

UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE MÉDECINE

En collaboration avec la
HAUTE ÉCOLE FÉDÉRALE DE SPORTS DE MACOLIN

Simulation de foule pour fluidifier la course des cinq 4'000,
Sierre-Zinal

Travail final pour l'obtention du Master en
Sciences du Mouvement et du sport
Option Enseignement

Conseiller: Prof. Dr. Jean-Pierre BRESCIANI
Co-conseiller-ère: Thibaut LE NAOUR

Valentin GENOUD
Fribourg, Février, 2016

Table des matières

1	INTRODUCTION	4
2	CONTEXTE : SIERRE-ZINAL	9
2.1	HISTORIQUE	9
2.2	LE PARCOURS	10
2.3	LE TAUX DE PARTICIPATION	12
2.4	LE DEPART EN BLOC	13
2.4.1	LA NOUVEAUTE 2015	13
2.4.2	LE BILAN QUALITATIF DES BLOCS DE DEPART	14
2.4.3	LE BILAN QUANTITATIF DES BLOCS DE DEPART	15
3	TRAVAUX THEORIQUES PRECEDENTS BASES SUR LA SIMULATION DE FOULE	21
3.1	LA FOULE AU QUOTIDIEN	21
3.2	LE MODELE MICROSCOPIQUE	22
3.2.1	UN MODELE A BASE DE REGLES	22
3.2.2	UN MODELE GEOMETRIQUE	23
3.2.3	LES OBSERVATIONS DE TYPES NATURELLES	24
3.3	LA SYNTHESE DU MOUVEMENT	25
3.4	LE PRINCIPE DU MOINDRE EFFORT	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
3.5	L'EVITEMENT DE COLLISION	25
3.6	LES OBSTACLES STATIQUES	27
3.7	L'EFFET « STOP AND GO »	28
3.8	LA SIMULATION DE FOULE A SIERRE-ZINAL	28
4	METHODOLOGIE	30
4.1	LES PARAMETRES EXTRINSEQUES A LA SIMULATION	30
4.1.1	LE PARCOURS	31
4.1.2	LES PARTICIPANTS	34
4.1.3	L'ASPECT SOCIAL	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
4.2	LES PARAMETRES INTRINSEQUES A LA SIMULATION	39
4.2.1	LE PHENOMENE « STOP AND GO »	39
4.2.2	LA CONTINUITE	40
4.3	LES HYPOTHESES DU DEPART EN BLOC	41
5	RESULTATS	44
5.1	LA VALIDITE DU MODELE	45
5.2	LES DEPARTS EN BLOCS ECHELONNES	53
5.2.1	LA VARIATION DU TEMPS FINAL MIS PAR LES AGENTS AVEC DES DEPARTS ECHELONNES	54
5.2.2	L'ANALYSE DES « LOST-TIME » APRES DES DEPARTS ECHELONNES	58
6	DISCUSSION	63
6.1	POINTS FORTS ET LIMITES DU TRAVAIL	63
6.2	PERSPECTIVES DE RECHERCHES	67
7	CONCLUSION	70
8	REMERCIEMENTS	72

9	BIBLIOGRAPHIE	73
9.1	LIVRES ET ARTICLES SCIENTIFIQUES	73
9.2	SITES INTERNET	75
10	ANNEXES	76
10.1	STATISTIQUES DES PARTICIPANTS A L'EDITION 2015 DE SIERRE-ZINAL	76
10.2	RESULTATS DES SECONDES GAGNEES PAR BLOC SELON L'INTERVALLE DE TEMPS AU DEPART, EN COMPARAISON A LA SIMULATION DE REFERENCE	76
10.3	RESULTATS DES SECONDES PERDUES A ZINAL PAR BLOC DE DEPART SELON LE « LOST-TIME »	78
10.4	DECLARATION PERSONNELLE	80
10.5	DROITS D'AUTEUR	80

Résumé :

La course à pied en montagne est devenue récemment un sport en expansion dans notre société. Courir dans un décor montagneux de rêve et se dépasser dans un effort physique relevé, telles sont les motivations principales pour pratiquer ce sport.

En 1974, Jean-Claude Pont a créé la course Sierre-Zinal, surnommée « la course des Cinq 4000 ». A ce jour, Sierre-Zinal est un emblème international de la course en montagne et représente un exemple pour les courses qui se développent aujourd'hui.

