et « Arrivée » ( $\chi^2(38)=66, p<0.01$ ). L'effet est non significatif pour la stratégie « Moins de monde » ( $\chi^2(38)=49.8, p=0.09$ ). Le test post-hoc pour la stratégie « Entrée » et « Train » rapporte un effet significatif ( $p<0.05$ ) associé à une pente négative pour les destinations mentionnées dans le Tableau 48. Pour « Arrivée » des effets significatifs ( $p<0.05$ ) avec une pente positive pour les destinations dans le Tableau 48.

Tableau 48. Augmentation (+) ou diminution (-) significative des motivations, selon la destination.

Destination	Entrée	Train	Arrivée
ABLON	-	-	+
ARPAJON		-	
ATHIS MONS		-	
BRETIGNY	-	-	
BOURAY		-	
BREUILLET VILLAGE		-	+
CHOISY LE ROI	-	-	
EPINAY SUR ORGE	-		
IVRY SUR SEINE	-		+
JUVISY	-	-	
MAROLLES EN HUREPOIX	-	-	+
LES ARDOINES		-	
ORLY VILLE	-	-	+
SAINT MICHEL SUR ORGE	-	-	
SAINTE GENEVIEVE DES BOIS	-	-	
SAINT CHERON			+
SAVIGNY SUR ORGE	-	-	+
VILLENEUVE LE ROI	-		
VITRY SUR SEINE	-		

**Variabilité des motivations par mission**

Si l'on dispose de relation entre les stratégies et les destinations, on prédit l'existence d'une relation entre les stratégies et les missions, puisque ces dernières sont constituées d'une liste de destinations à desservir.

Nous n'obtenons aucun effet significatif entre la mission du train et les quatre stratégies ( $p > 0.05$ ). Nous rejetons l'hypothèse selon laquelle il y a l'existence de relation entre mission et stratégie.

Ceci est un fait intéressant : nous avons essayé de passer de données micro (destination) en un peu plus macro (mission = liste de destinations). Les effets du micro se perdent dans le macro et n'en font pas la somme.

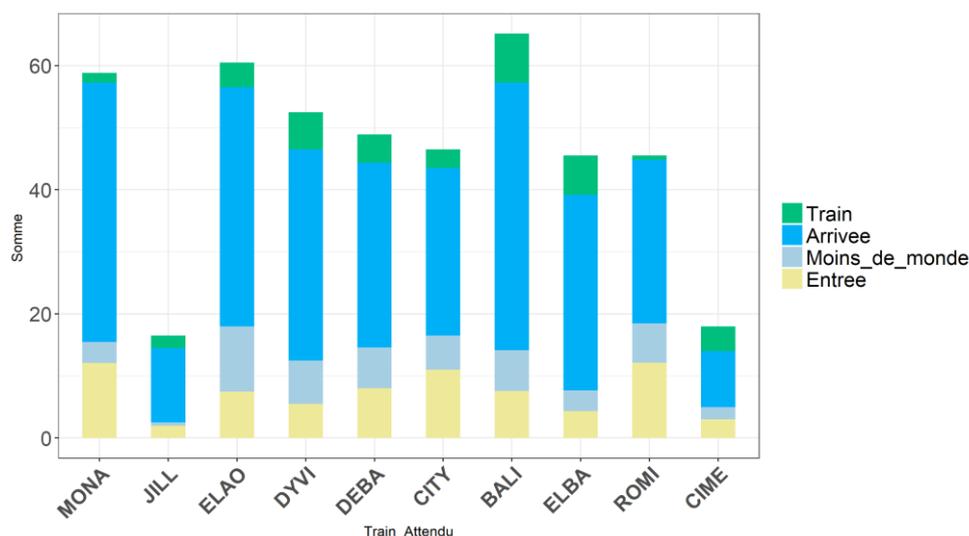


Figure 191. Variabilité des motivations, selon la destination. BFM.

### Quel est le lien entre la motivation et la destination ?

Il a été démontré dans la partie 5.2.1.7.1 (voir Tableau 3) une dépendance avec des variables propres au trajet, à savoir, le temps de trajet et la fréquence de desserte, ainsi que des variables individuelles.

Pour rappel, les variables ont été converties en variables binaires, comme suit dans le Tableau 49 :

Motif (0=maison, autre= 1) ; Type (Non habitué =0, Habitué = 1) ; Déplacement (Seul=0, groupe =1).

Dans le tableau suivant sont rapportés les effets marginaux qui peuvent être interprétés comme suit : la probabilité d’avoir une motivation « Arrivée » diminue de -0.25 pour chaque Motif =1.

Tableau 49. Les effets marginaux et probabilité de motivation en fonction de variables individuelles et contextuelles

	Motif=1	Type=1	Fréquence	Déplacement=1	Age	Temps
<b>Arrivée</b>	-0.25	0.12	-0.005			
<b>Quai</b>		-0.2	0.005	0.43		
<b>Entrée</b>		-0.17				-0.0038
<b>Moins</b>			0.0015	-0.13		
<b>Train</b>	0.03				0.002	Times(20,30] 0.12 Times(30,40] 0.23

■ Variables non testées

On remarque des effets significatifs de la fréquence et des temps de trajet. Pour des fréquences de 46 sur les 3 heures de pointe, la probabilité d’avoir une motivation « Arrivée » diminue de 0.23.

Nous n’avons pas d’effets significatifs du « temps de trajet » pour les motivations autres que « train ». Tout porte à croire que la variable « destination » comporte d’autres sous-variables autres que la « fréquence de desserte » et le « temps de trajets ». Il est possible que, si la position des sorties

destinations est proche de la zone d'entrée, cela risque d'augmenter la chance d'avoir la motivation « arrivée ». Cette variable n'a pas été testée dans la présente étude.

#### 6.2.4.2 Paris Nord

On dispose déjà, de plus d'informations sur les dépendances des motivations avec d'autres variables sur Paris Nord. Comme BFM, nous étudions en plus les relations possibles entre les variables, les motivations de positionnement et la description de données correspondantes (Tableau 50).

Tableau 50. Relations possibles entre les variables, les motivations de positionnement et la description de données correspondantes

Variables	Catégories		Quai	Sous catégories quai		Train	Arrivée
				Entrées	Moins dense		
Age			37.5 (sd:12.2)	39.15 (sd : 12.4)	37.5 (sd :16.3)	43 (sd :11.07)	38.3 (sd: 13.9)
Genre: Femme			0.54	0.43	0.54	0.16	0.54
Type : Habitué			0.73	0.72	0.69	0.75	0.9
Motif : Maison			0.77	0.5	0.63	1	0.82
Temps de trajet (Minutes)			42.7 (sd:19.3)	45 (sd :21.6)	41.4 (sd :13.6)	42 (sd : 12.3)	40.3 (sd : 14.5)
Fréquence de desserte			16.9 (sd : 8.6)	17.5 (sd : 9.13)	15.8 (sd :7)	15 (sd:5.4)	17 (sd: 8.2)
N			55	28	9	11	197

Grâce à ces données, nous sélectionnons les meilleurs modèles selon les valeurs d'AIC<sup>18</sup> (Tableau 51).

Tableau 51. Sélection du meilleur modèle selon les valeurs AIC les plus faibles

Variable	Meilleur modèle selon valeur d'AIC	
	Individuelle / trajet	Contextuelle
Quai	~ Type	+ Position entrées + Comptage entrée
Entrée	~ Temps + Type	+ Position entrées + Comptage entrée
Moins de monde	~ Motif	
Train	~ Genre	Nb montants.
Arrivée	~ Type	

**. Marginalement significatif : p=0.07**

On vérifie si les mêmes dépendances sont présentes dans cette gare. Nous remarquons, que l'effet de « Fréquence » n'apparaît pas dans cette analyse pour les motivations « Arrivée » et « Entrée ». Il y a un effet du « temps » sur le choix « Entrée » (p<0.05). Les effets marginaux sont rapportés dans Tableau 52.

Tableau 52. Les effets marginaux et probabilité de motivation en fonction de variables individuelles et contextuelles

<sup>18</sup> Akaike's Information Criterion

	Motif=1	Type=1	Fréquence	Age	Genre=1	Temps
Arrivée		0.30				
Quai		-0.18				
Entrée		-0.12				0.0017
Moins de monde	0.07					
Train					-0.05	

■ Variables non testées

### La variabilité des motivations en fonction de la destination

Il semble y avoir une relation entre la destination et la stratégie, en effet, nous avons des effets significatifs pour « Arrivée » ( $\chi^2(33)=54, p<0.01$ ), mais pas d'effets significatifs pour « Moins de monde », « Entrée » et « Train ».

Le post-hoc pour « Arrivée » rapporte un effet significatif ( $p<0.05$ ) associé à une pente positive pour les destinations mentionnées dans le Tableau 53.

Tableau 53. Augmentation (+) ou diminution (-) significative des motivations, selon la destination.

Destination	Arrivée	p-value
ORANGIS BOIS DE L'EPINE	+	0.04
VIGNEUX SUR SEINE	+	0.02
YERRES	+	0.001
COMBS LA VILLE	+	0.054.
EVRY COURCOURONNES	+	0.07.

. Marginalement significatif

### La variabilité des motivations en fonction de la mission

Il n'existe aucun effet significatif de la mission sur la motivation.

#### 6.2.4.3 Etude comparative entre BFM et PN

On a évoqué dans la partie de validation BFM, un possible lien avec l'architecture du quai de la destination. En effet, le fait d'avoir supposé le même pourcentage de motivation « Arrivée » pour toutes les destinations semble inapproprié. On propose que les positions des sorties des destinations qui correspondent aux zones d'entrées du quai de départ (BFM / PN) les plus proches de la provenance des flux majoritaires, soient un facteur d'amplification de cette motivation.

Dans ce qui suit, nous étudions les distances des sorties des destinations du top dix, par rapport à l'entrée 1 du quai de BFM et de PN. Nous ne disposons que des mesures du top dix.

Tableau 54. Comparaison des distances des sorties des destinations les plus significatives, parmi les destinations du top dix

Gare BFM	Sortie par rapport à l'entrée en direction du flux majoritaire	Gare PN	Sortie par rapport à l'entrée en direction du flux majoritaire
Choisy	124,49	Orangis bois	176,3
Vitry sur seine	84,68	Evry courcouronnes	0
Saint Geneviève des bois	158,9	Corbeil essonnes	85
Juvisy	120	Juvisy	116
Brétigny	110	Vigneux sur seine	181,7
Ivry	15,86	Yerres	182,9
Savigny	186,99	Brunoy	78,4
Saint Michel sur orge	143,66	Lieusaint - Moissy	102,73
Marolles	179,92	Savigny le temple	127,4
Epinay sur orge	113,73	Créteil pompadour	140,1

**\*Effet statistiques significatifs de l'augmentation de la catégorie « Arrivée »**

- A BFM : les destinations les plus significatives sont des distances extrêmes (2 maximales, et minimale)

- A PN : les destinations les plus significatives sont des distances extrêmes (3 distances maximales).

Une hypothèse possible : la motivation « Arrivée » peut être résumée par les deux modes de raisonnements suivants :

1) C'est ma zone d'entrée la plus proche et ça correspond à ma zone de sortie, il est très rentable de rester à ce niveau-là.

2) Je rentre d'un côté très éloigné du quai ; à mon arrivée, cela va me coûter beaucoup de temps pour atteindre l'autre bout du quai. Autant le faire maintenant car ce temps-là sera comptabilisé sur mon temps d'attente.

Dans ce cas-là, il est nécessaire de procéder à des recueils complémentaires de toutes les destinations, afin de comprendre l'effet de cette distance.

#### 6.2.4.4 Reformulation des motivations

Nous avons opté pour une simulation basée sur les motivations, nous amenant à étudier des liens de causalité. Cette formulation s'avère intéressante à travers notre modèle sur deux motivations « Arrivée » et « Entrée ». Elle fournit des résultats globalement valides et transférables et donne une densité sur le quai semblable à 50 % aux résultats empiriques. Nous observons tout de même de légers déséquilibres au niveau de la charge par porte, dû à une incompréhension sur une préférence de sortie parmi plusieurs, pour la motivation « Arrivée ».

Par conséquent, pour aboutir à un modèle plus fin, il est nécessaire d'approfondir notre étude en reformulant ce lien avec d'autres dépendances.

A ce niveau du travail, la formulation de la motivation « *Arrivée* » peut être grandement améliorée en investiguant les propriétés architecturales des origines et des destinations et leurs effets dans la prise de décision. Cette reformulation peut améliorer considérablement la transférabilité de cette motivation.

Le critère qui aura été retenu durant tout ce travail, reste l'accès aux données permettant de paramétrer ces motivations. Les données quantitatives et qualitatives des matrices origines / destinations semblent accessibles, s'il fallait faire une étude des endroits où se trouvent les logements des usagers et leurs lieux de travail (causes principales de cette matrice), le travail serait beaucoup trop complexe.

Pour ce qui est de la motivation « *Moins de monde* », la dépendance avec la densité n'apparaît sur PN. Il se pourrait qu'il existe un facteur sensoriel, non objectif, qui augmenterait cette prise de décision. Cela nécessite une étude minutieuse et étendue (nombre d'échantillons larges) de l'architecture du quai et de ces composantes (i.e. luminosité, etc.). Il en est de même pour la compréhension de la motivation « *Train* ».

La généralisation de ces principes nous a conduit à comparer, sur les deux sites, les points forts et faibles de la simulation. Pour les deux modèles, certains dysfonctionnements qui semblent être en commun nous ont conduit à une vision commune des faits et à un processus de retro-transférabilité étant bénéfique pour les deux modèles à la fois.

## **Analyse et discussion**

## 7 Analyse et discussion

Dans cette thèse, nous avons montré la possibilité de construire un modèle de comportement de foules basés sur les motivations. Ce modèle a été ensuite validé. Ceci nous a permis d'étudier et valider sa transférabilité.

Les données de simulation validant le modèle de départ (BFM) sont bien satisfaisantes (Tableau 55 Partie BFM).

Nous avons opté pour une simulation basée sur les motivations, nous amenant à étudier des liens de causalité. Cette formulation s'avère intéressante à travers notre modèle. Elle fournit des résultats globalement valides et favorise bien la transférabilité (Tableau 56 Partie PN simulation 2). Cependant, ces liens de causalité nous invitent parfois à approfondir notre étude vers un niveau causal encore plus en amont du comportement (la cause de la cause).

Les résultats de la transférabilité sont globalement satisfaisants. Les métriques ont été validées une par une et la bonne correspondance de la motivation « *Arrivée* » améliore remarquablement les résultats de la simulation.

L'un des apports de ce travail est la mise en place d'un principe général développé pouvant être réutilisable pour des études qui se concentrent sur la problématique de transférabilité. Ce principe général se base sur le développement d'une méthode pour valider notre modèle et la transférabilité. Cette méthode consiste à reprendre deux gares existantes. Elle nous a permis, de déterminer que certains paramètres qui nous semblaient endogènes (transférables) ne l'étaient pas en réalité. Dans un autre cadre de simulation, le même processus doit être suivi afin de déterminer le plus fidèlement possible les paramètres endogènes et exogènes.

Les cas de non transférabilité peuvent se résumer aux cas de figure suivants :

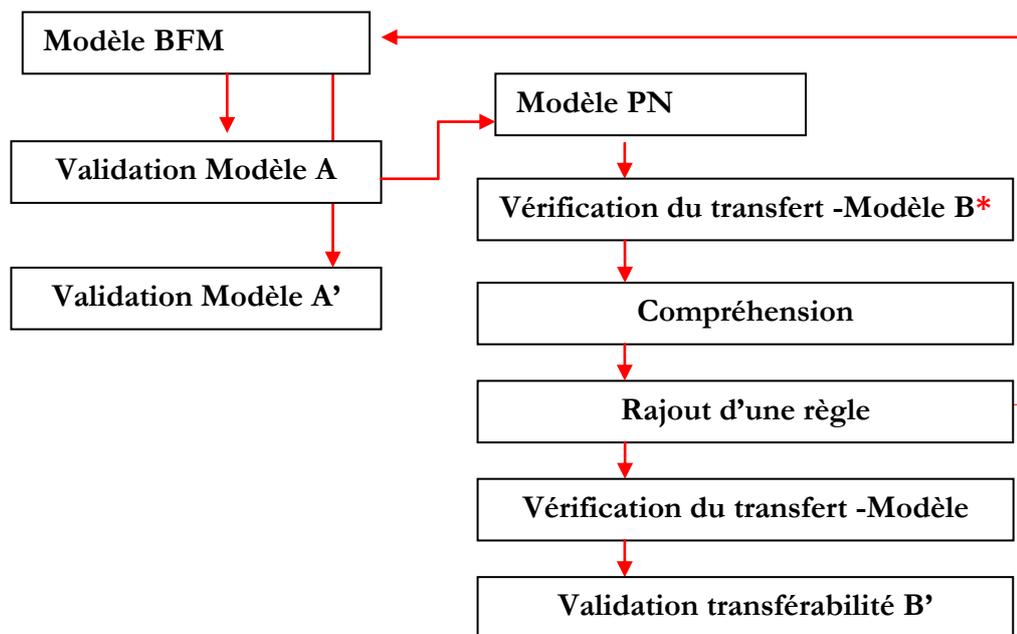
- Une ou plusieurs motivations de A ne s'expriment pas dans B
- Une motivation de B n'existait pas dans A
- Les motivations n'ont pas la même pondération (représentativité) d'un contexte à un autre :
  - o Soit les paramètres utilisés pour le calcul de la pondération du comportement ont changé
  - o Soit le calcul ne tient pas compte d'un paramètre qui n'est pas nécessaire dans la situation A

Dans notre cas, on retrouve les mêmes comportements mais pas dans les mêmes proportions (Tableau 42). L'opération du transfert est doublement bénéfique : elle permet de vérifier la validité externe du modèle, et de disposer de deux cas d'études qui présentent des variabilités dans les résultats. Elle constitue une invitation à revoir les liens de cause à effet établis en fonction des caractéristiques de chaque site. Par exemple, dans le présent travail, nous avons proposé, d'attribuer les causes des motivations de positionnement sur le quai à une variable dont la sémantique n'est pas déterminée qui englobe toutes les motivations liées à la destination. Parvenir à donner un sens à cette variable revient à formuler la motivation selon cette variable.

Cela peut permettre le passage de la variable « proportion de motivation » d'exogène à endogène. Ce qui constitue une grande évolution, car il n'est plus nécessaire d'effectuer des études de motivation dans chaque gare.

Cependant, si l'on transfère le modèle à un troisième site et que les enquêtes montrent la présence de comportements non observés dans les autres sites, il y a nécessité de réaliser des études de ces nouveaux comportements et de modifier le simulateur en conséquence. Il y a nécessité d'investiguer si ces comportements sont liés aux causes identifiées ou à la présence d'une nouvelle cause. Dans le premier cas, on est confronté à une prise de décision différente liée à une cause connue, et il est intéressant de comprendre pourquoi. Cette compréhension peut permettre d'améliorer les modèles précédents. Dans le second cas, le lien est clair, car il y a introduction d'une nouvelle variable dans le système.

Bien que le principe précédent n'ait pas été complètement expérimenté (nous n'avons travaillé que sur deux gares), cette itération permettant d'améliorer un modèle existant à partir des résultats du transfert a été testée. En effet nous avons fait un retour du modèle que nous avons transféré sur PN vers le contexte source, ce qui nous a permis d'améliorer le modèle de départ. La Figure 192 montre ce processus.



### **\*Définition des variables endogènes et exogènes**

Figure 192. Retro-transférabilité et amélioration du modèle du contexte source et cible, à la fois

Il est intéressant de s'interroger si ce processus pourrait être généralisé. En d'autres termes, si on améliore un modèle sur une situation quelconque est-ce que globalement cela améliore le modèle sur toutes les situations ? Cela revient, avant tout, à s'interroger sur la nature de cette amélioration : est-elle endogène au phénomène ou bien dépendante d'un contexte bien particulier ? C'est cette phase d'évaluation de la potentielle amélioration, sur le site du transfert, qui doit être étudiée minutieusement afin de continuer sur une capacité de généralisation des conclusions obtenues.

Prenons l'exemple suivant : lors des échanges qualitatifs avec les usagers à BFM, on a remarqué une tendance des usagers, à exprimer leurs choix, selon l'entrée empruntée vers le quai. Cette entrée présente une caractéristique : son orientation. En effet, les escaliers/escalateurs n'ont pas tous la même orientation sur le quai. Les usagers argumentent leur positionnement et leur mouvement en faisant implicitement référence à l'escalier emprunté (sans forcément se rendre compte de l'impact de la direction des escaliers). Nous avons remarqué qu'il y a une forte tendance à se déplacer dans le sens de l'arrivée. Nous n'avions pas anticipé cet effet dans nos questionnaires.

Lors de la campagne de questionnaire à PN, nous avons prévu une question : *par quelle entrée êtes-vous arrivé ?*

Nous avons établi, en fonction de ces réponses, une matrice montrant les mouvements des usagers. Sur l'axe X est représentée la zone actuelle et l'axe Y, la zone d'entrée. Le résultat est visuellement discernable à travers une matrice triangulaire inférieure (Figure 193).

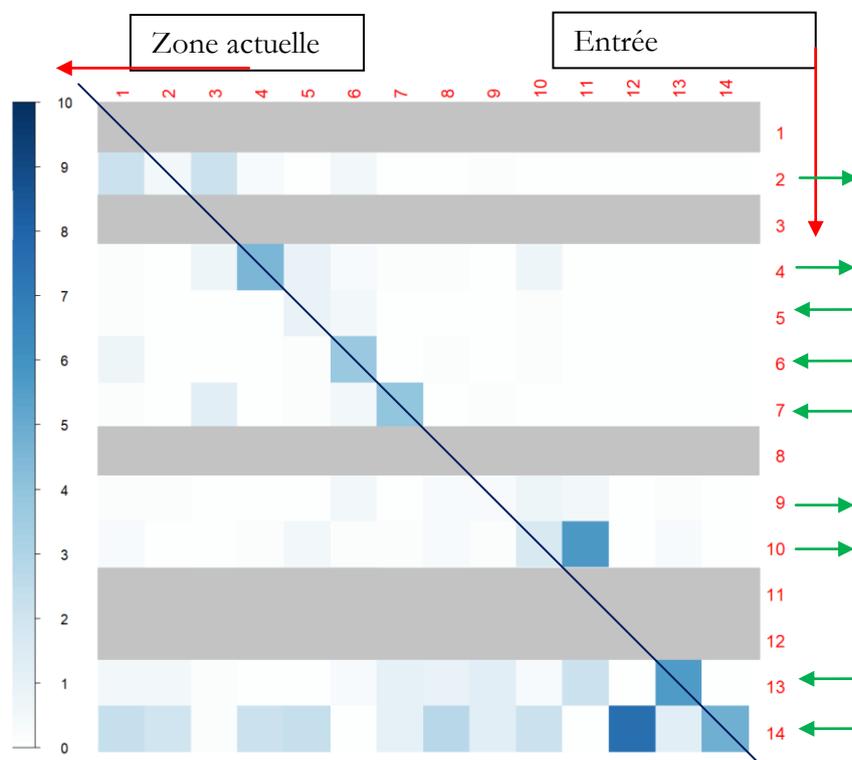


Figure 193. Matrice des mouvements des usagers des entrées vers les zones de positionnement

Selon la Figure 193, une majorité des personnes arrivant de 14 avancent vers 12 (bleue foncé). Les zones grisées signifient qu'il n'y a pas d'entrée. On remarque dans ce graphe (i) une diagonale ce qui souligne qu'une partie des personnes reste au niveau de la zone d'entrée (ii) un avancement des zones d'entrée vers les premières zones, rarement dans le sens inverse (iii) quelques mouvements dans le sens inverse sont amplifiés par la direction des escaliers (flèches vertes). Nous en avons conclu, qu'il s'agit d'une règle comportementale de navigation dans le sens de l'arrivée selon la direction de l'escalier.

Bien évidemment, le modèle de simulation est bien le produit de ce travail. Mais il a été d'une grande utilité pour tester la validité de notre hypothèse, et ceci dans les deux sites. Cette règle comportementale a contribué à une grande amélioration du modèle.

# Conclusion

## 8 Conclusion

Nous avons posé le problème suivant : comment prédire le comportement d'une foule dans un contexte déterminé, en fonction de faibles variations de ce contexte ? Pour ce faire, nous avons proposé une méthodologie pour résoudre ce problème et une manière de valider cette méthodologie.

Ceci a demandé l'enrichissement d'un simulateur de foule existant à travers la réalisation d'enquêtes de motivations (2361 personnes interrogées au total) et l'identification des variables sur les sites d'études (gare BFM, PN ligne D sens sud, PN ligne B sens sud).

Dans le chapitre précédent nous avons montré que, globalement, nous avons atteint nos objectifs grâce à la simulation microscopique, multi-agents et l'approche motivationnelle qui nous ont permis une représentation fine des détails du phénomène.

L'approche motivationnelle formulée grâce à des liens de cause à effets s'avère très intéressante dans notre cas. Elle permet d'investiguer les causes plus ou moins immédiates en considérant que ces motivations sont des motivations réactionnelles à des causes internes et externes décrites par les usagers. L'usager décrit les choses selon sa perception du monde et de l'instant présent. Il n'a pas forcément conscience de tous les liens qui ont causé sa prise de décision, mais il est bien capable d'attribuer son action à au moins une cause. Cela a été mis en évidence avec un faible taux de réponse de choix non intentionnel (N=43 par rapport à 842 questionnaires sur le quai)

En ce qui concerne notre problème du transfert, cette description s'avère suffisante. Néanmoins, nous avons aussi ouvert des perspectives sur la reformulation des motivations selon une variable implicite inconnue de chaque destination, et qui semble influencer le choix de motivation. Ainsi, l'approche motivationnelle permet un enrichissement progressif du comportement, au fur et à mesure de sa compréhension, et ceci en restant sur une même formulation : de la cause vers l'effet.

La prise de décision est enrichie par un système perceptif visuel des agents qui permet d'ajuster leur décision selon ce qu'ils perçoivent, en temps réel. Cela rejoint le point de vue de la cause proximale qui prend en compte les variabilités contextuelles, externes et internes dans la modification du comportement de l'agent.

Dans ce qui suit, nous allons décrire plusieurs axes d'études qui n'ont pas pu être explorés dans les délais prévus de la thèse. Par exemple, le processus de retro-transférabilité via l'ajout d'une règle comportementale à PN vers BFM a rapporté des résultats très satisfaisants sur la simulation. Cette règle comportementale a été constatée qualitativement mais n'a pas été quantifiée à travers une étude dédiée.

De plus, le nombre d'échantillons sur le RER D à PN est plus bas qu'à BFM (N=297 contre N=545). Un nombre plus grand de personnes aurait pu nous renseigner sur les catégories minoritaires. Par exemple, nous n'avons pas pu investiguer le mauvais fonctionnement de la motivation « *moins de monde* » à PN, qui ne concerne que 3.6 % des motivations.

Pour ce qui est de la motivation de positionnement selon « *moins de monde* », dans tous les cas, l'une des pistes d'amélioration consiste à supprimer l'omniscience des agents de cette motivation, au profit d'une exploration comparative de proche en proche. Cela permettra aux agents d'avoir cet aspect humain d'exploration selon ce qu'il perçoit, à l'approche d'un train. De plus, une quantification des motivations et d'autres mesures ont été faites empiriquement par zone, ce qui nous a conduit à reprendre la notion de zone dans le simulateur. La densité est donc estimée par zone. Il serait peut-être intéressant de s'abstraire de la notion de zone au profit d'une mesure continue en mètres.

Nous avons démontré l'efficacité de la simulation en position « *voulue* » par rapport à la position « *finale* ». Pour rappel, les agents se décalent légèrement en raison d'une recherche de place libre moins minutieuse qu'en réalité. Il est donc important de pouvoir passer le rendu de la simulation vers la position « *voulue* ».

A l'arrivée du train, le choix des portes par les agents suit la loi du moindre effort, en sélectionnant la porte la plus proche. L'une des pistes d'amélioration est de considérer que les usagers peuvent choisir entre deux portes adjacentes (fin de voiture et début d'une autre voiture) la porte la moins chargée, s'ils disposent d'assez de temps.

Nous avons aussi quantifié et caractérisé des comportements à l'intérieur du train. Statistiquement, ces préférences peuvent influencer sur la diffusion des flux et causer certains ralentissements. Nous avons donc implémenté un comportement de préférence selon la proximité. Ces préférences peuvent être étendues sur cinq axes : proximité d'une porte, contact avec autrui, type de siège, étage et perception du temps et de l'effort (utilité de s'asseoir ou pas).

Le comportement du conducteur a été aussi implémenté en suivant deux règles : achèvement du temps théorique alloué à cette station, et absence de personnes qui se rapprochent du train, par porte. Il est intéressant d'investiguer quels sont les scénarios qui peuvent causer de l'hésitation du conducteur et comment il prend exactement ses décisions, et quelles sont les variabilités de décisions d'un conducteur à un autre ? De plus, il est bien connu que le temps d'arrêt est conditionné par la porte la plus chargée, il suffit donc d'une seule porte pour que ce temps se prolonge. Par conséquent, les scénarios à tester doivent se baser sur la situation sur une seule porte.

De plus, le simulateur peut constituer une bonne base d'expérimentations pour les conducteurs, en représentant un aperçu des portes de la même manière qu'en réalité (même angle de vue, même division des écrans, etc.).

Nous n'avons pas pu faire d'enregistrement vidéo à PN afin de voir les effets des flux « *d'aisance* » versus de « *préférence* », comme on l'a fait pour BFM. Et ceci à cause de mouvements sociaux ayant eu lieu durant l'année 2018.

Nous avons conscience de l'effet des lacunes horizontales et verticales, la littérature fournit une bonne base de connaissances. Nous n'avons pas pu modéliser les effets des lacunes et les ralentissements qu'elles impliquent sur les mouvements des montants et des descendants. De plus, il est bien connu que la descente est plus aisée que la montée. Cela n'a pas été modélisé et

pourrait avoir des implications notables sur ces temps. Les effets de ralentissement observés dans la simulation sont des effets naturels et réactionnels à la situation.

Nous notons suite à ce point, une limite importante à nos expérimentations. La vidéo est une source essentielle de compréhension du processus. La mise en place d'un protocole de recueil d'enregistrement vidéo est assez lente et le nombre d'échantillons résultants est très bas pour valider des hypothèses. La situation idéale aurait été de disposer d'un bon volume d'enregistrements vidéo sur ce qui se passe sur le quai, d'une manière continue (vue globale de ce qui se passe sur le quai) et sur les échanges aux interfaces quai-train et sur ce qui se passe à l'intérieur du train.

Ces améliorations pourraient permettre, de favoriser davantage la transférabilité, et de grandes avancées dans la simulation des piétons en gare, en vue de maîtriser les temps d'arrêt des trains. Cette variable est déterminante pour la performance et la qualité de services avec des implications économiques majeures.

Par la suite, nous posons des questions concernant l'extension de notre méthode à des problèmes plus généraux que ceux de la SNCF. Ce travail, peut aussi être amélioré, à moyen terme, en étendant le modèle dans un autre cadre que celui de la SNCF. Et ceci en appliquant la même méthodologie, la revalider et relever les limites. Cela peut permettre de trouver des règles plus générales que celles qu'on a pu formuler. Ces constatations évoquent des interrogations sur la simulation comportementale en général. Jusqu'à quel niveau de détail faut-il aller pour obtenir un comportement satisfaisant ?

Dans notre cas, certaines causes directes ont permis d'obtenir un modèle valide et transférable sur deux sites. Certaines causes plus profondes pourraient encore améliorer le modèle et sans doute sa transférabilité. Se pose alors le problème du recueil des informations nécessaires au paramétrage / évaluation de ces causes. Il pourrait être intéressant de mener des expériences en environnement contrôlé mais réaliste (comme celui offert par la réalité virtuelle par exemple) pour pouvoir interroger à loisir les usagers sur le pourquoi de leurs comportements.

Pour une question de généralisation vers d'autres domaines, la formulation motivationnelle présente l'avantage d'être flexible (permettant de remonter à la chaîne de causalité) et de favoriser la transférabilité. L'approche motivationnelle laisse entrevoir la possibilité de la création d'un modèle de plus en plus riche permettant de simuler de plus en plus de situations au fur et à mesure de son développement incrémental et favorisant ainsi sa généricité et sa transférabilité.

## 9 Annexes

		Gap Width – Horizontal Distance between platform and train									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	<b>Level</b>	n=12 t=3.3 s=8% e=0% dnc=0	n=50 t=3.0 s=4% e=4% dnc=1	n=15 t=3.3 s=7% e=13% dnc=1		n=53 t=4.9 s=38% e=17% dnc=0					
<b>Step up into train or step down out of train</b>	<b>-50</b>					n=5 t=4.4 s=20% e=0% dnc=0					
	<b>-100</b>	n=7 t=4.0 s=14% e=0% dnc=0									
	<b>-150</b>	n=40 t=3.8 s=5% e=5% dnc=0		n=9 t=7.0 s=22% e=0% dnc=0			n=49 t=4.7 s=37% e=10% dnc=3				
	<b>-200</b>			n=6 t=3.9 s=33% e=0% dnc=0	n=5 t=5.4 s=20% e=20% dnc=0						
	<b>-250</b>		n=8 t=8.0 s=63% e=13% dnc=0								
	<b>-300</b>	n=50 t=5.3 s=32% e=12% dnc=2					n=51 t=6.5 s=71% e=29% dnc=7				

Figure Annexe 1. Hauteur et espacement pour personnes comprenant des personnes ayant des déficiences visuelles et motrices. « n » est le nombre de participants dans le groupe, « t » est le temps médian en secondes pour le groupe de personnes pour monter et descendre, « s » est le pourcentage de participants qui se sentent en danger, « e » est le pourcentage des personnes nécessitant un effort exceptionnel, « dnc » est le nombre de participants, en plus de « n » qui ont tenté et ne sont pas parvenu à terminer la tâche.

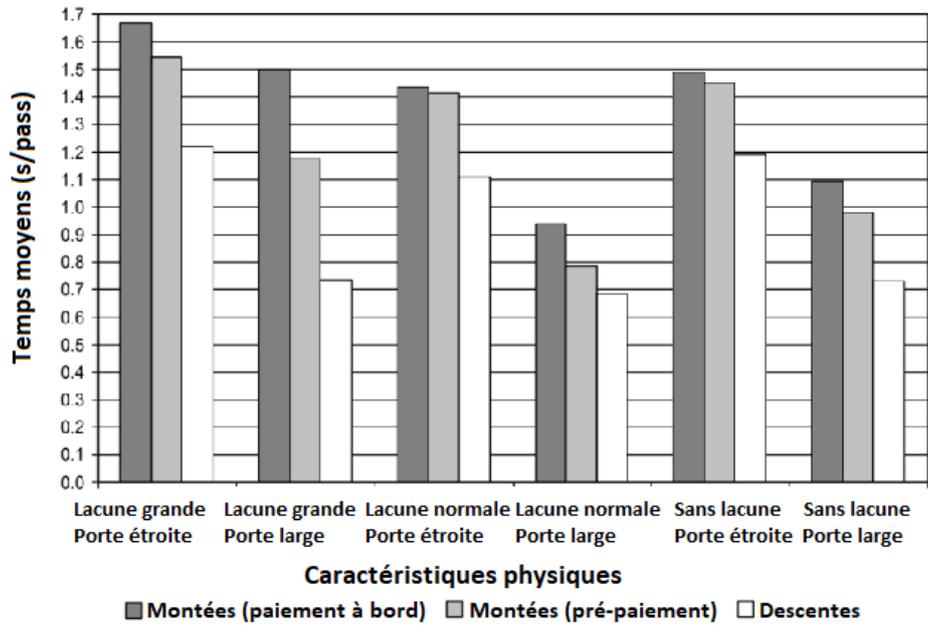


Figure Annexe 2. Mesures des temps de montée et de descente selon trois paramètres d'influence : Hauteur de la lacune, largeur de la porte et la manière de paiement (à bord ou prépayé)

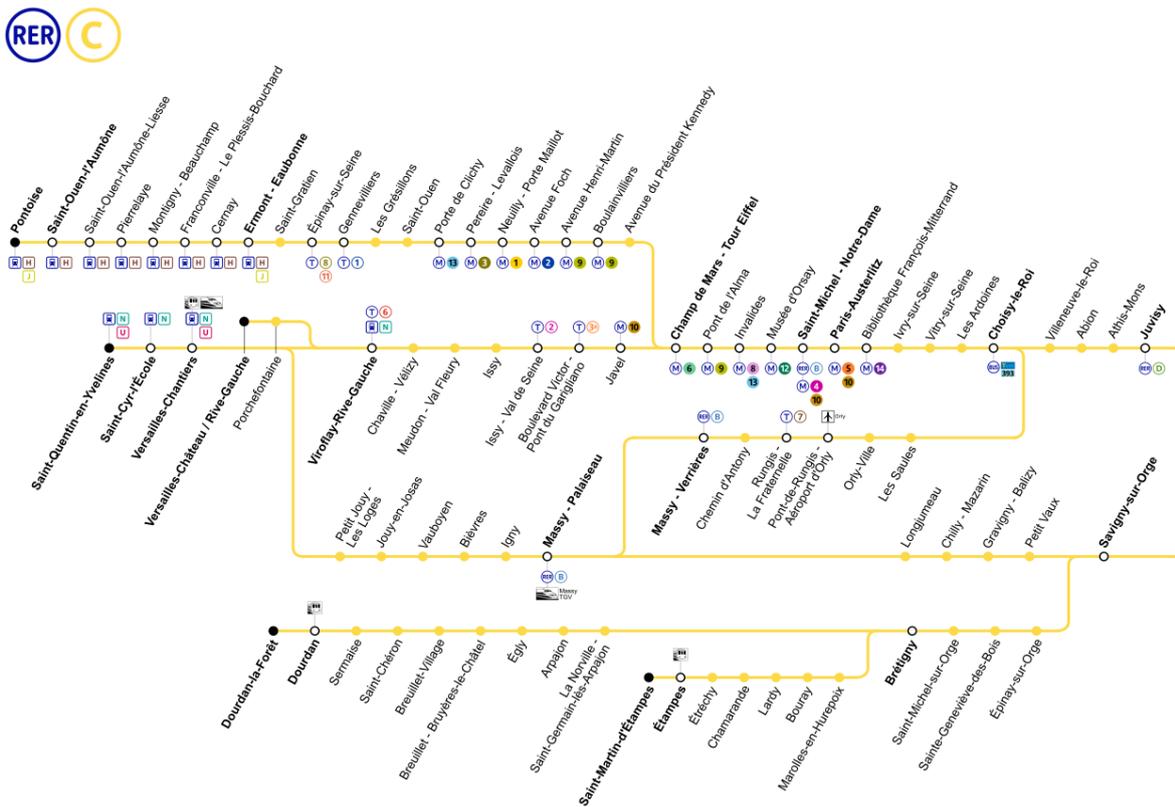


Figure Annexe 3. La ligne du RER C ; Directions, branches et dessertes

Questionnaire A	
Date : 22/0 Heure : <b>A l'instant T</b> Train attendu : <b>Mission + Voie</b>	<input type="checkbox"/> Homme <input type="checkbox"/> Femme Age :
<p>1- Etes-vous un usager quotidien de cette gare ?</p> <p style="margin-left: 40px;"><input type="checkbox"/> Oui      <input type="checkbox"/> Non</p> <p>2- Quelle est votre destination ?      <b>Prochaine descente</b></p> <p>3- Quel est le motif de votre déplacement ?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Domicile</li> <li><input type="checkbox"/> Lieu de travail habituel, Ecole, Lycée, Université</li> <li><input type="checkbox"/> RDV ou recherche professionnel / Stage</li> <li><input type="checkbox"/> Autre</li> </ul> <p>4- Pourquoi attendez-vous votre train à cet endroit précis?</p> <p style="margin-left: 40px;"><b>Sur la longueur du quai : Le quai est long, pourquoi attendez-vous votre train à cet endroit précis ?</b></p> <p style="margin-left: 40px;"><b>Sur la largeur : Pourquoi vous attendez votre train du côté de cette voie ?</b></p>	