La course peut actuellement accepter quatre milles inscriptions. Passé ce quota, les participants supplémentaires doivent être refusés à prendre part à la course.

Les chemins montagneux sont par endroits étroits et le parcours ne permet pas toujours des zones de dépassements, c'est pourquoi, malgré avec une limitation du nombre de participants, le trafic n'est pas fluide.

L'étude que nous présentons a pour objectif d'apporter une amélioration de la fluidité du trafic sur la course Sierre-Zinal. L'attention est portée sur l'organisation du départ en bloc de la catégorie « Touriste ». Par le biais d'une simulation de la course, nous verrons qu'un départ échelonné dans le temps permet une meilleure fluidité du trafic. Nous pourrions alors proposer au comité d'organisation plusieurs solutions de fluidification de la course selon l'espacement entre les blocs de départ.

Mots clés : *Sierre-Zinal, course à pied, simulation de foule, fluidité du trafic, départ en blocs*

1 Introduction

De nos jours, le nombre d'adeptes d'activités physiques est en nette augmentation, plus particulièrement presque un quart de la population pratique le jogging ou la course à pied et une augmentation de 5,7% est à relever entre 2008 et 2014 selon une brochure de l'office fédérale du sport [OFS14] (Sport Suisse 2014, Activité et consommation sportives de la population suisse de Lamprecht, Fischer et Stamm). Cet essor est particulièrement remarqué dans les courses de montagnes, discipline nommée trail running [TO15] (traduit comme course à pied sur sentier) ou simplement trail par la plupart de ses adeptes. Cette discipline est récente mais connaît beaucoup de succès. Ainsi pour les troisièmes championnats suisses de Trail Running, qui ont eu lieu samedi 13 juin 2015 dans le Val de Travers à l'occasion du 20^{ème} édition du Trail de l'absinthe, plus de 1000 coureurs se sont inscrits [SW15]. En Suisse, pas moins de quatre-vingt-dix trails sont organisés entre mai et octobre, avec des longueurs et des difficultés variables. Les plus accessibles ont une longueur d'une quinzaine de kilomètres pour environ un petit millier de mètres de dénivelés. Dans ce type de courses, nous pouvons citer Villeret-Chasseral-Villeret qui a augmenté de plus de cents participants le nombre d'inscrits entre 2014 et 2015, pour arriver à 424 coureurs. Or, il en existe des beaucoup plus exigeantes, appelée « ultra-trails », dès quatre-vingt kilomètres de course. Le plus connu est l'Ultra-Trail du Mont-Blanc avec 170 kilomètres et quelque dix milles mètres de dénivellation positive. Cette course rassemble 2'300 coureurs qui doivent patienter jusqu'à trois ans pour être tirés au sort et pouvoir y participer. Selon un article du journal *Le Temps* [LT15] (Servan Peca, 18 septembre 2015), le trail séduit, car il serait « plus fun, plus dur et plus varié que le marathon ». Dans ce même article, Olivier Bessy, sociologue et professeur à l'université de Pau, fait ressortir l'aspect social et non élitiste de la discipline, en notant que l'une des raisons du succès du trail est que « les gens y cherchent leurs propres limites, sans tenir compte de leur temps ou de leur classement. Dans un trail, nous courrons avec, et non pas contre les autres. » Il met également en exergue que le milieu naturel ajoute de l'incertitude et donc de la diversité et de l'attrait par rapport à la course à pied classique.

Cet engouement demande aux organisateurs de trouver des solutions pour accueillir plus de participants à leur course. Il n'est pas toujours aisé de pouvoir augmenter le

nombre de coureurs, surtout lors de courses de montagne où le terrain ne permet pas d'avoir des passages plus larges ou d'autres chemins.

Parmi celles-ci, la course Sierre-Zinal est une course mythique et très populaire, d'années en années elle gagne en popularité. Comme le dit le recordman actuel de l'épreuve Jonathan Wyatt [SZ15] : « Cette course de tradition avec son histoire, comme coureur de montagne tu dois simplement l'avoir vécue ! ». Le nombre croissant de coureurs désirant participer à cette expérience oblige les organisateurs à refuser des inscriptions et ce, depuis plusieurs années. Actuellement, l'organisation accepte 4'000 concurrents répartis dans une catégorie « Touriste » et une « Coureur ». Bien que le nombre de concurrents soit limité, des bouchons se créent le long du parcours et la fluidité de la catégorie « Touriste » dont le départ est donné à cinq heures du matin, quatre heures trente avant celui des « coureurs ». De nombreux partenaires participent à la mise sur pied de cette compétition et il existe un réel intérêt de la part de l'organisation d'accueillir davantage de participants.