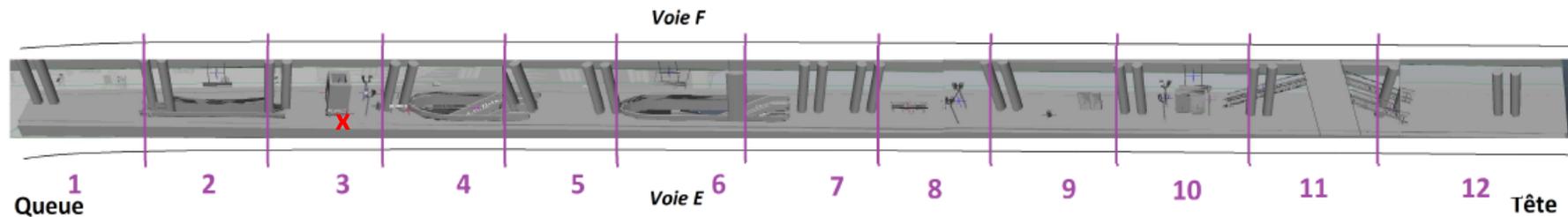


Figure Annexe 4. Questionnaire A sur les motivations de positionnement des passagers sur le quai

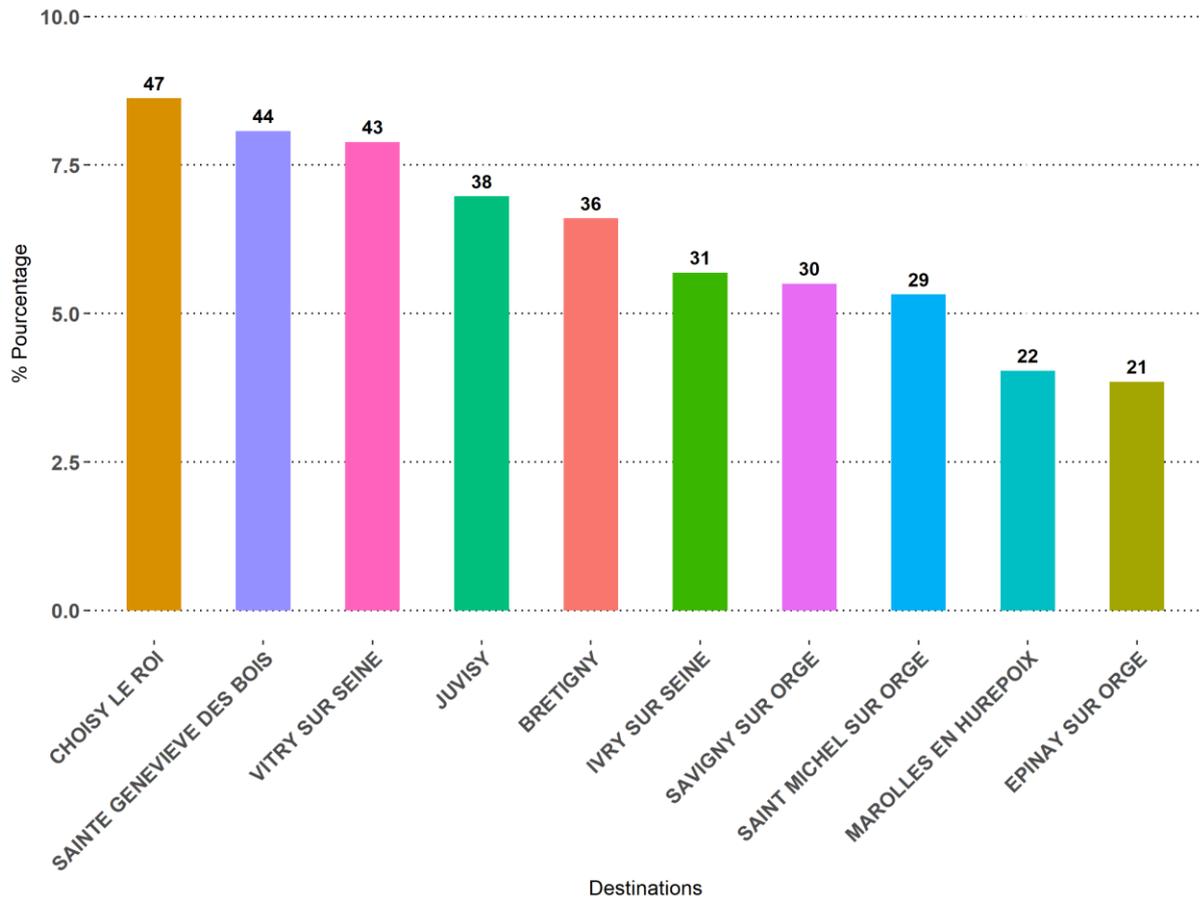


Figure Annexe 5. Top dix des destinations les plus empruntées à BFM

### Ivry sur Seine

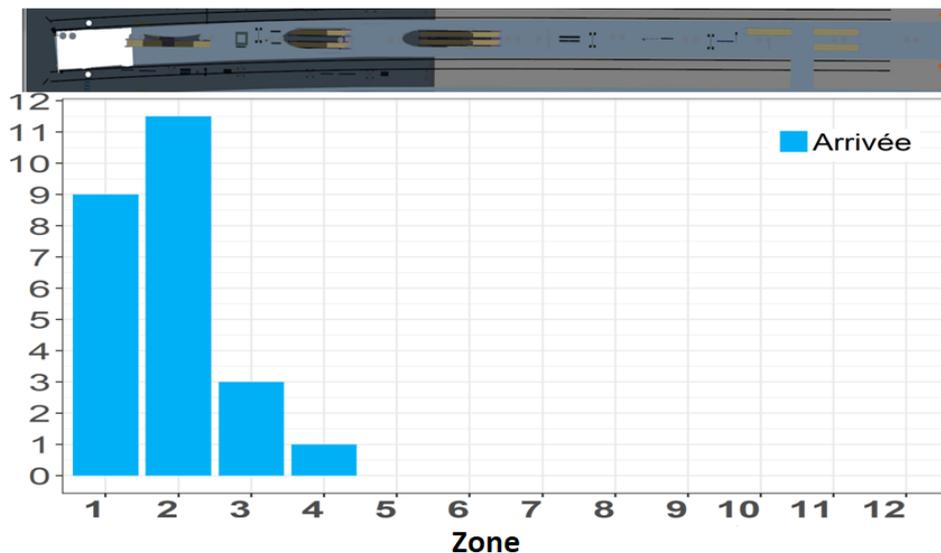


Figure Annexe 6. Situer les sorties destination sur le quai BFM. Exemple : Mesures sur Ivry sur seine, une seule sortie à 204 mètres du T.T. La position de la sortie (zone blanche). L'emplacement exact (point blanc). Position du T.T à BFM (point rouge)

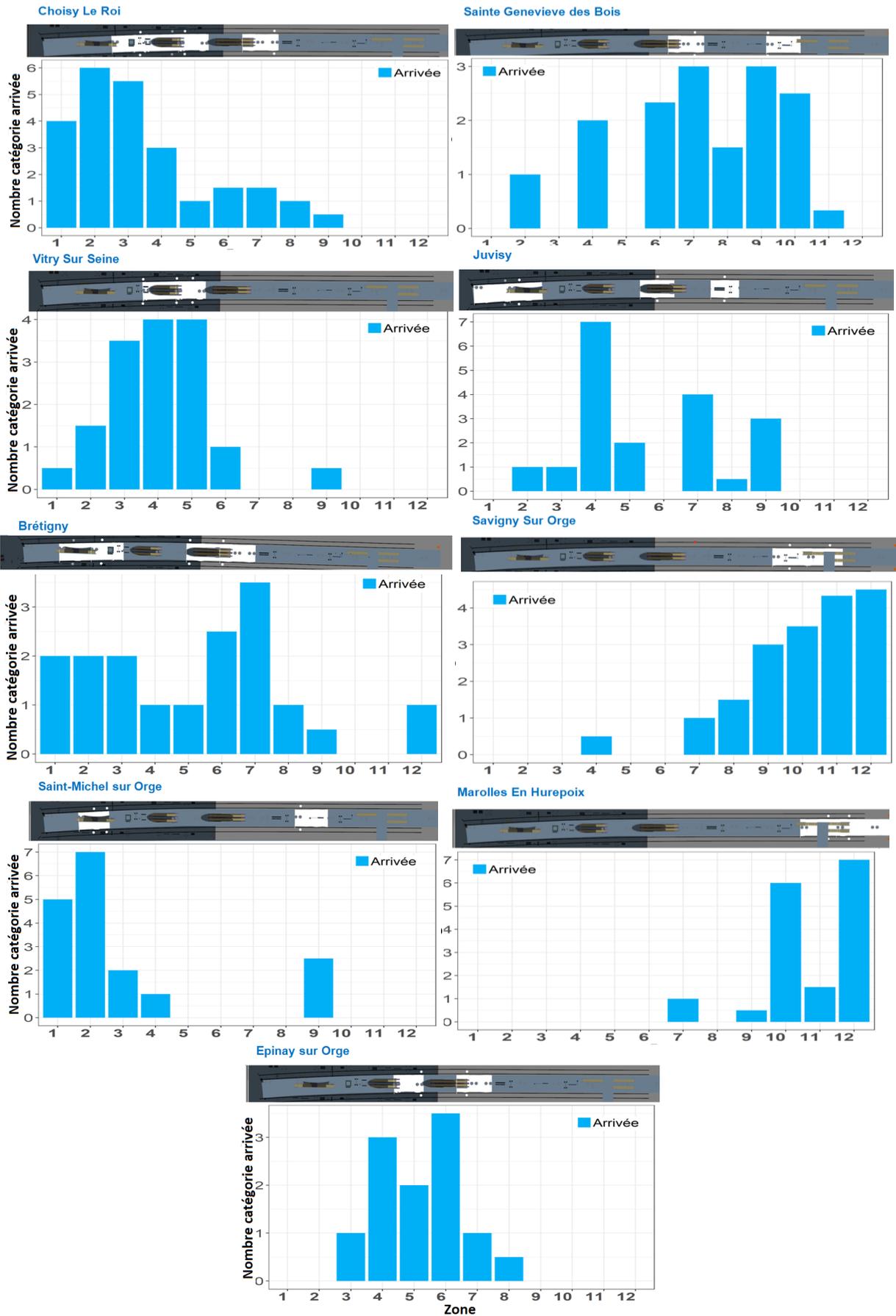


Figure Annexe 7. Position des sorties du top dix des destinations les plus empruntées

Date et Heure : Train attendu : Numéro véhicule : 1 Reference train : 20900 Type véhicule : ZBe	1 Homme                      2 Femme  Age :
1- Etes-vous un usager quotidien de cette gare ? 1 Oui                      2 Non  2- Quelle est votre destination ?  3- Quel est le motif de votre déplacement ? 1 Domicile 2 Lieu de travail habituel, Ecole, Lycée, Université 3 RDV ou recherche emploi / stage 4 Autre	4- Pourquoi avez-vous choisi cet endroit précis pour vous installer ?  5- Par quelle porte vous êtes entré ? 1- Porte A                      2- Porte B

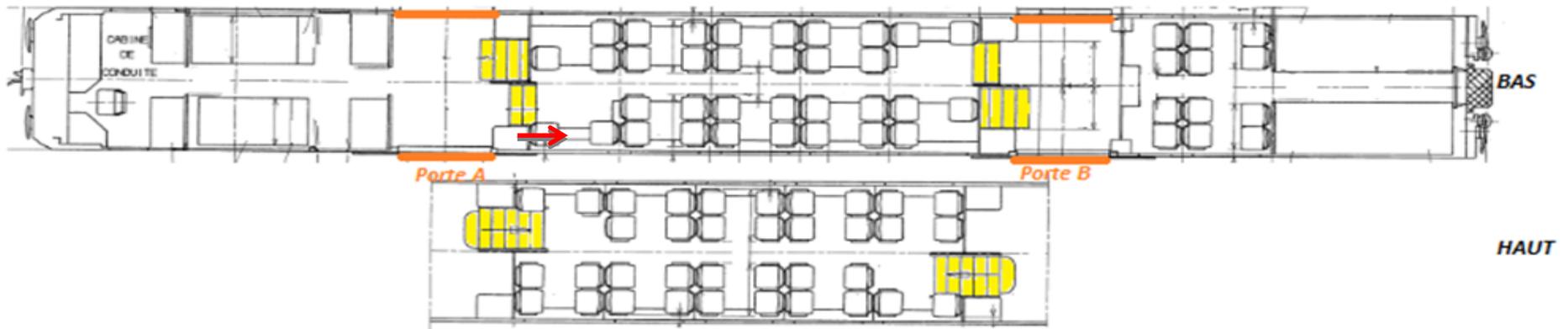


Figure Annexe 8. Questionnaire B sur les motivations de positionnement des passagers dans le train

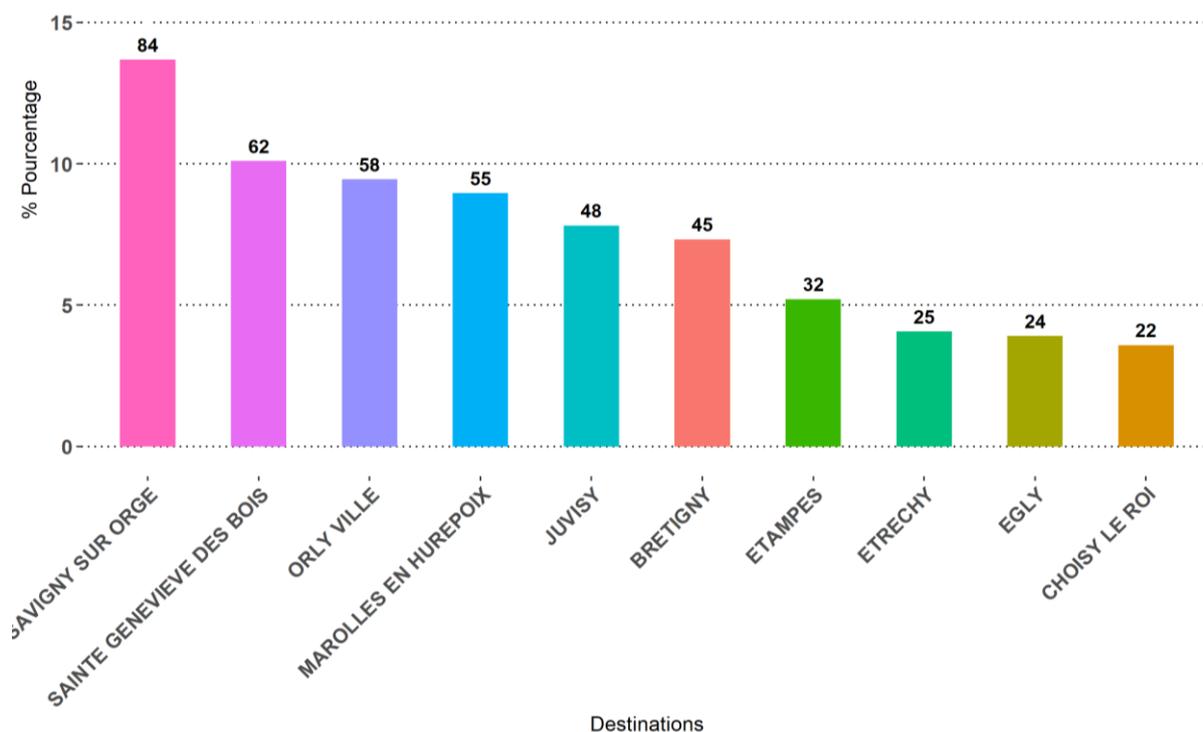


Figure Annexe 9. Top dix des destinations les plus empruntées à BFM, dans les trois premiers véhicules du train.

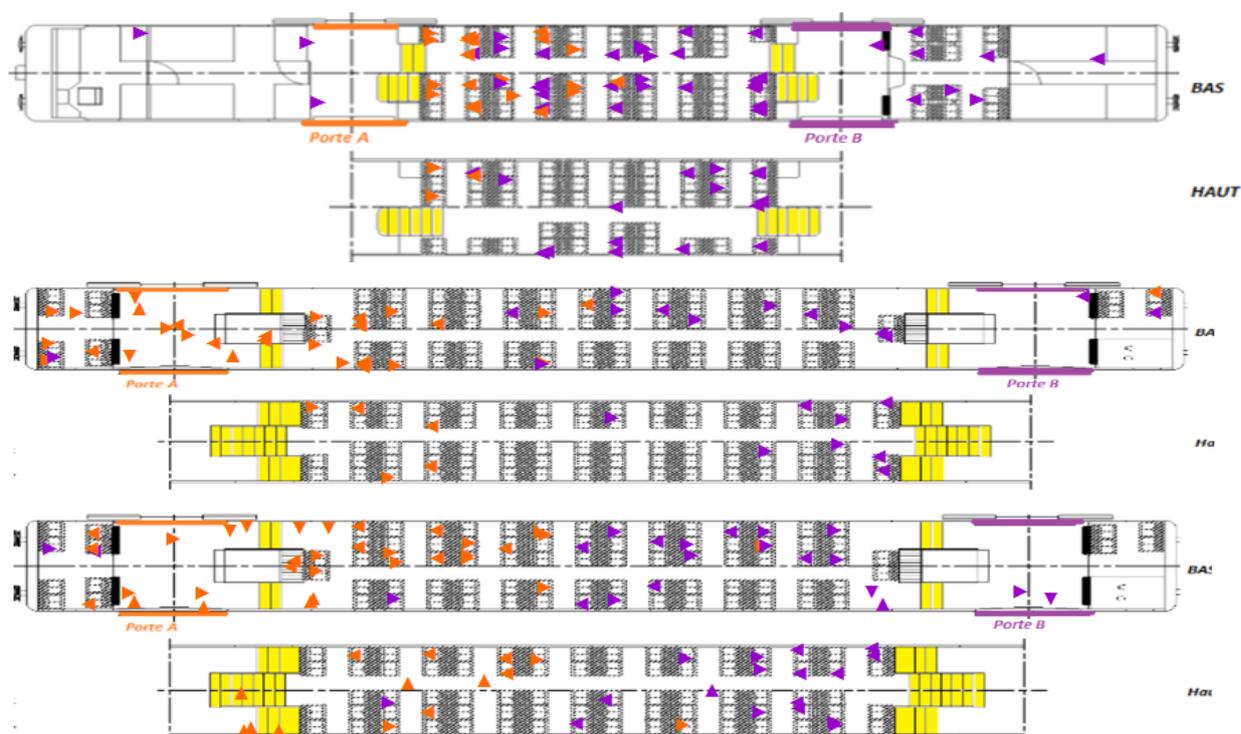


Figure Annexe 10. Positionnement des personnes interrogées des voitures 1,2 et 3 de type Z8800 avec une disposition de sièges de 2+3. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan

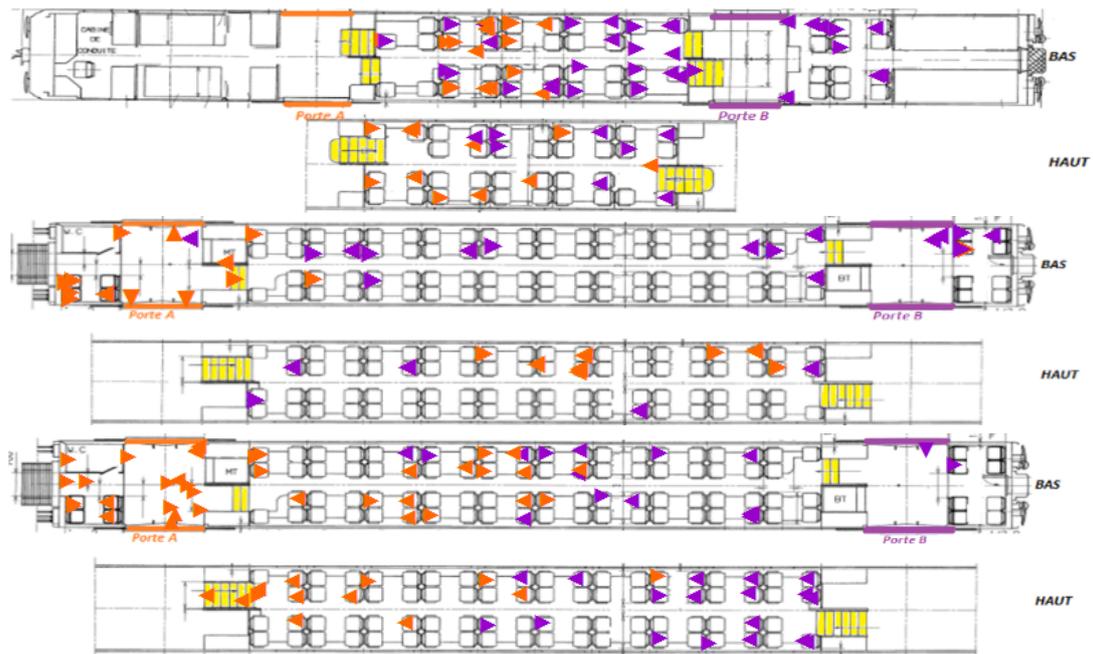


Figure Annexe 11. Positionnement des personnes interrogées des voitures 1,2 et 3 de type Z20900 avec une disposition de sièges de 2+2. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan

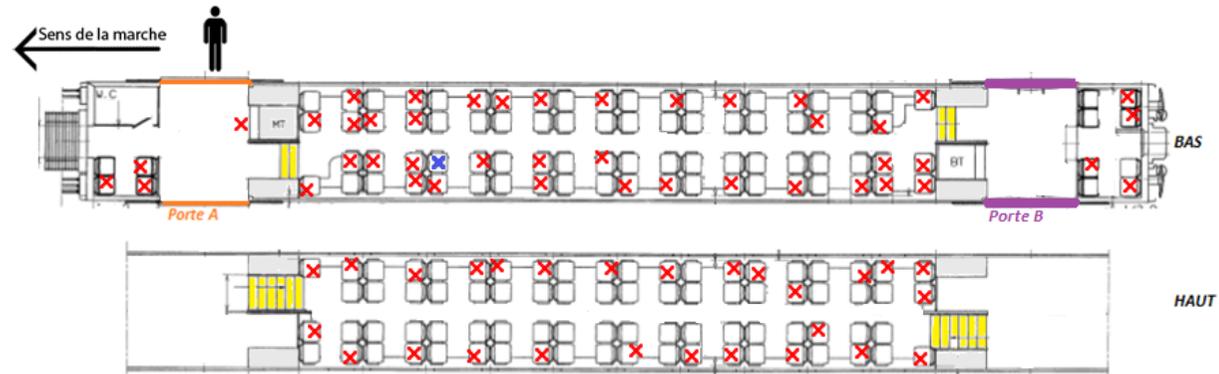


Figure Annexe 12. Positionnement des personnes interrogées des voitures courtes et longue de type 2+3 et 2+2. Les personnes sont colorées selon la porte empruntée. On remarque un positionnement par rapport à la moitié du plan.

## Questionnaire C

### Questionnaire sur le choix d'emplacement dans un véhicule

C'est le soir, après votre journée de travail, vous rentrez chez vous en prenant le train. Vous entrez par la porte A (voir position du personnage) et vous avez un temps de trajet de **35** minutes. Quelle place choisiriez-vous ? Une croix rouge X signifie un siège occupé par une autre personne. Merci de choisir un siège **libre**. Cliquez sur l'image pour faire votre choix qui sera représenté par une croix bleue X.



Pourquoi avez-vous choisi cet emplacement précis dans le train ?

Est ce que le choix de votre position dans le véhicule est influencé par votre état de santé ?  Oui / Non

Quel est votre âge

Vous êtes ?  Homme / Femme

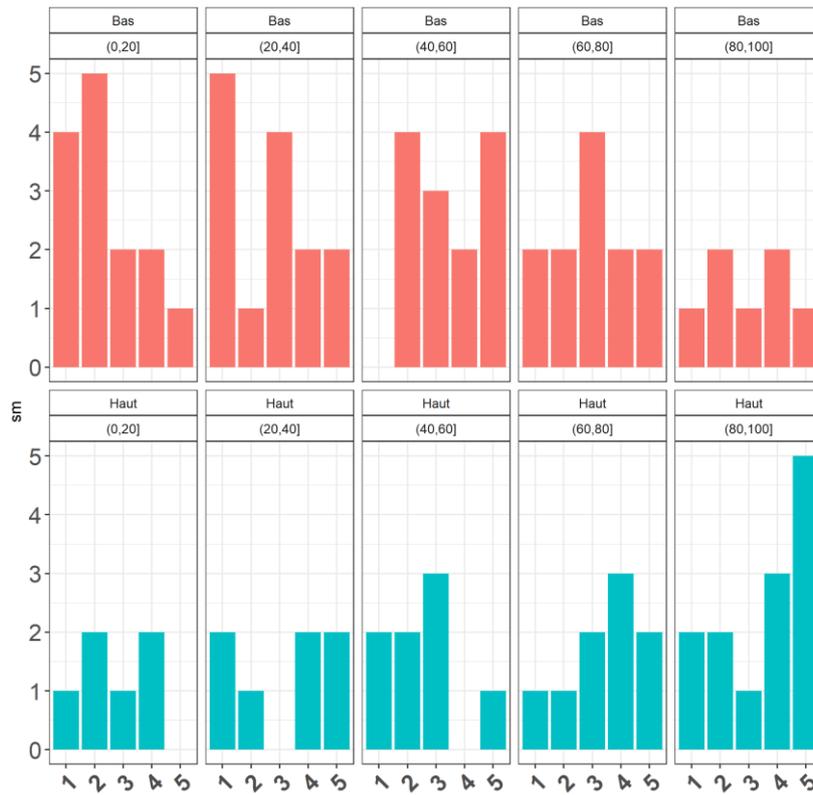
Vous habitez où ?  En région parisienne / autre

Valider

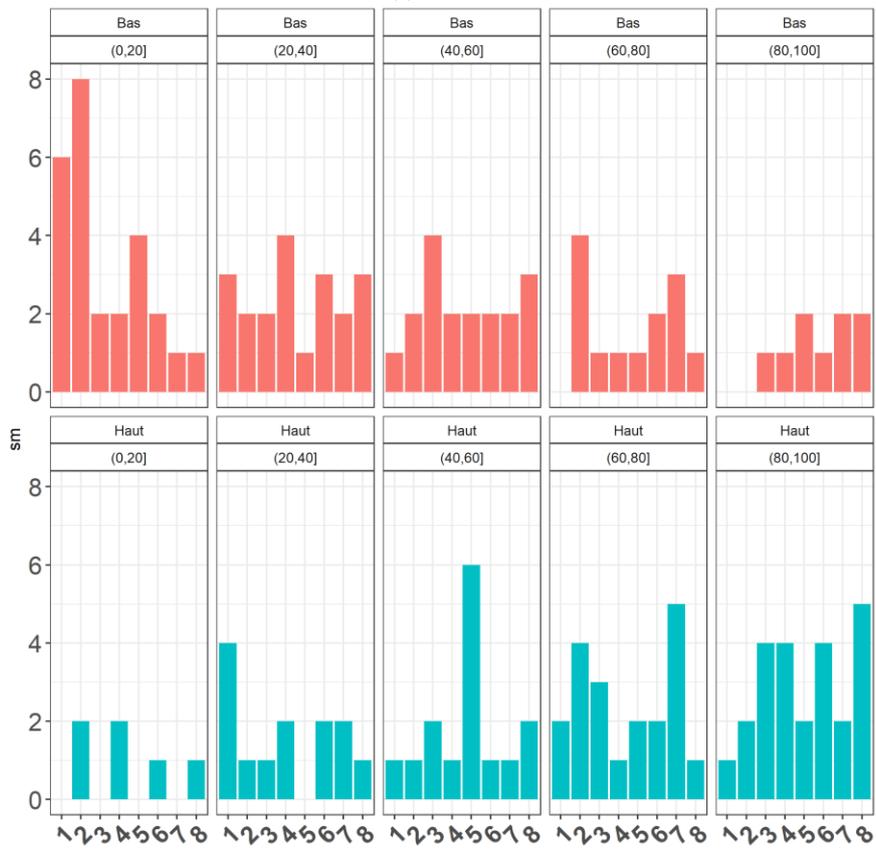
Annuler

© SNCF Réseau 2017

Figure Annexe 13. Questionnaire C sur les motivations de positionnement des passagers dans le train



(a) 8800 V1



(b) 8800 V2



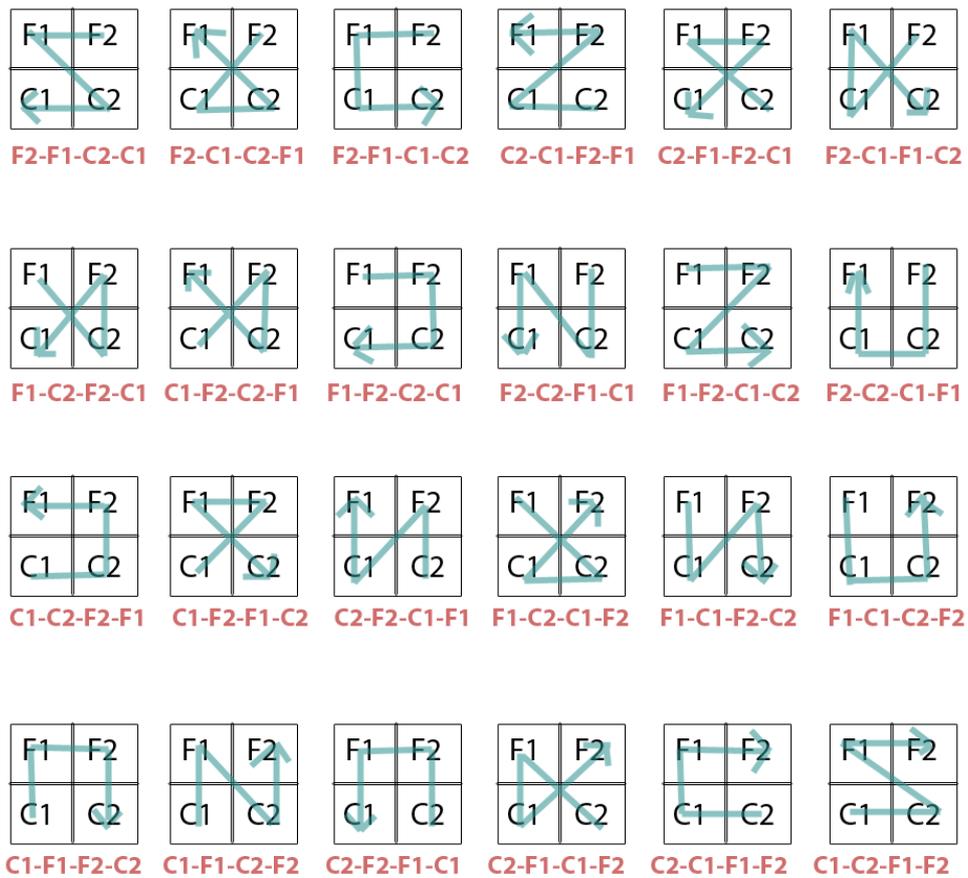


Figure Annexe 15. Les 24 différentes possibilités d'enchaînement de choix dans un carré de 4 places.

Date : phase 4 – Jeudi 16 novembre 2017

Heure : \_\_\_\_ H \_\_\_\_ (au ¼ d'heure près)

Train attendu : \_\_\_\_\_ (Nom de la mission ou ?)

Genre :  homme  femme

Age : en clair : /\_\_/\_/

1. Etes-vous un usager régulier de cette gare ?

Oui  Non

2. Quel RER prenez-vous ?

RER B  RER D  peu importe (ne pas suggérer)

3. Quelle est votre destination (Gare de descente sur cette ligne) ?

Noter en clair : \_\_\_\_\_

4. Quel est le motif de votre déplacement ?

Domicile  Lieu de travail habituel, Ecole, Lycée, Université  
 RDV ou recherche professionnel /stage  Autre

5. Ce quai est long et large, pour quelles raisons vous attendez votre train précisément à cet endroit ? ENQ : NE PAS CITER

- à proximité des panneaux d'information
- proche d'une sortie / correspondance à ma station de descente
- c'est ma zone d'arrivée sur le quai
- par hasard
- il y a moins de monde ici
- il y a des bancs (ou autres facilités) pour attendre /se reposer
- je suis entre les deux quais pour prendre le 1<sup>er</sup> train qui passe
- pas de raison particulière
- autre raison , préciser : \_\_\_\_\_

6. Par quel accès êtes-vous entré sur le quai ? ENQ : montrer le plan au répondant et placer un E dans la zone choisie

7. ENQ : mettre une flèche sur le lieu de l'interview, le sens de la flèche doit indiquer le sens de la personne sur le quai

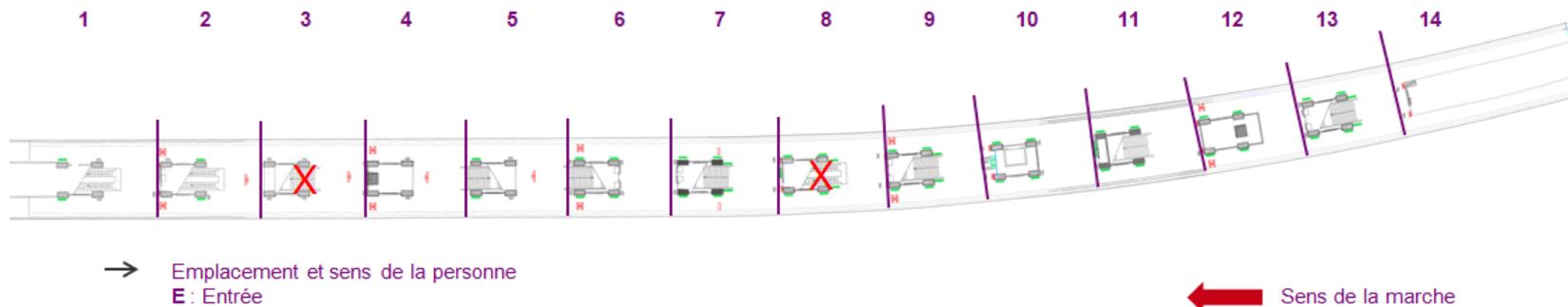


Figure Annexe 16. Questionnaire sur les motivations de positionnement des passagers sur les quais 42/44 de PN

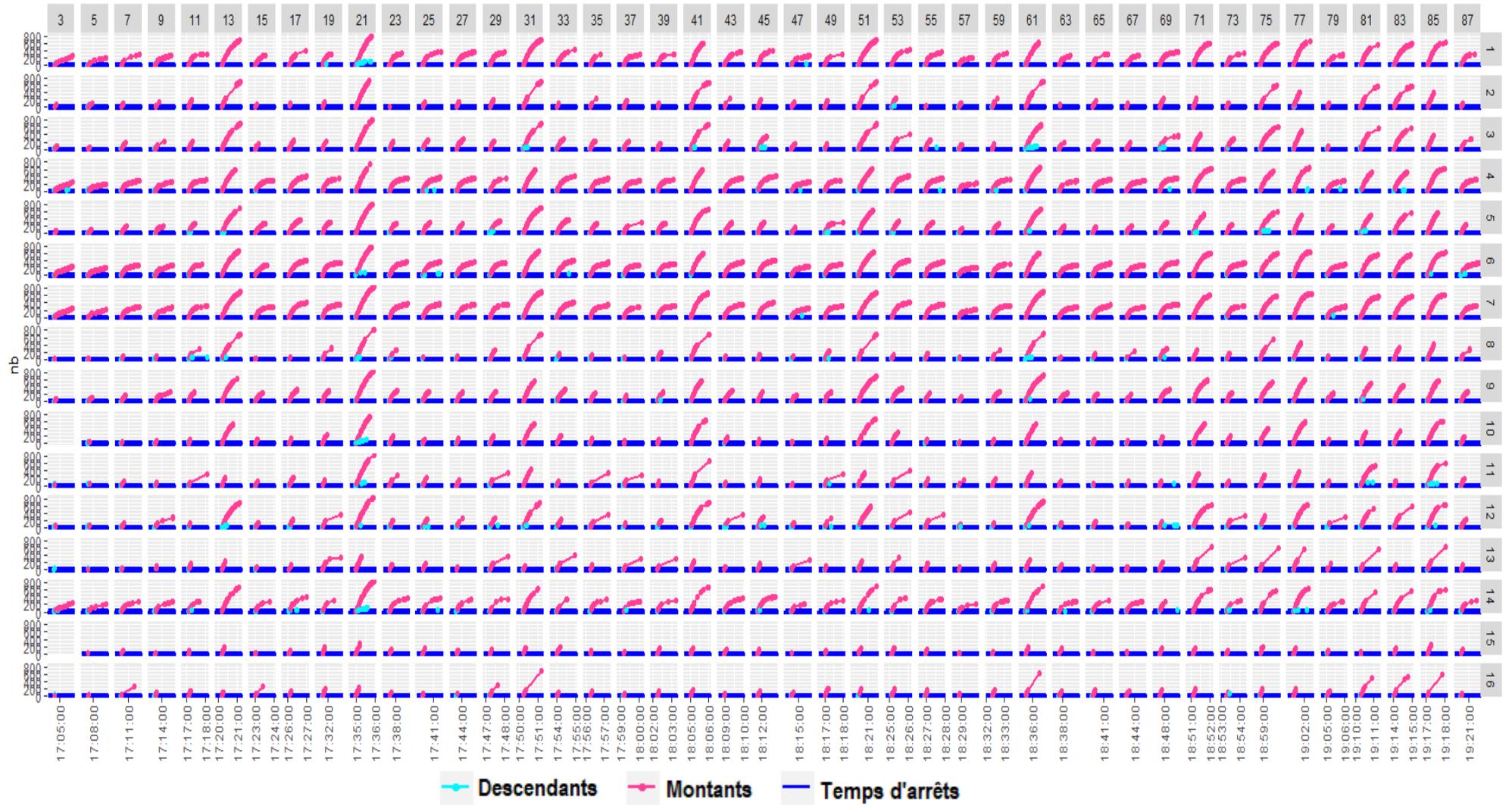


Figure Annexe 17. Temps de montée et nombre, par porte (1,16) par échantillon, BFM.