Cette thématique de la fluidité de la course Sierre-Zinal a pour privilège de prendre forme en deux travaux de master distincts mais réellement complémentaires. En effet, la problématique commune de la fluidité de la course des Cinq 4'000 vise à proposer au comité d'organisation Sierre-Zinal des solutions pour fluidifier la course et ainsi d'être en mesure d'accueillir davantage de participants à de cette épreuve ou simplement d'offrir une meilleure fluidité.

Pour se faire, le travail de Guillaume Maire traitera de l'estimation du temps de parcours à Sierre-Zinal. Effectivement, depuis l'édition 2014, les organisateurs demandent, par le biais de l'inscription en ligne, une estimation du temps de parcours que le participant envisage d'utiliser. En tenant compte de cet élément, le coureur a été placé dans l'un des quatre blocs de départ selon son temps annoncé. Les participants les plus rapides se sont ainsi placés à l'avant, tandis que les plus lents se sont mis à l'arrière. La question nous vient directement à l'esprit : Comment un coureur populaire peut-il estimer son temps pour une course de montagne, notamment à Sierre-Zinal ? Cette partie du travail tentera d'y répondre.

En admettant qu'un coureur puisse estimer son temps de course de manière fiable suite aux données figurant dans le travail de Guillaume Maire, son résultat pourra être prévu.

Si nous prévoyons le résultat de tous les participants, le résultat final de la course serait alors prédit.

Bien qu'il serait prétentieux d'affirmer connaître le sort d'une course avant même que celle-ci ne soit effectuée, nous avons envisagé, par le biais de cette partie du travail de master, de créer un modèle pour cette course grâce à une simulation de foule. L'objet de cette simulation est de visualiser de manière virtuelle les phénomènes de course qui se passerait à Sierre-Zinal du point de vue du temps de course. Notamment, nous prévoyons de cibler les zones de bouchons pour ensuite adapter la structure en bloc du départ afin de garantir une meilleure fluidité. La simulation de foule unidirectionnelle dépendra évidemment de phénomènes intrinsèques et extrinsèques que nous allons décrire par la suite.

Nous présentons la structure globale de nos travaux sous la forme du schéma suivant :

La problématique centrale vise à trouver une solution pour fluidifier la course Sierre-Zinal. Sur le bas du schéma ci-dessous, nous rencontrons la problématique de la simulation de foule. **Notre objectif est de représenter la course de l'édition 2015 virtuellement. Si notre simulation est conforme à la réalité, nous configurerons des dispositions différentes pour les blocs de départ. Nous observerons alors si un départ en bloc échelonné permettra une meilleure fluidité de course. Dans ce cas, nous déterminerons le temps idéal entre les blocs de départ.**

Ce travail suivra le plan suivant :

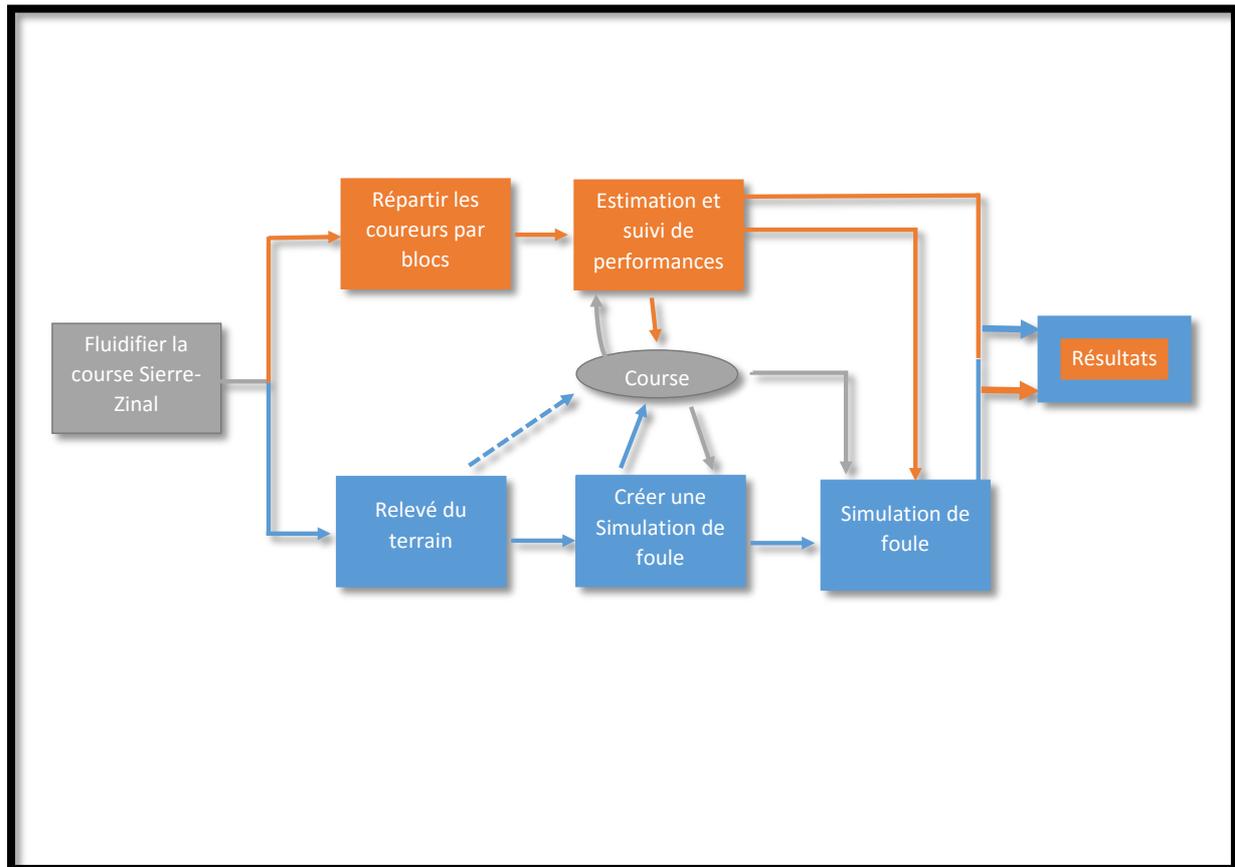


Fig. 1 : Plan des deux travaux de Master (Maire Guillaume et Genoud Valentin)

- Contexte : la description de la course Sierre-Zinal avec son historique, la description du parcours, l'évolution du taux de participation et l'explication du départ en bloc.
- Travaux précédents basés sur la simulation de foule: la base théorique qui décrit la conception et le fonctionnement d'une simulation de foule.
- Méthode : décrivant les étapes de la création de la simulation de foule à Sierre-Zinal avec les paramètres extrinsèques et intrinsèques au modèle, suivi de l'énoncé des hypothèses des différentes conceptions du départ en blocs.
- Résultats : sur la validité du modèle à Sierre-Zinal et sur les hypothèses des départs en blocs. En cas d'un modèle valide, l'objectif est de déterminer si un

intervalle de temps entre les blocs augmenterait la fluidité de la course. Si la fluidité est garantie, le temps idéal entre le départ de chaque bloc devra être déterminé.

- Discussion avec les points forts et les limites du travail.

- Conclusion.

2 Contexte : Sierre-Zinal

2.1 *Historique*

Dans les années soixante-dix, les courses à pied en montagne étaient rares. La seule pulsion qui poussa l'organisateur de Sierre-Zinal, Jean-Claude Pont, à créer une course dans les montagnes Anniviardes était d'offrir « l'opportunité de redécouvrir les vertus de l'effort physique, réapprendre à se servir de la mobilité de son corps, à l'occasion d'une randonnée rude et enthousiaste » dit-il dans son ouvrage « Courir dans une Cathédrale » consacré aux quarante ans de la course [P13]. C'est dans cette idée que l'indémorable catégorie « Touristes » fût créée. Effectivement, ce simple terme en dit long sur la signification de la création de Sierre-Zinal. Cette unique catégorie a été mise en place lors de la course en montagne Sierre-Zinal dans laquelle les participants « auraient pour seul but de retrouver et de vaincre leur corps, aux prises avec un parcours exigeant ».