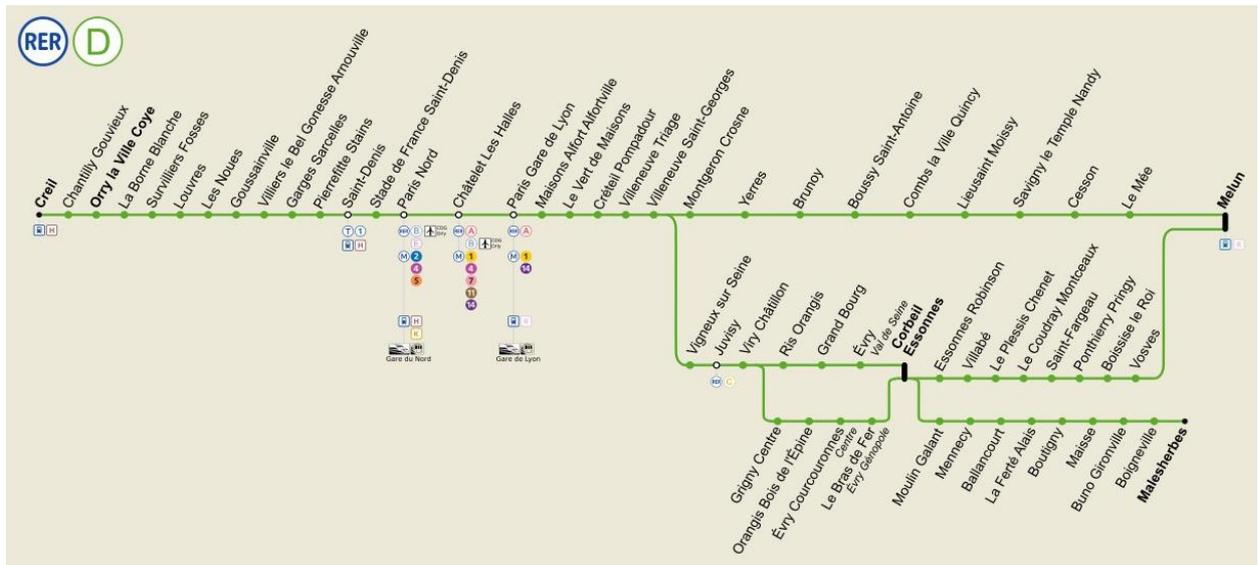


Figure Annexe 18. La ligne du RER D ; Directions, branches et dessertes

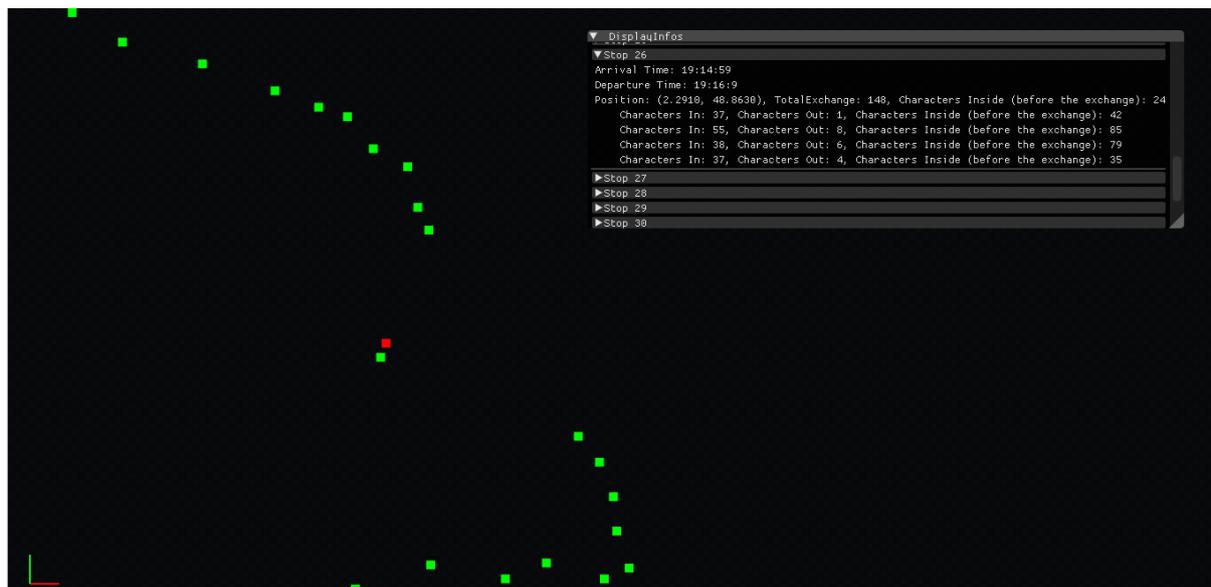


Figure Annexe 19. Parseur XML pour l'exploitation de données de rames compteuses

**Traitement des fichiers de comptage XML :** Le calcul de l'occupation a été effectué avec un parseur XML développé par *SpirOps*. Le parseur permet de sélectionner le fichier XML de la rame compteuse et générer le calcul relatif à chaque arrêt pour chaque véhicule, avant l'échange. Pour estimer la charge pour la gare suivante, l'occupation étant propre à tout le véhicule, les valeurs des montants et descendants sont, par conséquent, agrégées par véhicule (2 portes par véhicules). Et ainsi de suite jusqu'à l'arrivée à la gare d'intérêt. Nous conservons les données des emprunts des portes, soit les valeurs des montants et descendants par porte, qui peuvent être utiles aux analyses ultérieurement.

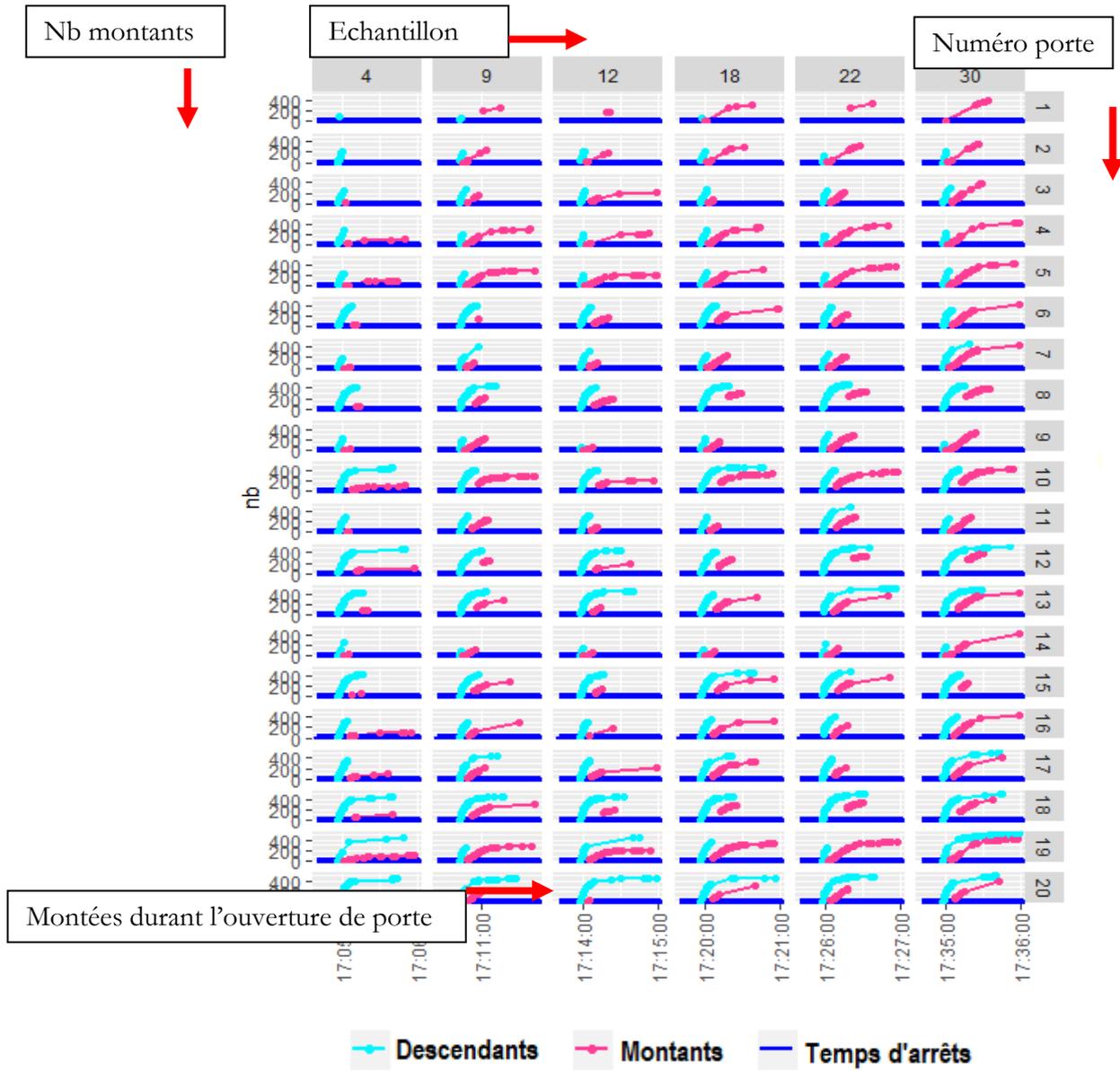


Figure Annexe 20. Temps de montée et nombre, par porte (1,20) par échantillon.

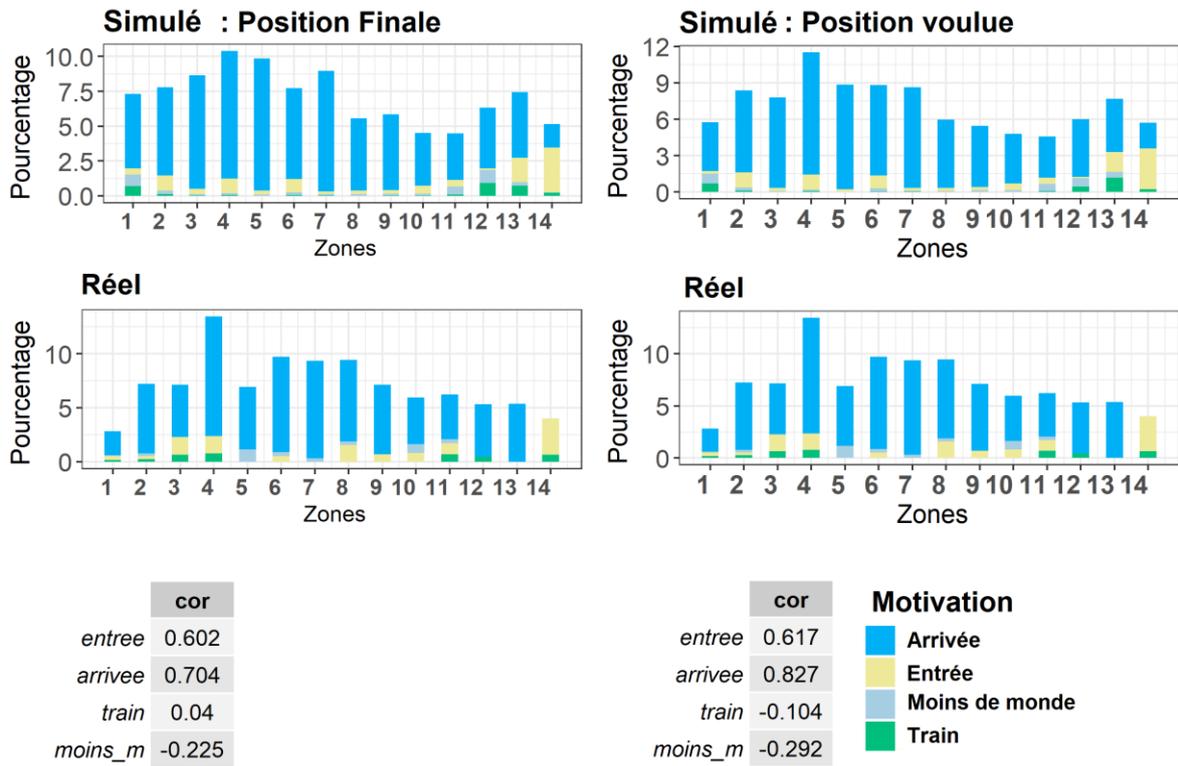


Figure Annexe 21. Récapitulatif des distributions des motivations en position « finale » et « voulue » - Simulation 2 - PN

Type matériel	1 (M)	2 (R)	3 (R)	4 (M)	5 (M)	6 (R)	7 (R)	8 (M)	Longueur Totale (cm)
<b>8800</b>	25100	24280	24280	25100					98760
<b>5600</b>	25100	24280	24280	25100					98760
<b>20500</b>	25100	26400	26400	25100					103000
<b>20900</b>	25100	26654	26654	25100					103508
<b>5600 (6v)</b>	25100	24280	24280	24280	24280	25100			147320
<b>8800-8800</b>	25100	24280	24280	25100	25100	24280	24280	25100	197520
<b>20500-8800</b>	25100	26400	26400	25100	25100	24280	24280	25100	201760
<b>8800-20500</b>	25100	24280	24280	25100	25100	26400	26400	25100	201760
<b>20900-8800</b>	25100	26654	26654	25100	25100	24280	24280	25100	202268
<b>8800-20900</b>	25100	24280	24280	25100	25100	26654	26654	25100	202268
<b>20500-20500</b>	25100	26400	26400	25100	25100	26400	26400	25100	206000
<b>20500-20900</b>	25100	26400	26400	25100	25100	26654	26654	25100	206508
<b>20900-20500</b>	25100	26654	26654	25100	25100	26400	26400	25100	206508
<b>20900-20900</b>	25100	26654	26654	25100	25100	26654	26654	25100	207016

Tableau Annexe 1. Différentes combinaisons et longueurs Motrices (M) et Remorques (R) Selon le type et l'ordre des combinaisons, cela génère des emplacements différents des portes sur le quai

Mission	Nombre arrêts desservis	Terminus	Similarité entre mission	Longueur en voitures	
				6V	8V
<b>BALI</b>	6	Brétigny Sur Orge	a		X
<b>CIME</b>	17	Versailles Chantiers	b	X	
<b>CITY</b>	18	Versailles Chantiers	b	X	
<b>DEBA</b>	14	Dourdan	c		X
<b>DYVI</b>	11	Dourdan	c		X
<b>ELAO</b>	9	Saint-Martin d'Etampes	d		X
<b>ELBA</b>	13	Saint-Martin d'Etampes	d		X
<b>JILL</b>	5	Juvisy	e		X
<b>MONA</b>	11	Massy Palaiseau	f		X
<b>ROMI</b>	7	Pont de Rungis - Orly	f		X

Tableau Annexe 2. Sélection des missions : Elimination des missions courtes (JILL) et les trains courts à 6 Voitures (CIME, CITY)

Type	Motrice	Remorque	Différence
<b>5600</b>	106	164	58
<b>8800</b>	106	164	58
<b>20500</b>	92	192	100
<b>20900</b>	82	164	82

Tableau Annexe 3. Différentes capacités de place assises, par type de voiture

Type	Étage	Motrice	Remorque
<b>5600</b>	Bas	60	86
<b>5600</b>	Haut	46	78
		106	164
<b>8800</b>	Bas	60	86
<b>8800</b>	Haut	46	78
		106	164
<b>20500</b>	Bas	52	98
<b>20500</b>	Haut	40	94
		92	192
<b>20900</b>	Bas	46	86
<b>20900</b>	Haut	36	78
		82	164

Tableau Annexe 4. Différentes capacités de place assises, par type de matériel roulant, par étage, par type de véhicule (Motrice = Court, Remorque= Longue)

Type matériel	1 (M)	2 (R)	3 (R)	4 (M)	5 (M)	6 (R)	7 (R)	8 (M)	Places assises
<b>20900</b>	82	164	164	82					492
<b>8800</b>	106	164	164	106					540
<b>5600</b>	106	164	164	106					540
<b>20500</b>	92	192	192	92					568
<b>5600(6v)</b>	106	164	164	164	164	106			868
<b>20900-20900</b>	82	164	164	82	82	164	164	82	984
<b>20900-8600</b>	82	164	164	82	106	164	164	106	1032
<b>8800-20900</b>	106	164	164	106	82	164	164	82	1032
<b>20500-20900</b>	92	192	192	92	82	164	164	82	1060
<b>20900-20500</b>	82	164	164	82	92	192	192	92	1060
<b>8800-8800</b>	106	164	164	106	106	164	164	106	1080
<b>20500-8800</b>	92	192	192	92	106	164	164	106	1108
<b>8800-20500</b>	106	164	164	106	92	192	192	92	1108
<b>20500-20500</b>	92	192	192	92	92	192	192	92	1136

Tableau Annexe 5. Différentes combinaisons et capacités de place assises, par type de matériel roulant

Porte	T	T-diff	T	Q	Q-diff	Q	In	In - diff	In	Out
1	25	-36	-	12	-22	-	6	-8,6	-	1
2	25	-36	-	20	-22	-	3	-11,6	-	0
3	65	4	+	8	-31	-	6	-8,6	-	3
4	65	4	+	11	-17	-	3	-11,6	-	5
5	65	4	+	29	-17	-	15	0,4	-	5
6	65	4	+	24	-19	-	14	-0,6	-	8
7	55	-6	-	34	-19	-	8	-6,6	-	4
8	55	-6	-	31	2	+	9	-5,6	-	0
9	35	-26	-	44	-17	-	18	3,4	+	4
10	35	-26	-	23	-14	-	19	4,4	+	0
11	79	18	+	39	-14	-	20	5,4	+	2
12	79	18	+	83	47	+	18	3,4	+	4
13	85	24	+	68	32	+	24	9,4	+	5
14	85	24	+	67	33	+	31	16,4	+	3
15	42	-19	-	37	15	+	23	8,4	+	0
16(tt)	42	-19	-	70	-13	-	14	-0,6	-	1

Q : Quai ; Q- diff : différence avec la moyenne ; Q : catégorisation quai (-) ou (+)

T : Train, M : Montants, D : Descendants

Tableau Annexe 6. Catégorisation des portes à BFM selon les paramètres d'influence (occupation quai, occupation train, nb montants)

Porte	1	2	3	4	5
Normale	25100	26400	26400	26400	25100
Hybride	25100	24280	24280	24280	25100
Recomposée	25100	24280	24280	26400	25100

Tableau Annexe 7. Type de rame pouvant se combiner entre elles. 9 combinaison et longueurs différentes. Différences maximale = 10.6m

P	Q	Q-diff	Q	T	T - diff	T	M	M - diff	M	D	D - diff	D
1	3	-10,75	-	26	-75,4	-	8	-15,47	-	3	-22,3	-
2	5	-8,75	-	26	-75,4	-	8,5	-14,97	-	6	-19,3	-
3	16	2,25	+	60,5	-40,9	-	14	-9,475	-	13,5	-11,8	-
4	10	-3,75	-	60,5	-40,9	-	16,5	-6,975	-	16	-9,35	-
5	15	1,25	+	104,5	3,1	+	15	-8,475	-	16	-9,35	-
6	21	7,25	+	104,5	3,1	+	18	-5,475	-	28,5	3,15	+
7	20	6,25	+	156,5	55,1	+	29	5,525	+	21	-4,35	-
8	11	-2,75	-	156,5	55,1	+	29,5	6,025	+	31,5	6,15	+
9	18	4,25	+	129,5	28,1	+	20	-3,475	-	24	-1,35	-
10	22	8,25	+	129,5	28,1	+	25	1,525	+	23,5	-1,85	-
11	13	-0,75	-	103	1,6	+	19,5	-3,975	-	33	7,65	+
12	16	2,25	+	103	1,6	+	16,5	-6,975	-	24	-1,35	-
13	9	-4,75	-	107,5	6,1	+	19,5	-3,975	-	25,5	0,15	+
14	10	-3,75	-	107,5	6,1	+	14	-9,475	-	26,5	1,15	+
15	14	0,25	+	122	20,6	+	23,5	0,025	+	30	4,65	+
16	12	-1,75	-	122	20,6	+	35	11,525	+	45	19,65	+
17	11	-2,75	-	137,5	36,1	+	33,5	10,025	+	30	4,65	+
18	16	2,25	+	137,5	36,1	+	44	20,525	+	50,5	25,15	+
19	14	0,25	+	67	-34,4	-	44,5	21,025	+	29	3,65	+
20	19	5,25	+	67	-34,4	-	36	12,525	+	30,5	5,15	+

**Q : Quai ; Q- diff : différence avec la moyenne ; Q : catégorisation quai (-) ou (+)**

**T : Train, M : Montants, D : Descendants**

*Tableau Annexe 8. Catégorisation des portes à PN selon les paramètres d'influence (occupation quai, occupation train, nb montants)*

<b>Contraste porte</b>	<b>Estimate</b>	<b>p-value</b>
1 - 5	0.95	0.04
1 - 9	1.76	0.0020
3 - 9	1.68	0.007
4 - 9	1.44	0.31
4 - 14	-1	<.0001
5 - 6	-1.02	0.01
5 - 8	-1.22	0.005
5 - 11	-1.25	0.002
5 - 12	-0.99	0.02
5 - 14	-1.6	<.0001
7 - 9	1.67	0.0052
7 - 14	-0.77	0.0253
8 - 9	2.03	0.0003
8 - 10	1.8	0.02
9 - 11	-2.0	0.0002
9 - 12	-1.8	0.0012
9 - 13	-1.7	0.014
9 - 14	-2.4	<.0001
9 - 16	-1.7	0.049
10 - 11	-1.8	0.018
10 - 14	-2.2	0.0003

*Tableau Annexe 9.* Résultats du post-hoc significatifs contrastant plusieurs portes avec les valeurs de pentes (Estimate) – BFM

<b>Contraste porte</b>	<b>Estimate</b>	<b>p-value</b>
1 - 10	2.37	0.004
1 - 13	2.18	0.008
1 - 15	2	0.01
1 - 16	1.99	0.04
1 - 17	2.42	0.005
1 - 18	2.85	0.0002
1 - 19	2.28	0.004
1 - 3	3.12	0.004
1 - 4	2.16	0.02
1 - 6	3.98	0.0004
1 - 8	2.71	0.0004
18 - 20	-1.63	0.007
20 - 6	2.77	0.02
20 - 8	1.5	0.01

*Tableau Annexe 10.* Résultats du post-hoc significatifs contrastant plusieurs portes avec les valeurs de pentes (Estimate) - PN