Les coureurs recevaient un diplôme avec leur temps final mais sans classement pour la catégorie « Touristes ». Telle était la clé de cette philosophie du dépassement de soi, « du cœur avant le chrono ».

Lors de la première édition en 1974, les catégories « Touristes » et « Coureurs » furent créées, l'une partait à six heures du matin et la seconde deux heures plus tard.

Développer la région du Val d'Anniviers au cœur du Valais central était un élément fondamental de la création de la course aussi appelée « des Cinq 4'000 ». Pour cela, la course donna la possibilité aux Touristes « d'effectuer le parcours dans sa totalité de manière à la fois acteurs et spectateurs dans une course où seraient aux prises quelques-uns des meilleurs coureurs du moment ». Avec deux départs par édition, Sierre-Zinal augmenta sa part de visibilité et le Val d'Anniviers se faisait connaître. La particularité de cette course est de pouvoir courir en moyenne montagne à la vue de la « couronne impériale » composé du Weisshorn (4'505m.), du Zinalrothorn (4'221m.), de l'Obergabelhorn (4'063m.), du Cervin (4'478m.) et de la Dent Blanche (4'357m.) dans une ambiance indescriptible.

Pour résumer la situation de Sierre-Zinal à l'époque, Noël Tamini nous le transmet de la plus belle des manières dans « Course aux sommets » de Sport Magazine le 19 novembre

1981 : « Mais ce qui fait aussi le charme de Sierre-Zinal (...) ce sont les heures qui suivent la course. Là, à Zinal, au pied des pics de 4000m, sous la grande tente que l'on édifie chaque année à cet effet, les coureurs ont alors tout le loisir de fraterniser. On les voit aller de table en table (...) échanger leur adresse, accompagné de grands éclats de rire (...). Cette ambiance d'après-course, que l'on chercherait en vain dans l'athlétisme traditionnel, nivelle les valeurs, en redonnant aux champions des dimensions humaines» [P13].

Cette philosophie perdure jusqu'à aujourd'hui et l'engouement ne diminue pas au fil des années. Parmi les nombreux témoignages, en voici un parmi d'autres, publié dans le journal *Le Matin* du 10 février 2010: « L'épreuve de montagne Sierre-Zinal a été élue « plus belle course à pied de Suisse de l'année », selon un sondage réalisé par le « calendrierdescourses.ch » auprès de 2'190 athlètes (...) » [P13].