Variable dépendante \ Variable dépendante	Taux de remplissage	Longueur véhicule	Disposition sièges	Etage
Position moitié du plan				
Distance des portes	Contraste (0,20] - (80,100] Pente (-)	Longue	2+2 3+2	

■ Variable testée sans effet significatif

Tableau Annexe 11. Récapitulatif des effets significatifs des analyses de positionnement par rapport à la distance par rapport aux portes

ID \ VD	Taux de remplissage	Variables individuelles				Contextuelles	
		ÂgeIntervalle	Genre	Condition physique	Zone	Temps	Effort
Sens marche							
Fenêtre	Contraste (0,10] - (90,100] Pente (+)	Contraste (40,60]-(60,80] Pente (-)				Contraste 5 et 20 Pente (-)	Simple Pente (+)
Couloir	Contraste (0,10]-(80,90] Pente (-)	Simple (20,40] Pente (-)				Contraste 5 et 20 Contraste 10 et 20 Pente (+)	
Solo	Simple (0,80] Pente (-) associée						Simple Pente (-)
Milieu	Contraste (0,10]-(90,100] Pente (-)						Simple Pente (-)
Étage: Bas	Simple (0,20] Pente (+) Simple (50,60] Pente (+) Simple (80,100]Pente (-)	Simple (0,20] Pente (+) Simple (40,60] Pente (+)	Simple 'Genre : Femme' Pente (+)			Contraste 5 et 35 Pente (+)	
État : Assis	Contraste (0,10]-(90,100] Pente (+)			Simple 'Problème santé' Pente (-)		Contraste 5 et 35 Pente (-)	

■ Variable testée sans effet significatif

Tableau Annexe 12. Récapitulatif des effets significatifs des analyses de choix par type de siège / étage et comportement assis et debout par rapport aux variables individuelles et contextuelles

ID VD	Taux remplissage	Type siège	Variable individuelles				Contextuelles
			Age	Genre	Condition	Zone	Temps
<b>Effort</b>	Contraste (10,20] - (90,100] Pente (-)	Contraste F et M Pente (+) Contraste C et M Pente (+)					Contraste 10 et 20 Pente (-) Contraste 10 et 35 Pente (-)

■ Variable testée sans effet significatif

Tableau Annexe 13. Récapitulatif des effets significatifs des analyses de l'effort par rapport aux taux de remplissages, type de siège et variables individuelles et contextuelles

ID VD	Type siège	Sens	Contact
<b>Carré 4 : Comptage</b>			Simple « Rien » Pente (+) ; Simple « VAV » Pente (+) Contraste « Juxta » et « Rien » (-) ; Contraste « Juxta » et « VAV » (-)
<b>Carré 6 : Comptage</b>			

■ Variable testée sans effet significatif

Tableau Annexe 14. Récapitulatif des effets significatifs des comptages par carrée en fonction de type de siège, sens et contact induit

Variable dépendante \	Taux de remplissage	État	Temps parcours
Variable dépendante			
Accès			
Étage			
Temps de trajet			
Propriété siège	Contraste (60,80]-(80,100] Pente (+)		
Contact	Contraste (0,20]-(80,100] Pente (+)		
Disponibilité	Contraste (0,20]-(80,100] Pente (-)		
Temps de trajet	Contraste (0,20]-(80,100] Pente (-)	Contraste 'Assis- debout' Pente (-)	Contraste (5-10) et (20-35) Pente (+) Contraste 5mn (0,20] et (80,100] Pente(-)

■ Variable testée sans effet significatif

Tableau Annexe 15. Récapitulatif des motivations exprimées par rapport au taux de remplissage, états, temps de trajet et étage



## 10 Bibliographie

- [AGU 08] Aguirre, D. (2008). *Vehicle layout options study for Connex Comeng*. – Interfleet commissioned report ITLR-T22459-002.
- [AGR 07] Agresti, A., 2007. *An introduction to categorical data analysis*. 2nd ed., Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [AHN 16] Ahn, S., Kim, J., Bektı, A., Cheng, L. C., Clark, E., Robertson, M., & Salita, R. (2016, November). Real-time information system for spreading rail passengers across train carriages: Agent-based simulation study. In *Australasian Transport Research Forum 2016 Proceedings, Melbourne, Australia*.
- [AKA 73] Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In B. N. Petrov & F. Csaki (Eds.), *Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory* (pp. 267-281). Budapest: Akademiai Kiado.
- [AKA 74] Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- [AKA 87] Akaike, H. (1987). Factor analysis and AIC. In *Selected Papers of Hirotugu Akaike* (pp. 371-386). Springer, New York, NY.
- [ALL 36] Allport, G. W. & Odbert, H. S. (1936). *Trait-names: A psycho-lexical study*. Albany, NY: Psychological Review Company.
- [ALP 10] Alpert, D. 7000-Series Designs Sacrifice Capacity for Vague Safety, July 22, 2010. <http://greatergreaterwashington.org/post/6640/7000-series-designs-sacrifice-capacity-for-vague-safety>. Accessed July 23, 2012.
- [ALV 09] Álvarez, M. P. (2009). The four causes of behavior: Aristotle and Skinner. *International Journal of Psychology and Psychological Therapy*, 9(1), 45-57.
- [AND 15] Anderson, D., & Hunter-Zaworski, K. (2015). Platform Edge Detection and Protection Effects on Platform–Train Interface Safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2534), 24-30.
- [ARU] ARUP, <http://www.arup.com>, [Accessed March 8, 2019]
- [ASC 51] Asch, S.E. (1951). Effects of group pressure upon the modification and distortion of judgments. In H. Guetzkow (ed.) *Groups, leadership and men*. Pittsburgh, PA: Carnegie Press.
- [ATK 04] Atkins Rail 2004, Significant Steps research, UK Department for Transport.
- [AXE 97] Axelrod, R. (1997). Advancing the art of simulation in the social sciences. In *Simulating social phenomena* (pp. 21-40). Springer, Berlin, Heidelberg.

- [AXT 00] Axtell, R. (2000). *Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social science*. Center on Social and Economic Dynamics Working Paper No. 17.
- [BAG 96] Båge, P. Are Wide Trains Profitable? (in Swedish). Report TRITA-IP 97-53. KTH Traffic Planning, Stockholm, Sweden, 1996.
- [BAK 07] Baker, J. Myers, N. Murphy, P. (2007). Placing a value on overcrowding and other rail service quality factors. *European Transport Conference proceedings. 17th – 19th October 2007*, Leewenhorst, Lieden, Holland.
- [BAI 14] Baig, M. W., Barakova, E., Regazzoni, C. S., & Rauterberg, M. (2014, January). Realistic modeling of agents in crowd simulations. In *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2014 5th International Conference on* (pp. 507-512). IEEE.
- [BAI 15] Baig, M. W., Baig, M. S., Bastani, V., Barakova, E. I., Marcenaro, L., Regazzoni, C. S., & Rauterberg, M. (2015, July). Perception of emotions from crowd dynamics. In *Digital Signal Processing (DSP), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 703-707). IEEE.
- [BAN 90] Bandura, A. (1990). Perceived self-efficacy in the exercise of personal agency. *Journal of Applied Sport Psychology*, 2, 128–163.
- [BAN 03] Banudra A. (2003). Auto-efficacité. Le sentiment d'efficacité personnelle. Bruxelles, De Boeck.
- [BAR 65] Barker, R. G. (1965) “Explorations in Ecological Psychology,” *American Psychologist*, 20(1): 1-14.
- [BAR 68] Barker, R. G. (1968) *Ecological Psychology* (Stanford: Stanford University Press).
- [BAS 96] Baskerville, R. (1996). Deferring Generalizability Four Classes of Generalization in Social Enquiry. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 8, 5-28.
- [BAU 78] Baum, A. E., & Epstein, Y. M. (1978). *Human response to crowding*. Lawrence Erlbaum.
- [BEE 11] Beedie, C. J., Terry, P. C., Lane, A. M., & Devonport, T. J. (2011). Differential assessment of emotions and moods: Development and validation of the emotion and mood components of anxiety questionnaire. *Personality and Individual Differences*, 50, 228–233.
- [BEL 00] Bell, P.A., Greene, T.C., Fisher, J.D., & Baum, A. (2000). *Environmental Psychology* (5th Edition.) London: Harcourt Brace College Publishers.
- [BEL 08] Bellomo, N., & Dogbe, C. (2008). On the modelling crowd dynamics from scaling to hyperbolic macroscopic models. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 18(supp01), 1317-1345.

- [BER 13] Berkovich, A., Lu, A., Levine, B., & Reddy, A. V. (2013). Observed customer seating and standing behavior and seat preferences on board subway cars in New York City. *Transportation Research Record*, 2353(1), 33-46.
- [BER 07] Berrou, J. L., Beecham, J., Quaglia, P., Kagarlis, M. A., & Gerodimos, A. (2007). Calibration and validation of the Legion simulation model using empirical data. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005* (pp. 167-181). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [BLU 69] Blumer, H. (1969). Collective behavior. In A. M. Lee (Ed.), *Principles of sociology* (pp. 165–221). New York, NY: Barnes and Noble.
- [BLO 12] Blog du RER C : <https://malignec.transilien.com/> [Accessed March 8, 2019]
- [BOE 15] Boero, R. (2015) Behavioral computational social science.
- [BOT 08] Botti, S., Broniarczyk, S., Häubl, G., Hill, R., Huang, Y., Kahn, B., . & Wansink, B. (2008). Choice under restrictions. *Marketing Letters*, 19(3-4), 183-199.
- [BOV 12] Bovy, P. H., & Stern, E. (2012). *Route Choice: Wayfinding in Transport Networks: Wayfinding in Transport Networks* (Vol. 9). Springer Science & Business Media.
- [BRA 14] Brandt, M. J., IJzerman, H., Dijksterhuis, A., Farach, F. J., Geller, J., Giner-Sorolla, R., . & Van't Veer, A. (2014). The replication recipe: What makes for a convincing replication?. *Journal of Experimental Social Psychology*, 50, 217-224.
- [BRE 66] BREHM J.W. (1966). A Theory of Psychological Reactance. New York, Academic Press.
- [BRI 27] P. W. Bridgman's *The Logic of Modern Physics*, New York: Macmillan, 1927.
- [BRI 93] Brilon, W., Großmann, M., & Blanke, H. (1993). ``Verfahren fu «r die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen"[Methods for the calculation of the capacity and quality of traffic flow in streets]. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik series*, (669).
- [BRI 94] Werner Brilon. A new german capacity manual. Dans *The Second International Symposium on Highway Capacity*, édité par Rahmi Akçelik, pages 152–164, Sydney, Australie, août 1994. Australian Road Research Board Ltd. 1.2.2.
- [BRO 97] Brogan, D. C., & Hodgins, J. K. (1997). Group behaviors for systems with significant dynamics. In *Robot colonies* (pp. 137-153). Springer, Boston, MA.
- [BRU 56] Brunswik, E. (1956). *Perception and the representative design of psychological experiments*. Univ of California Press.
- [BUE 03] Buendia, A. (2003). *Une architecture pour la conception de modèles décisionnels: application aux créatures virtuelles dans les jeux vidéos* (Doctoral dissertation, Paris 11).

- [BUR 08] Burkhard, R., Bischof, S., & Herzog, A. (2008, July). The potential of crowd simulations for communication purposes in architecture. In *Information Visualisation, 2008. IV'08. 12th International Conference* (pp. 403-408). IEEE.
- [CAL 62] Calhoun, J. B. (1962). Population density and social pathology. *Scientific American*, 206(2), 139-149.
- [CAM 79] Cook, T. D., & Campbell, D. T. (1979). *Quasi-experimentation: Design and analysis for field settings* (Vol. 3). Chicago: Rand McNally.
- [CAR 08 ] Carré, P., & Fenouillet, F. (2008). *Traité de psychologie de la motivation: Théories et pratiques*. Dunod.
- [CAT 46] Cattell, R. B. (1946). *The description and measurement of personality*. New York: Harcourt, Brace, & World.
- [CAT 57] Cattell, R. B. (1957). *Personality and motivation structure and measurement*. New York: World Book.
- [CHA 09] Challenger, R., Clegg, C. W., Robinson, M. A., & Leigh, M. (2009). Understanding crowd behaviours: Simulation tools. *UK Cabinet Office*.
- [CHE 98] Cheung, C. Y., & Lam, W. H. (1998). Pedestrian route choices between escalator and stairway in MTR stations. *Journal of transportation engineering*, 124(3), 277-285.
- [CHE 11] Cheung, F. M., van de Vijver, F. J. R., & Leong, F. T. L. (2011). Toward a new approach to the study of personality in culture. *American Psychologist*, 66(7), 593–603.
- [CHI 03] Chiva, E., Devade, J., Donnard, J. Y., & Maruéjols, S. (2003). Motivation graphs: A new Architecture for Complex Behavior Simulation. *AI Game Programming Wisdom*, 2.
- [CHI 60] Christian, J. J., Flyger, V., & Davis, D. E. (1960). Factors in the mass mortality of a herd of sika deer, *Cervus nippon*. *Chesapeake Science*, 1(2), 79-95.
- [COL 64] Coleman, J. S., & James, J. (1961). The equilibrium size distribution of freely-forming groups. *Sociometry*, 24(1), 36-45.
- [COM 05] Comptdaer, J., Chiva, E., & Bourguignon, D. (2005). A new microscopic approach to crowd modeling applied to urban crisis management training. In *Conference on Behavior Representation in Modelling and Simulation*.
- [CON 70] Conway, J. (1970). The game of life. *Scientific American*, 223(4), 4.
- [COR 09] Corr, P. J., & Matthews, G. (Eds.). (2009). *The Cambridge handbook of personality psychology* (pp. 748-763). Cambridge, UK:: Cambridge University Press.

[COX 06] Cox, T., Houdmont, J., & Griffiths, A. (2006). Rail passenger crowding, stress, health and safety in Britain. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(3), 244-258.

[COX 15] Coxon, S., Chandler, T., & Wilson, E. (2015). An examination of platform and train passenger boarding, alighting and dispersal through innovative 3D agent based modeling techniques. In G. Lindgaard, & D. Moore (Eds.), *The Proceedings of the 19th Triennial Congress of the International Ergonomics Association Zurich Switzerland*: International Ergonomics Association.

[COX 10] Coxon, S., Burns, K., & de Bono, A. (2010). Design strategies for mitigating passenger door holding behavior on suburban trains in Paris.

[COX 14] Coxon, S., Sarvi, M., Napper, R., & De Bono, A. (2014). An innovative approach to metropolitan train carriage interior configuration; to improve boarding, alighting, dwell time stability and passenger experience. In *World Conference on Transport Research (Romulo Orrico 15 July 2013 to 18 July 2013)* (pp. 1-25). WCTRS Secretariat.

[CRO 98] CROW, A. (1998). Recommendations for Traffic Provisions in Built-Up Areas.

[DAA 04] Winnie Daamen. Modeling Passenger Flows in Public Transport Facilities. PhD thesis, Delf University of Technology, 2004.

[DAA 05] Daamen, W., Bovy, P. H., Hoogendoorn, S. P., & Van de Reijt, A. (2005). Passenger route choice concerning level changes in railway stations. In *Transportation Research Board Annual Meeting* (Vol. 1930, pp. 12-20).

[DAA 08] Daamen, W, Lee, YC & Wiggenraad, PBL (2008). Boarding and alighting experiments: overview of setup and performance and some preliminary results. *Transportation Research Record*, 2042, 71-81.

[DAL 91] Daly, P. N., McGrath, F., & Annesley, T. J. (1991). Pedestrian speed/flow relationships for underground stations. *Traffic engineering and control*, 32(2), 75-78.

[DAN 09] Daniel, J. R. (2009). *Customer behavior relative to gap between platform and train* (Doctoral dissertation, New Jersey Institute of Technology)

[DEC 85] Deci, E., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Springer Science & Business Media.

[DEC 00] Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The " what" and " why" of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological inquiry*, 11(4), 227-268.

[DEN 83] Denzin, N. (1983). Interpretive interactionism. In: G. Morgan (ed.), *Beyond Method: Strategies for Social Research*. Beverly Hills, CA: Sage Publications.

[DEU 55] Deutsch, M., & Gerard, H. (1955). A study of normative and informational social influences upon individual judgment. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 51, 629-636

[DEV 12] Devadoss, R., Ahmad, S., & Dhamodharan, D. R. (2012). Station Platform-Train Interface for Rail passengers-A Technology review". CRC for Rail Innovation.

[DUI 13] Duives, D. C., Daamen, W., & Hoogendoorn, S. P. (2013). State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation research part C: emerging technologies*, 37, 193-209.

[DOL 06] Dolan, M. S., Weiss, L. A., Lewis, R. A., Pietrobelli, A., Heo, M., & Faith, M. S. (2006). "Take the stairs instead of the escalator": effect of environmental prompts on community stair use and implications for a national "Small Steps" campaign. *Obesity reviews*, 7(1), 25-32.

[DOU 12] Douglas, N. (2012). Modelling train and passenger capacity. Report to Transport for NSW. Sydney : Douglas Economics. <http://images.smh.com.au/file/2013/09/23/4770519/trains.pdf>

[DOW 74] Downs, R. M., & Stea, D. (Eds.). (1974). *Image and environment: Cognitive mapping and spatial behavior*. Transaction Publishers.

[DRU 09] Drummond, C. (2009). Replicability is not reproducibility: nor is it good science.

[DWE 88] Dweck, C. S., & Leggett, E. L. (1988). A social-cognitive approach to motivation and personality. *Psychological review*, 95(2), 256.

[EKM 97] Ekman, P., & Keltner, D. (1997). Universal facial expressions of emotion: An old controversy and new findings. In U. Segerstråle & P. Molnár (Eds.), *Nonverbal communication: Where nature meets culture* (pp. 27–46). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

[ELL 18] Elleuch F., Buendia A., Tijus C., Natkin S., Donnet S. (2018). How to collect data to simulate the dynamic of trains- passengers' interaction. In T.T. Rogers, M. Rau, X. Zhu, & C. W. Kalish (Eds.), *Proceedings of the 40th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1645-1650). Austin, TX: Cognitive Science Society.

[EVE 08a] Eves, F. F. (2008). All choices are not equal; effects of context on point-of-choice prompts for stair climbing. *Obesity Reviews*, 9(1), 83-84.

[EVE 08b] Eves, F. F., Lewis, A. L., & Griffin, C. (2008). Modelling effects of stair width on rates of stair climbing in a train station. *Preventive medicine*, 47(3), 270-272.

[EVE 09] Eves, F. F., Olander, E. K., Nicoll, G., Puig-Ribera, A., & Griffin, C. (2009). Increasing stair climbing in a train station: The effects of contextual variables and visibility. *Journal of Environmental Psychology*, 29(2), 300-303.

[EXO] EXODUS, <http://fseg.gre.ac.uk/index.html> [Accessed March 8, 2019]

[EYE 85] Eysenck, S. B. G., Eysenck, H. J., & Barrett, P. (1985). A revised version of the psychoticism scale. *Personality and Individual Differences*, 6(1), 21–29.

- [FED 07] Federal Railroad Administration Office of safety FRA Approach to Managing Gap Safety. 2007.
- [FER 89] Ferber, J. (1989). *Objets et agents: une étude des structures de représentation et de communications en Intelligence Artificielle*(Doctoral dissertation, Paris 6).
- [FER 11] Fernandez, R. (2011). Experimental study of bus boarding and alighting times. *European Transport Conference 2011*, 10-12 October 2011, Glasgow.
- [FER 15] Fernández, R., Valencia, A., & Seriani, S. (2015). On passenger saturation flow in public transport doors. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78, 102-112.
- [FES 52] Festinger, L., Pepitone, A., & Newcomb, T. (1952). Some consequences of de-individuation in a group. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 47(2S), 382.
- [FES 57] FESTINGER L. (1957). *A Theory of Cognitive Dissonance*. Evanston, IL, Row, Perterson & Company.
- [FIE 09] Fiegel, J., Banos, A., & Bertelle, C. (2009, June). Modeling and simulation of pedestrian behaviors in transport areas: The specific case of platform/train exchanges. In *ICCSA 2009* (pp. 129-133).
- [FIN 10] Finfgeld-Connett, D. (2010). Generalizability and transferability of meta-synthesis research findings. *Journal of advanced nursing*, 66(2), 246-254.
- [FLY 06] Flyvbjerg, B. (2006). Five misunderstandings about case-study research. *Qualitative inquiry*, 12(2), 219-245.
- [FOL 80] Folkman, S., & Lazarus, R. S. (1980). An analysis of coping in a middle-aged community sample. *Journal of Health and Social Behavior*, 21, 219–239.
- [FOU 07] Foudil, C., & Noureddine, D. (2007). An autonomous and guided crowd in panic situations. *Journal of Computer Science & Technology*, 7.
- [FRE 70] Freedman, J. (1970) “The Effects of Crowding on Human Behavior,” unpublished manuscript, Department of Psychology, Columbia University.
- [FRE 71] Freedman, J., S. Klevansky, and P. Ehrlich (1971) “The Effect of Crowding on Human Task Performance,” *Journal of Applied Social Psychology*, 1: 7-25.
- [FRE 46] FREUD S. (1946). *Abrégé de psychanalyse*, Paris, PUF.
- [FRU 87] J.J. Fruin: *Pedestrian Planning and Design*, Revised edition (1987).
- [FRU 92] Fruin, J. (1992). *Designing for pedestrians*. Public Transportation United States.

- [FUJ 10] Fujiyama, T., Childs, C., Boampong, D., & Tyler, N. (2010). Investigation into the slope gradients for humps on railway platforms. *Transportation for Elderly and Disabled People*, June.
- [FUN 01] Funder, D. C. (2001). Personality. *Annual Review of Psychology*, 52, 197–221.
- [GAL 09] Galland, S., Gaud, N., Demange, J., & Koukam, A. (2009, December). Environment model for multiagent-based simulation of 3D urban systems. In the 7th European Workshop on Multiagent Systems (EUMAS09), Ayia Napa, Cyprus.
- [GAL 13] Galland, S. (2013). *Méthodologie et outils pour la simulation multiagent dans des univers virtuels* (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté).
- [GAN 98] Ganem, J. (1998). A behavioral demonstration of Fermat’s principle. *The Physics Teacher*, 36(2), 76-78.
- [GOL 14] Golas, A., Narain, R., & Lin, M. C. (2014). Continuum modeling of crowd turbulence. *Physical Review E*, 90(4), 042816.
- [GRI 71] Griffit, W., and R. Veitch (1971) “Hot and Crowded: Influences of Population Density and Temperature on Interpersonal Affective Behavior,” *Journal of Personality and Social Psychology*, 17(1): 92-98.
- [GUS 895] Le Bon, G. (1968). *The crowd: A study of the popular mind*. Dunwoody, GA: Norman S. Berg (Originally published 1895).
- [GOO 92] Goode, E. (1992). *Collective behavior*. Fort Worth, TX: Harcourt Brace Jovanovich.
- [HAA 73] Haase, R. F., & Markey, M. J. (1973). A methodological note on the study of personal space. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 40(1), 122.
- [HAL 66] Hall, E. (1966) *The Hidden Dimension* (Garden City, N.Y.: Doubleday)
- [HAM 13] Hammersley, M. (2013). *What's wrong with ethnography?*. Routledge.
- [HAR 03] Hare, A. P. (2003). Roles, relationships, and groups in organizations: Some conclusions and recommendations. *Small Group Research*, 34, 123–154.
- [HAT 65] Hatfield, E., Cacioppo, J. T., & Rapson, R. L. (1965). Primitive emotional contagion. *Review of Personality and Social Psychology*, 14.
- [HEI 10] Heïgeas, L., Luciani, A., Thollot, J., & Castagné, N. (2010). A physically-based particle model of emergent crowd behaviors. arXiv preprint arXiv:1005.4405.
- [HEL 92a] Dirk Helbing. A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians. *Complex Systems*, 1992.
- [HEL 92b] Helbing, D. (1998). Models for pedestrian behavior. *arXiv preprint cond-mat/9805089*.

- [HEL 93] Helbing, D. (1993). Stochastic and Boltzmann-like models for behavioral changes, and their relation to game theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 193(2), 241-258.
- [HEL 95] Dirk Helbing and Péter Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 1995.
- [HEL 97] Helbing, D., *Verkehrsdynamik*. 1997, Berlin Heidelberg: Springer - Verlag.
- [HEL 98] Helbing, D., & Molnar, P. (1998). Self-organization phenomena in pedestrian crowds. arXiv preprint cond-mat/9806152.
- [HEL 01] Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I. J., & Bolay, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and planning B: planning and design*, 28(3), 361-383.
- [HEL 00a] Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487.
- [HEL 00b] Helbing, D., I. Farkas, T. Vicsek. 2000a. Freezing by heating in a driven mesoscopic system. *Physical Rev. Lett.* 84 1240–1243
- [HEL 05] Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. (2005). Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation science*, 39(1), 1-24.
- [HEL 07] Helbing, D., Johansson, A., & Al-Abideen, H. Z. (2007). Dynamics of crowd disasters: An empirical study. *Physical review E*, 75(4), 046109.
- [HEL 09] Helbing, D., & Johansson, A. (2009). Pedestrian, crowd and evacuation dynamics. In *Encyclopedia of complexity and systems science* (pp. 6476-6495). Springer, New York, NY.
- [HEL 08] Hellström, T. (2008). Transferability and naturalistic generalization: new generalizability concepts for social science or old wine in new bottles?. *Quality & Quantity*, 42(3), 321-337.
- [HEN 71] Henderson L F, 1971, "The statistics of crowd fluids" *Nature* 229 381 ^ 383
- [HEN 72] Henderson, L. F., & Lyons, D. J. (1972). Sexual differences in human crowd motion. *Nature*, 240(5380), 353.
- [HEN 73] Henderson, L. F. & Jenkins, D. M. (1973) Response of Pedestrians to Traffic Challenge.
- [HEN 74] Henderson, L. F., & Jenkins, D. M. (1974). Response of pedestrians to traffic challenge. *Transportation research*, 8(1), 71-74.
- [HEP 11] Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M., & Batty, M. (Eds.). (2011). *Agent-based models of geographical systems*. Springer Science & Business Media.

- [HIR 11] Hirsch, L., & Thompson, K. (2011). *Tarzan travellers: Australian rail passenger perspectives of the design of handholds in carriages* (Doctoral dissertation, Human Factors and Ergonomics Society of Australia).
- [HOC 95] Hock, R. R. (1995). *Forty studies that changed psychology: Explorations into the history of psychological research*. Prentice-Hall, Inc.
- [HOL 95] Holland, J. H. (1995). *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Basic Books, (p.11).
- [HOO 04] Hoogendoorn, S. P., & Daamen, W. (2004). Self-organization in walker experiments. In *Traffic and Granular Flow* (Vol. 3, pp. 121-132). Berlin: Springer Science & Business Media.
- [HOO 05] Hoogendoorn, S. P., & Daamen, W. (2005). Pedestrian behavior at bottlenecks. *Transportation science*, 39(2), 147-159.
- [HOO 03] Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., & Bovy, P. H. (2003, January). Extracting microscopic pedestrian characteristics from video data. In *Transportation Research Board Annual Meeting* (pp. 1-15).
- [HOR 14] Horne, M. *Mind the Gap*. This is the Metadyne Website. 2014, pp. 1–6. Accessed July 2, 2014.
- [HOU 03] House of Commons Transport Committee. (2003). Overcrowding on public transport. In *Seventh report of session 2002–03, Volume I, Ordered by The House of Commons, London, United Kingdom*.
- [HOY 97] Hoyer, R., & Fellendorf, M. (1997). *Parametrization of Microscopic Traffic Flow Models Through Image Processing* (No. Volume 2).
- [HUG 02] Hughes, R. L. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6), 507-535.
- [HUG 03] Hughes, R. L. (2003). The flow of human crowds. *Annual review of fluid mechanics*, 35(1), 169-182.
- [HUI 01] Huitt, W. (2001). Motivation to learn: An overview. *Educational psychology interactive*, 12.
- [HUL 43] HULL C.L. (1943). *Principles of Behavior*, New York, Appleton-Century-Crofts.
- [HUT 66] Hutt, C., and M. Vaizey (1966) "Differential Effects of Group Density on Social Behavior," *Nature*, 209 (26 March): 1371- 1372.
- [HUT 13] Hutton, B. (2013). *Planning sustainable transport*. Routledge.

- [JIA 15] Jia, W., & Chow, M. (2015). *How Crowded Is Crowded? A Practitioner's Tool to Assessing Rail Congestion* (No. 15-0789).
- [KAL 04] Kalton, G. (2004). Question-Wording Effects in Surveys. *Encyclopedia of Statistical Sciences*, 10.
- [KAN 81] Kanner, A. D., Coyne, J. C., Schaefer, C., & Lazarus, R. S. (1981). Comparison of two modes of stress measurement: Daily hassles and uplifts versus major life events. *Journal of Behavioral Medicine*, 4, 1–39.
- [KEO 98] Koechling, J., Crane, A., & Raibert, M. (1998). Applications of realistic human entities using DI-Guy. In *Proc. of Spring Simulation Interoperability Workshop*.
- [KIM 14] Kim, H., Kwon, S., Wu, S. K., & Sohn, K. (2014). Why do passengers choose a specific car of a metro train during the morning peak hours?. *Transportation research part A: policy and practice*, 61, 249-258.
- [KIN 14] King, D., Srikuenthiran, S., & Shalaby, A. (2014). Using simulation to analyze crowd congestion and mitigation at Canadian subway interchanges: case of Bloor-Yonge Station, Toronto, Ontario. *Transportation Research Record*, 2417(1), 27-36.
- [KIT 10] Kitazawa, K., & Fujiyama, T. (2010). Pedestrian vision and collision avoidance behavior: Investigation of the information process space of pedestrians using an eye tracker. In *Pedestrian and evacuation dynamics 2008* (pp. 95-108). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [KIT 03] Kittelson & Associates, Inc., KFH Group, Inc., Parsons Brinckerhoff Quade & Douglass, Inc., & K. Hunter-Zaworski (2003). *TCRP Report 100: Transit Capacity and Quality of Service Manual*, 2nd ed. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- [KIT 08] Kitto, S. C., Chesters, J., & Grbich, C. (2008). Quality in qualitative research. *Medical journal of Australia*, 188(4), 243.
- [KRA 11] Krahnstoever, N., Chang, M. C., & Ge, W. (2011, August). Gaze and body pose estimation from a distance. In *Advanced Video and Signal-Based Surveillance (AVSS), 2011 8th IEEE International Conference on* (pp. 11-16). IEEE.
- [KUL 05] Kulpa, R., Multon, F., & Arnaldi, B. (2005). Specific representation of motions for interactive animation with several characters. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 24, No. 3, pp. 343-352).
- [LAM 99] Lam, W.H.K., Cheung, C-Y., & Lam, C.F. (1999). A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations. *Transportation Research, Part A: Policy & Practice*, 33, 401-415.
- [LAM 95] Lam, W. H., Morrall, J. F., & Ho, H. (1995). Pedestrian flow characteristics in Hong Kong. *Transportation Research Record*, (1487).

- [LAN 77] Langer, E.J., & Saegert, S. (1977) Crowding and cognitive control. *Journal of Personality and Social Psychology*, 35, 175-182.
- [LAS 86] Lassiter, G. D., & Irvine, A. A. (1986). Videotaped confessions: The impact of camera point of view on judgments of coercion. *Journal of Applied Social Psychology*, 16(3), 268-276.
- [LAT 69] Latané, B., & Darley, J. M. (1969). Bystander "Apathy". *American Scientist*, 57(2), 244-268.
- [LAU 05] Lau, S. (2005). *Evaluating Interior and Door Configurations of rail vehicles by using variable loading densities*. Transport Research Record: Journal of the transportation Research Board, No 1927.
- [LAZ 84] Lazarus, R. P., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. New York, NY: Springer.
- [LAZ 91] Lazarus, R. S. (1991). *Emotion and adaptation*. New York, NY: Oxford University Press.
- [LEE 03] Lee, A. S., & Baskerville, R. L. (2003). Generalizing generalizability in information systems research. *Information systems research*, 14(3), 221-243.
- [LEG] LEGION, <http://www.legion.com/> [Accessed March 8, 2019]
- [LEU 15] Leung, L. (2015). Validity, reliability, and generalizability in qualitative research. *Journal of family medicine and primary care*, 4(3), 324.
- [LEW 11] Lewis, J. E., DeGusta, D., Meyer, M. R., Monge, J. M., Mann, A. E., & Holloway, R. L. (2011). The mismeasure of science: Stephen Jay Gould versus Samuel George Morton on skulls and bias. *PLoS Biology*, 9(6), e1001071.
- [LEW 51] Lewin, K. (1951). *Field theory in social science: selected theoretical papers* (Edited by Dorwin Cartwright).
- [LID 15] Li, D., Daamen, W., & Goverde, R. M. (2015). Estimation of train dwell time at short stops based on track occupation event data. Proceedings of the 6th International conference on Railway Operations Modelling and Analysis, RailTokyo2015, Narashimo, Japan.
- [LIN 85] Lincoln Y.S. & Guba E.G. (1985) *Naturalistic Inquiry*. Sage, Newbury Park, CA.
- [LIN 92] Lin T. and N. H. Wilson. (1992). Dwell time relationships for light rail systems. *Transportation Research Record*, 1361, 287-295.
- [LIV 12] Livet, P. (1994). *La communauté virtuelle: action et communication*. Editions de l'Éclat.
- [LIZ 13] Li, Z., & Hensher, D. A. (2013). Crowding in public transport: a review of objective and subjective measures. *Journal of Public Transportation*, 16(2), 6.

- [LOP03] A. López and F. Pérez: *Ship Evacuation Optimisation – Tools for Master and Designer Aid*, In: E.R. Galea (Ed.), Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, CMS Press, University of Greenwich, London, pp. 221 (2003).
- [LUN 76] Lundberg, U. (1976) Urban commuting: crowdedness and catecholamine excretion. *Journal of Human Stress*, 2, 26-32.
- [MAA] MASA, [www.masagroup.net](http://www.masagroup.net), [Accessed March 8, 2019]
- [MAC 10] Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of simulation*, 4(3), 151-162.
- [MAI 76] Maier, S. F., & Seligman, M. E. (1976). Learned helplessness: Theory and evidence. *Journal of experimental psychology: general*, 105(1), 3.
- [MAN] MANDAR, M., & BOULMAKOUL, A. Vers une plateforme de simulation des piétons virtuels à base d'automates cellulaires et de modèle de choix discret.
- [MAR 86] Martin, P. & Bateson, P. 1986: *Measuring Behaviour: An Introductory Guide*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [MAS] Massive Software, <http://www.massivesoftware.com/> [Accessed March 8, 2019]
- [MAT 90] Matsumoto, D. (1990). Cultural similarities and differences in display rules. *Motivation and emotion*, 14(3), 195-214.
- [MAY 15] Mayhew, S. (2015). *A dictionary of geography*. Oxford University Press, USA.
- [MCC 89] McCullagh, P. och Nelder, JA (1989). Generalized Linear Models. *Monographs on Statistics and Applied Probability*. Chapman & Hall,.
- [MCF 93] McFarland, D., Bösser, T., & Bosser, T. (1993). *Intelligent behavior in animals and robots*. Mit Press.
- [MCP 83] McPhail, C., & Wohlstein, R. T. (1983). Individual and collective behaviors within gatherings, demonstrations, and riots. *Annual Review of Sociology*, 9, 579–600.
- [MCP 91] McPhail, C. (1991). *The Myth of the Madding Crowd*.
- [MCP 97] McPhail, C. (1997). Stereotypes of crowds and collective behavior: Looking backward, looking forward. Greenwich, CT: JAI Press Inc.
- [MEH 09] Mehran, R., Oyama, A., & Shah, M. (2009, June). Abnormal crowd behavior detection using social force model. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on* (pp. 935-942). IEEE.
- [MCG 85] McGuire, W. J. (1985). Attitudes and attitude change. *Handbook of social psychology*, 2.

- [MIC 07] Michel, F. (2007, May). The IRM4S model: the influence/reaction principle for multiagent based simulation. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems* (p. 133). ACM.
- [MIL 65] Milgram, S. (1965). Some conditions of obedience and disobedience to authority. *Human Relations*, 18, 57–76.
- [MIN 96] Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., & Askenazi, M. (1996). The swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations.
- [MIS 72] Mischel, W., Ebbesen, E. B., & Raskoff Zeiss, A. (1972). Cognitive and attentional mechanisms of delay in gratification. *Journal of Personality and Social Psychology*, 21(2), 204–218.
- [MUS 01] Musse, S. R., & Thalmann, D. (2001). Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7(2), 152-164.
- [NAG 61] Nagel, E. (1961). The structure of science: problems in scientific explanation.
- [NAT 18] S.Natkin (2018) Simulateurs et simulation. Cours du Conservatoire national des arts et métiers. Diplôme Ingénieur - Spécialité informatique Sciences et Technologies des Médias Numériques.
- [NEU 07] Neupert, S. D., Almeida, D. M., & Charles, S. T. (2007). Age differences in reactivity to daily stressors: The role of personal control. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 62(4), P216-P225.
- [NEW 90] Allen, N. (1990). Unified Theories of Cognition. *Cambridge, Harvard University*.
- [NEW 92] New York City Department of Transportation. *Reducing Subway Overcrowding at the 26 Manhattan CBD Cordons – Vol. 1: The Queens Cordon* (1992), pp. 8-9.
- [NUT 91] Nuttin, J. (1991). Théorie de la motivation humaine du besoin au projet d'action–Paris: PUF–Coll. *Psychologie d'aujourd'hui*.
- [NWA 96] Nwana, H. S. (1996). Software agents: An overview. *The knowledge engineering review*, 11(3), 205-244.
- [OKA 93] Okazaki, S., & Matsushita, S. (1993, March). A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing. In *International Conference on Engineering for Crowd Safety* (Vol. 271).
- [OSU 04] O'Sullivan, D. (2004, March 5–8). *Complexity science and human geography. Transactions of the Institute of British Geographers*, 29, 282–295. Royal Geographical Society (with the Institute of British Geographers).
- [OWE 96] Owen, M., Galea, E. R., & Lawrence, P. J. (1996). The EXODUS evacuation model applied to building evacuation scenarios. *Journal of Fire Protection Engineering*, 8(2), 65-84.

- [PAR 03] J. H. Park, H. Kim, and D. Lee, *Development of an Intelligent Agent for Evacuation Model*, In: E.R. Galea (Ed.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, CMS Press, University of Greenwich, London, pp. 383 (2003).
- [PAR 06] Paris, S., Donikian, S., & Bonvalet, N. (2006, September). Behavioural interactive and introspective objects for crowd simulation. In *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (poster session)*.
- [PAR 10] Paris, S., Lefebvre, D., & Donikian, S. (2010). Simulem: introducing goal oriented behaviours in crowd simulation. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008* (pp. 479-490). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [PAR 96] Parkinson, T., and I. Fisher. *TCRP Report 13: Rail Transit Capacity*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996.
- [PAS 15] Pastor, J. M., Garcimartín, A., Gago, P. A., Peralta, J. P., Martín-Gómez, C., Ferrer, L. M., . & Zuriguel, I. (2015). Experimental proof of faster-is-slower in systems of frictional particles flowing through constrictions. *Physical Review E*, 92(6), 062817.
- [PAU 84] Pauls, J. (1984). The movement of people in buildings and design solutions for means of egress. *Fire technology*, 20(1), 27-47.
- [PAY 05] Payne, G., & Williams, M. (2005). Generalization in qualitative research. *Sociology*, 39(2), 295-314.
- [PEL 05] Silverman, B. G., Badler, N. I., Pelechano, N., & O'Brien, K. (2005). Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication.
- [PEL 06] Pelechano, N., & Badler, N. I. (2006). Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation. *IEEE computer graphics and applications*, 26(6).
- [PEL 09] Pellegrini, S., Ess, A., Schindler, K., & Van Gool, L. (2009, September). You'll never walk alone: Modeling social behavior for multi-target tracking. In *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on* (pp. 261-268). IEEE.
- [PET 03] Petersen, U., Meyer-König, T., Klüpfel, H., & Schreckenberg, M. (2003). Ship evacuation modelling. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Greenwich, UK* (pp. 209-219).
- [PEP 03] Pepper, J., Spitz, G., & Adler, T. (2003). Customer perspectives on multilevel coaches for increasing rail system capacity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1838), 19-29.
- [PHE 98] Pheasant, S. (1998). *Bodyspace anthropology, ergonomics, and the design of work* Taylor & Francis Ltd.