2.2 Le parcours

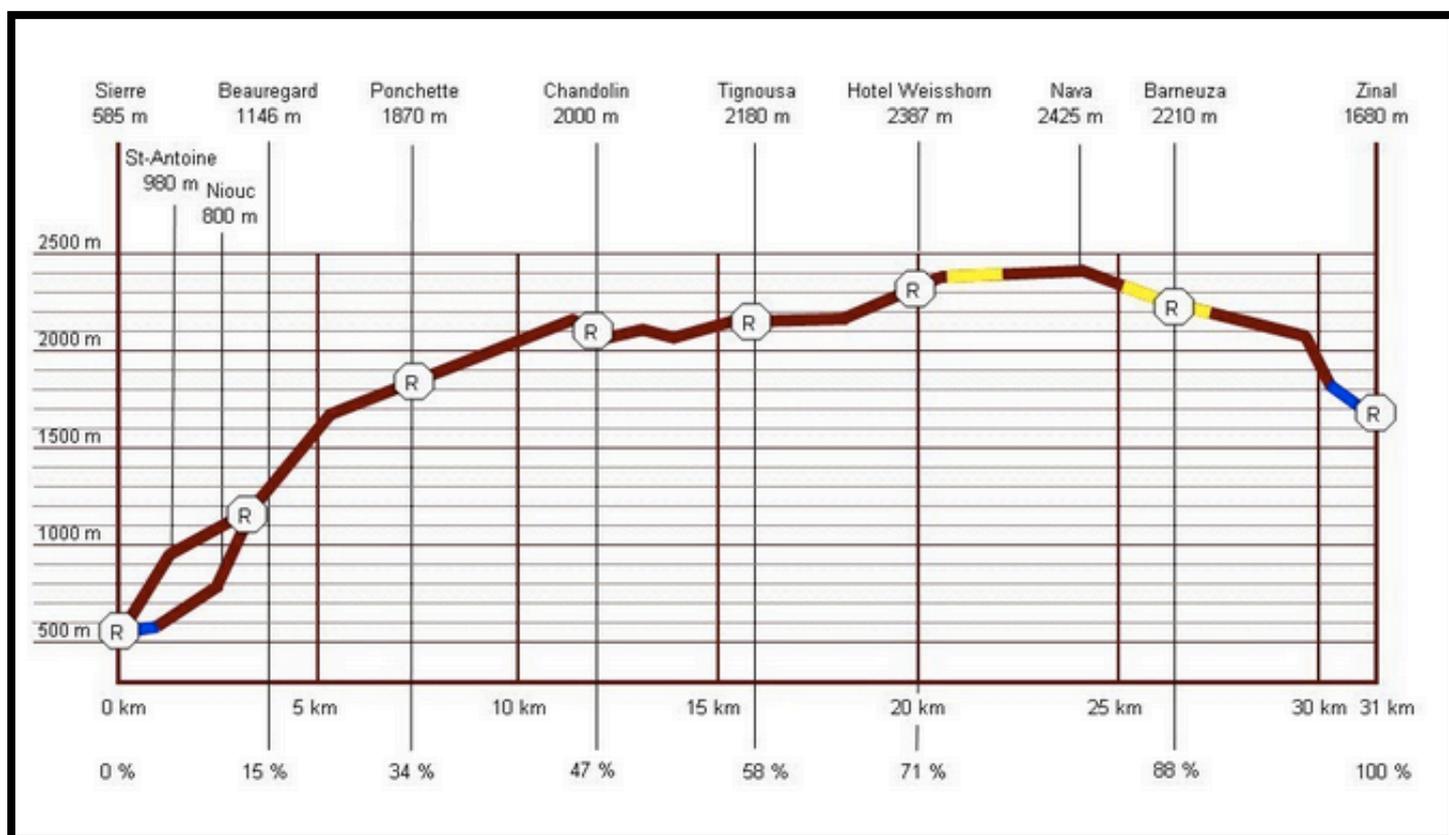
Le parcours du point de vue du coureur se focalisant sur les aspects techniques de la course à travers le regard de Jean-Claude Pont [P13] :

« Dès le départ de Sierre (533m), les coureurs de la catégorie « Touristes » ont la possibilité entre deux itinéraires qui se rejoignent au premier poste de ravitaillement de Beauregard. Soit vous prenez un chemin plus court mais plus étroit mêlant le sentier et la route forestière qui vous fera passer par la chapelle de Saint-Antoine, soit vous continuez sur la route goudronnée sur environ 700 mètres pour emprunter « l'ancien chemin de la Vallée » rejoignant Niouc pour prendre un chemin raide d'environ 25%. Le pourcentage d'une pente topographique représente le rapport entre la différence d'altitudes entre deux points et la distance horizontale entre ces deux points multipliée par cent. Plus le pourcentage est élevé, plus la pente est raide.

Arrivés à Beauregard (1'140m), les deux chemins se rejoignent et débouchent sur un chemin de forêt unique et raide jusqu'à l'altitude de 1'600m. De là, il faut suivre la crête sur un sentier plaisant jusqu'au deuxième poste de ravitaillement appelé Ponchette (environ 1'900m). « Une route forestière, avec deux brèves montées, conduit à

Chandolin (3^{ème} ravitaillement à 2'000m) ». La suite se déroule entre les sentiers de pâturage et de forêt jusqu'au 4^{ème} ravitaillement à Tignousa (2'200m).

Pour la suite, il faut suivre le chemin des planètes jusqu'au ravitaillement de l'hôtel Weisshorn (2'337m) le long d'une large route forestière jusqu'au « Chalet blanc du Toûno » puis d'un sentier plus étroit et plus abrupte. Le cap de l'hôtel Weisshorn franchit, le point culminant de Nava est à quelques centaines de mètres (2425m), à mi-parcours entre l'hôtel et le 6^{ème} poste de ravitaillement à Barneuza (2'210m) sur un sentier caillouteux. Le dernier poste annonce le début d'une descente de cinq cents mètres de dénivelé qui finissent à Zinal (1'670m), l'arrivée du parcours ».



Le parcours mesure 31 kilomètres, avec 2'200 mètres de dénivelé positif pour 800 mètre de dénivelé négatif.

¹ Fig. 2 : Profil de la course Sierre-Zinal

En quarante deux éditions, le parcours de la course de Sierre-Zinal a subi très peu de modifications. Lors de la première édition, tout le monde empruntait le chemin par

¹ Profil de la course Sierre-Zinal <http://sierre-zinal.com/> consulté le 10 janvier 2016

Saint-Antoine. Or, avec mille personnes au total déjà, la fluidité de la course était mauvaise.

C'est pourquoi dès la deuxième édition, les « Touristes » avaient le choix entre le chemin de Saint-Antoine et celui par Niouc. Dès 1975, les coureurs sont obligés de passer par Niouc en 1975 En 1982, un élargissement a été créé dans la deuxième moitié du parcours à proximité de Nava sur « quelques centaines de mètres » [P13]. L'objectif était d'éviter une zone marécageuse et de fluidifier le trafic en élargissant le chemin d'un mètre. A l'époque déjà, la question de fluidité se posait.

Ce n'est qu'à partir de 2012 que la commune d'Anniviers entreprit un élargissement, plus loin en direction de Zinal, sur une distance de 600-700 mètres.

Pour la 40ème édition, « la Bourgeoisie de Sierre a poursuivi l'assainissement de la forêt au-dessus de Beauregard ; ainsi se trouve éliminé le goulet qui, du point de vue de l'encombrement du chemin, était le point noir du tronçon Sierre-Chandolin » [P13].

2.3 Le taux de participation

Lors de la création de la course, la course en montagne n'était guère pratiquée. Pour que Sierre-Zinal attire du monde dès sa conception, Jean-Claude Pont et son équipe misèrent sur la participation de coureurs réputés. « Pour faire mousser, nous avons opté pour trois pôles d'attraction » dit-il lors d'un entretien téléphonique. Ainsi fut fait, en plus des « Fell Runners² » de Grande-Bretagne, le Haut-Valaisan Edi Hauser et le belge Gaston Roelants étaient au départ, ce qui était à peine croyable et qui a sûrement beaucoup fait pour lancer la course. Le témoignage de Philippe Theytaz paru dans « *Courir dans une Cathédral, la course des cinq 4'000 Sierre-Zinal 1974-2013* » [P13] nous éclaire sur l'importance de cette double participation : « Quel duel lors de la première édition de Sierre-Zinal ! D'un côté, un skieur de fond de valeur internationale : le Haut-Valaisan Edi Hauser. De l'autre, un des meilleurs coureurs de la planète, détenteur du record de l'heure et des 20km sur piste, médaillé d'or aux Jeux Olympique : le belge Gaston Roelants. (...) Hauser fait cavalier seul ; il possède plus de sept minutes d'avance sur Roelants, lorsqu'il franchit victorieusement la ligne d'arrivée à Zinal, après 2h38'14 de

² Les « Fell Runners » sont des athlètes qui courent sur collines en Grande-Bretagne. Il existe des associations de Fell Runners. Ils ont réussi de très belle performances à Sierre-Zinal avec, notamment quatre victoires.

course. Arrive ensuite Harry Walker (GB Fell Runner, 2h52'51), qui fut quatre fois parmi les quatre premiers ».

Courir sur un parcours aux côtés d'un champion olympique et donner la possibilité aux Touristes de réaliser un projet « démesuré » pour l'époque, tels étaient les ingrédients de base de Sierre-Zinal.

Le résultat était payant dès le début, car environ mille personnes ont pris le départ. D'années en années, le nombre d'inscrits a augmenté avec une moyenne de deux cents participants de plus par édition.

Actuellement, des inscriptions doivent être refusées deux mois avant le départ, car la limite d'un total de quatre milles coureurs (répartis entre les catégories « Touristes », « Coureurs » et « Juniors ») est atteinte rapidement.

2.4 Le départ en bloc

Dans les courses à pieds en montagne, les coureurs sont généralement amenés à courir sur des sentiers étroits. La largeur des chemins, des routes, des sentiers, des passages caillouteux diversifient le parcours et soumettent les participants à des variations de vitesse qui peuvent être importantes.