- [PON 06] Pons, F., Laroche, M., & Mourali, M. (2006). Consumer reactions to crowded retail settings: Cross-cultural differences between North America and the Middle East. *Psychology & Marketing*, 23(7), 555-572.
- [POP 05] Popper, K. (2005). *The logic of scientific discovery*. Routledge.
- [POP 74] Popper, K. (1974). La quête inachevée, 350 pages, rééditions 1976, 1981, 1986. *The Library of living philosophers In./Calman Levy Agora Presse pocket, Paris*.
- [PRE 71] Predtetschenski, W. M., & Milinski, A. I. (1971). Personenströme in Gebäuden.
- [PRI 78] Predtechenskii, V. M., & Milinski, A. I. (1978). *Planning for foot traffic flow in buildings*. National Bureau of Standards, US Department of Commerce, and the National Science Foundation, Washington, DC.
- [PRI 14] Das, P., Parida, M., & Katiyar, V. (2014). Review of Simulation Techniques for Microscopic Mobility of Pedestrian Movement. *Trends in Transport Engineering and Applications*, 1(1), 26-45.
- [PRO 70] Proshansky, H. M., Ittelson, W. H., & Rivlin, L. G. (1970). Freedom of choice and behavior in a physical setting. *Environmental psychology: Man and his physical setting*, 173-183.
- [PTV 00] PTV AG (2000). VISSIM user manual – Version 3.00, Karlsruhe, Germany. Redmond, G., Sutherland, H., & Wilson, M. (1998). *The arithmetic of tax and social security reform: A user's guide to microsimulation: Methods and analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [PUO 00] Puong, A. (2000). Dwell time model and analysis for the MBTA red line. *Massachusetts Institute of Technology Research Memo*, 02139-4307.
- [PUS 77] Puskarev et Zupan. Public transit and land use planning. *Indiana University Press*, janvier 1977. 1.2.2
- [RAB 16] Rabiaa, C., & Foudil, C. (2016). Toward a hybrid approach for crowd simulation. *Int. Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 7(1).
- [RAI 04] Railway Operators in Japan, Central Tokyo. *Japan Railway & Transport Review*, No. 30, Makoto Aoki, Toyama University, Dept. of Economics, undated, pp. 42–53. [www.jrtr.net/jrtr30/s42\\_aok.html](http://www.jrtr.net/jrtr30/s42_aok.html). Accessed July 28, 2004.
- [REE 83] Reeves, W. T. (1983). Particle systems—a technique for modeling a class of fuzzy objects. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2(2), 91-108.
- [REY 87] Reynolds, C. W. (1987, August). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *ACM SIGGRAPH computer graphics* (Vol. 21, No. 4, pp. 25-34). ACM.
- [ROT 66] Rotter, J. (1966). Generalized expectancies for internal versus external control of reinforcements. *Psychological Monographs*, 80, 609.

- [RUD 06] Ruddin, L. P. (2006). You can generalize stupid! Social scientists, Bent Flyvbjerg, and case study methodology. *Qualitative inquiry*, 12(4), 797-812.
- [RUG 08] Ruger, B. Tuna, D (2008). *Influence of railway interiors on dwell time and punctuality*. Railway Interiors International, UKIP Media Events, Dorking Surrey.
- [RUS 02] Russell, S. J., & Norvig, P. (2002). *Artificial intelligence: a modern approach* (International Edition).
- [RUS 13] Russell, B. (2013). *History of western philosophy: Collectors edition*. Routledge.
- [SAL 09] Salvador F, Quera V, Zibetti E, Tijus C, Min~ano M (2009) ACACIA: an agent-based program for simulating adaptive behavior to reach long-term goals. *Cogn Process* 10:95–99.
- [SAN 16] San, H. P., & Masirin, M. I. M. (2016). Train Dwell Time Models for Rail Passenger Service. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 47). EDP Sciences.
- [SAN 13] San SANTOSO, D., MAHADTHAI, S., JAHED, A. B., & TUN, N. (2013). How Safe is the Rail Platform? A Study of Bangkok Mass Transit System (BTS). In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* (Vol. 9).
- [SAK 05] Sakuma, T., Mukai, T., & Kuriyama, S. (2005). Psychological model for animating crowded pedestrians. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 16(3-4), 343-351.
- [SAW 09] Sawley, K. Optimising the High-Capacity Suburban Train. *Railway Gazette International*, Vol. 165, No. 7, 2009, pp. 34–37.
- [SCA 62] Schachter, S., & Singer, J. E. (1962). Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological Review*, 69, 379–399.
- [SHA 01] Shalizi, C. R., & Crutchfield, J. P. (2001). Computational mechanics: Pattern and prediction, structure and simplicity. *Journal of statistical physics*, 104(3), 817-879.
- [SCH 60] Schelling, T. C. (1960). 1960 The strategy of conflict. Cambridge, Mass., Harvard University Press.
- [SCH 71] Schelling, T. C. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of mathematical sociology*, 1(2), 143-186.
- [SCH 76] Scheflen, A. E., & Ashcraft, N. (1976). Human territories: How we behave in space-time.
- [SCH 03] V. Schneider: *Simulating the Evacuation of Large Assembly Occupancies*, In: E.R. Galea (Ed.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, CMS Press, University of Greenwich, London, pp. 319 (2003).

- [SCH 08] Schmidt-Lainé, C., & Pavé, A. (2008). La modélisation au cœur de la démarche scientifique et à la confluence des disciplines. *Les cahiers du Musée des confluences*, 21-34.
- [SCH 63] Schmitt, R. C. (1963). Implications of density in Hong Kong. *Journal of the American Institute of Planners*, 29(3), 210-217.
- [SCH 77] Schank, R. C., Abelson, R. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding: An inquiry into human knowledge*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- [SCO 00] Schofield J.W. (2000) Increasing the generalizability of qualitative research. In *Case Study Method: Key Issues, Key Texts* (Gomm R., Hammersley M. & Foster P., eds), Sage, Thousand Oaks, CA, pp. 69–97
- [SCO 09] Scovanner, P., & Tappen, M. F. (2009, September). Learning pedestrian dynamics from the real world. In *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on* (pp. 381-388). IEEE.
- [SEI 14] Seitz, M. J., Dietrich, F., & Köster, G. (2014). A study of pedestrian stepping behaviour for crowd simulation. *Transportation Research Procedia*, 2, 282-290.
- [SEL 79] Seligman, M.E.P., & Miller, S.M. (1979.). The psychology of power: concluding comments, In L.C. Perlmutter & R.A Monty (Eds) , *Choices and Perceived Control*, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- [SEL 76] Selye, H. (1976). *The stress of life* (Rev. ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- [SEN 85] Seneviratne, P. N., & Morrall, J. F. (1985). Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. *Transportation Planning and Technology*, 10(2), 147-159.
- [SEY 09] Seyfried, A., Passon, O., Steffen, B., Boltes, M., Rupperecht, T., & Klingsch, W. (2009). New insights into pedestrian flow through bottlenecks. *Transportation Science*, 43(3), 395-406.
- [SHA 07] Shao, W., & Terzopoulos, D. (2007). Autonomous pedestrians. *Graphical models*, 69(5-6), 246-274.
- [SIG 901] Sighele, S. (1901). *La foule criminelle*. Paris: F. Alcan.
- [SIL 99] Silver, C. N., & Braun, C. (1999). *Behaviour, Warnings and Risk Communication*, edited by Wolgalter, M. Dejoy, D. Laughery, K.
- [SIM] SimWalk, <http://www.simwalk.com/> [Accessed March 8, 2019]
- [SIN 78] Singer, J.E., Lundberg, U., & Frankenhauser, M. (1978). Stress on the train: a study of urban commuting, in A. Baum, J.E. Singer and S. Valins (Eds), *Advances in Environmental Psychology*, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

- [SOM 69] Sommer, R. (1969) *Personal Space-the Behavioral Basis of Design* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall).
- [SOU 11] Sourd, F., Talotte, C., Ambroise, C., Constans-Brugeais, Y., Pillon, A., & Donakian, S. (2011, May). Modelling of pedestrian flows during dwelling: development of a simulator to evaluate rolling stock and platform flow performance. In *WCRR2011-World Congress on Railway Research, Lille France*.
- [SOU 09] F. Sourd M. Goudeau (Septembre 2009). Amélioration des flux voyageurs en Transilien - liste argumentée des outils. Document interne.
- [SRI 13] Srikukenthiran, S., Fisher, D., Shalaby, A., & King, D. (2013). Pedestrian route choice of vertical facilities in subway stations. *Transportation Research Record*, 2351(1), 115-123.
- [STE 07] Steiner, A. (2007). Parameter estimation for a pedestrian simulation model. In *Swiss Transport Research Conference, 2007* (Vol. 29).
- [STE 10] Sterlin, P., Deconinck, F., Rakotaorison, T., & Buendia, A. (2010). Comfort driven navigation of individuals in a crowd simulation. *Computer Animation and Virtual Worlds*.
- [STI 00] Still, G. K. (2000). Crowd dynamics (Doctoral dissertation, University of Warwick).
- [STO 72] Stokols, D. (1972). On the distinction between density and crowding: Some implications for future research. *Psychological review*, 79(3), 275.
- [TAN 86] Tanaboriboon, Y., Hwa, S. S., & Chor, C. H. (1986). Pedestrian characteristics study in Singapore. *Journal of transportation engineering*, 112(3), 229-235.
- [TSH 13] Tschirhart, F. (2013). *Intelligence artificielle pour la psychologie des foules en animation interactive* (Doctoral dissertation, Paris 8).
- [TCR 13] Transit Cooperative Research Program (TCRP) Report 165, June 2013, Transit Capacity and Quality Service Manual 3rd edition, Transportation Research Board.
- [THO 11] Thompson K, Hirsch L, Rainbird S. *A socio-economic study of carriage and platform crowding in the Australian railway industry: Qualitative research summary*. Brisbane: CRC for Rail Innovation & University of South Australia forthcoming, 2011.
- [TED 07] Teddlie, C., & Yu, F. (2007). Mixed methods sampling: A typology with examples. *Journal of mixed methods research*, 1(1), 77-100.
- [TEK 07] Teknomo, K., & Millonig, A. (2007, June). A navigation algorithm for pedestrian simulation in dynamic environments. In Proceedings 11th World Conference on Transport Research. Berkeley, California.
- [TIN 63] Tinbergen, N. (1963). On aims and methods of ethology. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 20(4), 410-433.

[TOG 55] Togawa, K. (1955). *Study on fire escapes basing on the observation of multitude currents*. Building Research Institute, Ministry of Construction.

[TRA 07] Transit blogger : <http://www.transitblogger.com/system-conditions/yet-another-lirr-gap-accident.php> [Accessed March 8, 2019]

[TRO 01] Trochim, W. M., & Donnelly, J. P. (2001). Research methods knowledge base.

[TRB 85] TRB, 1985, "Pedestrians", in Highway Capacity Manual special report 209 (Transportation Research Board, Washington, DC) chapter 13""

[TRB 03] TRB (2003) Transit Capacity and Quality of Service Manual, Part 5 Rail Transit Capacity, 2nd Edition, Transportation Research Board, Washington D.C."

[TRE 06] Treuille, A., Cooper, S., & Popović, Z. (2006). Continuum crowds. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(3), 1160-1168.

[TRI 02] Triandis, H. C., & Suh, E. M. (2002). Cultural influences on personality. *Annual Review of Psychology*, 53, 133–160.

[TYR 93] TYRREL, T. (1993). The Use of Hierarchies for Action Selection. In *Proc. 2nd Int. Conf. on the Simulation of Adaptive Behavior* (pp. 138-147). MIT Press.

[VAL 13] Valentin, J. R. (2013). *Simulation du comportement humain en situation d'évacuation de bâtiment en feu* (Doctoral dissertation, Pau).

[VAS 03] Vassalos, D., Guarin, L., Vassalos, G. C., Bole, M., Kim, H., & Majumder, J. (2003). Advanced Evacuation Analysis—Testing the Ground on Ships. In *Proceedings of the 2nd international conference on pedestrian and evacuation dynamics*.

[VAS 09] Vassalos, D. (2009). Risk-based ship design. In *Risk-based ship design* (pp. 17-96). Springer Berlin Heidelberg.

[VEI 13] Veitch, T., Partridge, J., & Walker, L. (2013, October). Estimating the costs of overcrowding on Melbourne's rail system. In *Australasian Transport Research Forum (ATRF)*, 36th (p. 1).

[VER 97] Verlander, N.Q. and B.G. Heydecker, Pedestrian Route Choice: An Empirical Study, in Proceedings of Seminar F of the PTRC European Transport Forum. 1997. p. 39-49.

[VON 90] Von Glasersfeld, E. (1990). Teleology and the concepts of causation. *Philosophica*, 46(2), 17-43.

[VOX] VOXELIA, <http://www.voxelia.com>

[WAS 05] Washington Metropolitan Area Transit Authority. Railcar Capacity Analysis, Nov. 3, 2005. [https://www.wmata.com/about\\_metro/board\\_of\\_directors/board\\_docs/110305\\_IIRailcarCapacityAnalysis.pdf](https://www.wmata.com/about_metro/board_of_directors/board_docs/110305_IIRailcarCapacityAnalysis.pdf). Accessed July 23, 2012. 11.

- [WEB 11] Webb, O. J., Eves, F. F., & Smith, L. (2011). Investigating behavioural mimicry in the context of stair/escalator choice. *British journal of health psychology*, 16(2), 373-385.
- [WEI 93] Weidmann, U. (1993). Transporttechnik der Fußgänger: transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs, Literaturlauswertung. *IVT Schriftenreihe*, 90.
- [WIE 74] Wiedemann, R. (1974). Simulation des verkehrsfusses schriftensreihe des instituts für verkehrswesen. *Universität Karlsruhe*, (8).
- [WIG 01] Wiggenraad, P. B. L. (2001). Alighting and boarding times of passengers at Dutch railway stations. *TRAIL Research School, Delft*.
- [WIJ 11] Wijermans, N. (2011). *Understanding crowd behaviour* (Doctoral dissertation, PhD. thesis. University of Groningen, Groningen).
- [WIL 99a] Wilensky, U., & Resnick, M. (1999). Thinking in levels: A dynamic systems approach to making sense of the world. *Journal of Science Education and technology*, 8(1), 3-19.
- [WIL 99b] Wilensky, U., Hazzard, E., & Froemke, R. (1999). GasLab: an extensible modeling toolkit for exploring statistical mechanics. In *Seventh European Logo Conference (EUROLOGO '99)*, Sofia, Bulgaria.
- [WIL 15] Wilensky, U., & Rand, W. (2015). *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. MIT Press. (p. 7)
- [WIL 00a] Williams, M. (2000). (2000a) 'Interpretivism and Generalization', *Sociology* 34 (2): 209-224.
- [WOR 76] Worchel, S., & Teddie, C. (1976). The experience of crowding: A two-factor theory. *Journal of Personality and social psychology*, 34(1), 30.
- [WWO 10] World Health Organization. (2010). Global recommendations on physical activity for health. Geneva, Switzerland: Author.
- [XIO 10] Xiong, M., Lees, M., Cai, W., Zhou, S., & Low, M. Y. H. (2010). Hybrid modelling of crowd simulation. *Procedia Computer Science*, 1(1), 57-65.
- [YAM 13] Yamamura, A., Koresawa, M., Inagi, T., & Tomii, N. (2013, July). Dwell time analysis in railway lines using multi agent simulation. In *Proceedings of 13th world conference on transportation research (WCTR 2013)*, Rio de Janeiro, Brazil.
- [YAM 14] Yamada, S., Terabe, S., & Kasai, M. (2014). Safety Performance Measures for Railway Stations. In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting* (No. 14-1868).
- [ZAC 15a] Zacharias, J., & Ling, R. (2015). Choosing between stairs and escalator in shopping centers: the impact of location, height, and pedestrian volume. *Environment and Behavior*, 47(6), 694-709.

- [ZAC 15b] Zacharias, J., & Tang, B. (2015). Choosing between stairs and escalators in China: The impact of location, height and pedestrian volume. *Preventive medicine reports*, 2, 529-532.
- [ZHA 08] Zhan, B., Monekosso, D. N., Remagnino, P., Velastin, S. A., & Xu, L. Q. (2008). Crowd analysis: a survey. *Machine Vision and Applications*, 19(5-6), 345-357.
- [ZHA 09] Zhang, S., Luo, Y., Chen, B., & Bao, X. (2009). Progress of Simulation Studies of Pedestrian Traffic. In *International Conference on Transportation Engineering 2009* (pp. 2596-2601).
- [ZHA 15] Zhang, N., Zhang, Y., & Zhang, X. (2015). Pedestrian choices of vertical walking facilities inside urban rail transit stations. *KSCE journal of civil engineering*, 19(3), 742-748.
- [ZHO 10] Zhou, S., Chen, D., Cai, W., Luo, L., Low, M. Y. H., Tian, F., . & Hamilton, B. D. (2010). Crowd modeling and simulation technologies. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 20(4), 20.
- [ZIB 07] Zibetti, E., Tijus, C., Quera, V., Salvador-Beltran, F., Bui, M., & Pham, M. (2007). ACACIA-cooperation: emergent strategies in an evolutionary multi-agents system under environmental constraints. In *Addendum Contributions to the 5th International Conferences on Research, Innovation & Vision for the Future (RIVF'07)* (pp. 19-25). IEEE Computer Society Press.
- [ZIB 16] Zibetti, E., Carrignon, S., & Bredeche, N. (2016). ACACIA-ES: an agent-based modeling and simulation tool for investigating social behaviors in resource-limited two-dimensional environments. *Mind & Society*, 15(1), 83-104.
- [ZIM 69] Zimbardo, P. G. (1969). The human choice: Individuation, reason, and order versus deindividuation, impulse, and chaos. In *Nebraska symposium on motivation*. University of Nebraska press.



# Transférabilité d'une modélisation-simulation multi-agents : le comportement inter-gares des voyageurs de la SNCF lors des échanges quai-train

## Résumé

Les travaux de cette thèse portent sur la définition et la validation d'une méthode de modélisation-simulation de foule permettant le transfert des principes et des mesures établis dans un contexte source d'observations vers des contextes cibles, non observables a priori. A partir de l'observation de comportements de piétons d'un contexte environnemental, social et urbain, nous inférons les règles et des motivations, rendant possible la modélisation et la simulation du comportement individuel de piétons dans ce contexte source, puis à évaluer la transférabilité du modèle dans un autre contexte cible. Nous appuyons nos travaux sur un cas réel. Il s'agit de la simulation du comportement des voyageurs entrants et sortants des trains dans une gare à fort trafic. Après une revue des théories, de modèles de simulation, nous retenons une approche basée sur la simulation microscopique d'agents sociaux, situés, basée sur les motivations. Nous argumentons le choix par le fait que, par rapport à une simulation de foule classique elle, a priori, l'avantage de favoriser la transférabilité. L'objectif de cette simulation est d'étudier, entre autres, les évolutions architecturales des stations permettant de raccourcir les temps d'arrêt des trains.

**Mots-clés :** Système multi-agents, Modèle microscopiques, Transférabilité, Approche motivationnelle, Contexte Ferroviaire.

## Résumé en anglais

This thesis focuses on the definition and the validation of a crowd-simulation modeling method. This method allows transferring principles and measurements established in a source observation context to a target one. From the observation of pedestrian behavior in a social and urban context, our approach infers rules and motivations in order to model and simulate the individual pedestrian behavior in this source context. This allows, in a second step, to evaluate the transferability of the model to a given target context. Our work is based on a real case: the simulation of the passenger's behavior while boarding and alighting trains (platform-train exchange) in a high-traffic station (dense situation). Starting from the state of the art of theories, models and types of simulation, we choose an approach based on the microscopic simulation of social agent's motivation. This choice relies mainly on the fact that, compared to a classic crowd simulation, it has, a priori, a better transferability potential. The goal of this type of simulation is to study the architectural evolutions of the stations that could allow to control or shorten train dwell times.

**Keywords:** Agent-based system, Microscopic model, Transferability, Motivational Approach, Railway context, Transportation research