En plus des rétrécissements, la pente change constamment et la vitesse du coureur dépendra essentiellement de sa capacité d'adaptation physique. Comme nous le savons, les niveaux de condition physique sont bien différents d'un athlète à l'autre et les changements de rythmes n'ont pas le même effet sur chacun. Avec des pentes variables, qui demandent une adaptation physique de la vitesse, et des zones du parcours qui amènent à des rétrécissements, la course sera sujette à des ralentissements. Des bouchons se créent par endroit avec 4'000 coureurs sur un même parcours.

2.4.1 La nouveauté 2015

Pour l'édition de 2015, le comité d'organisation de la course a décidé de mettre en place un système de départ en blocs pour la catégorie « Touriste » (fig. 3). Lors de l'inscription, chaque « Touriste » devait estimer le temps qu'il allait réaliser. Sur la base de ces

estimations, l'agence de chronométrage « Datasport » a réparti les coureurs au départ dans quatre blocs séparés par une corde.

Les meilleurs temps estimés permettaient aux coureurs avancés de se placer à l'avant du peloton alors que les plus faibles se retrouvaient à l'arrière. L'organisation du peloton devait assurer une meilleure répartition des niveaux dès le départ. Quelques minutes avant le départ, les cordes qui séparaient les blocs ont été retirées pour unifier le peloton et, comme ce fut le cas par le passé, un seul départ était donné. Précisons que le chronomètre du participant ne se déclenche qu'à partir du moment où il franchit le tapis de départ.

Le départ en blocs avait pour objectif de diminuer les zones de bouchons de manière à permettre une course plus fluide sur le parcours. Ce changement au départ se devait de ne pas bouleverser la philosophie qui a perduré pendant 42 ans, impliquant un départ d'ensemble pour tout le monde.

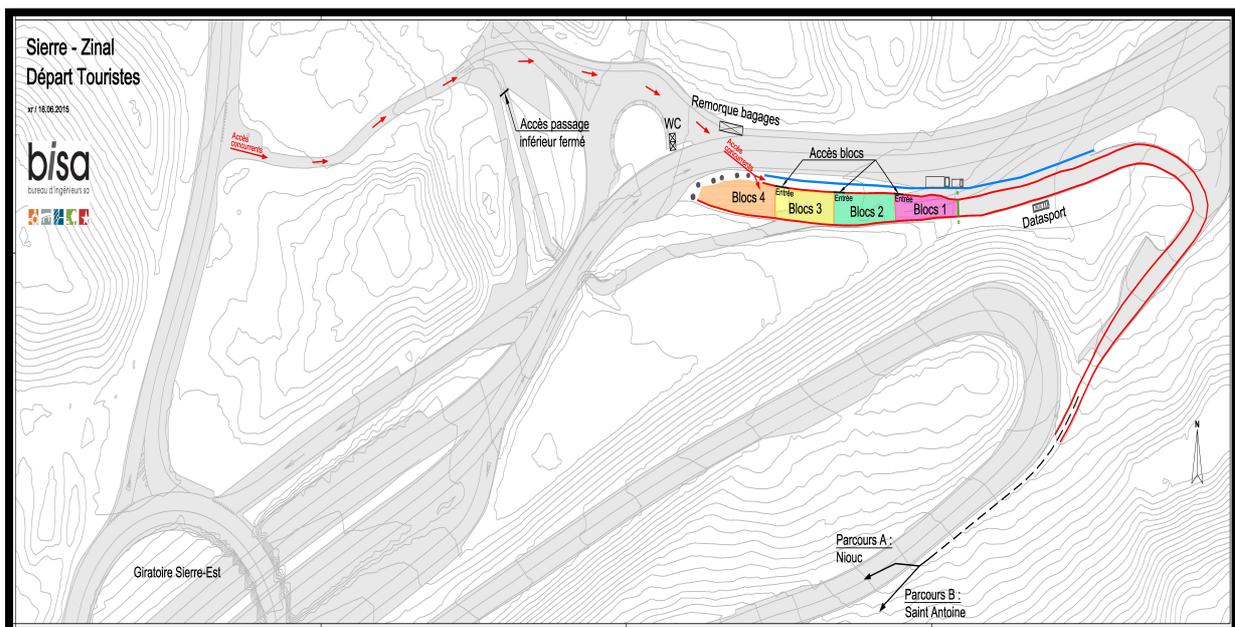


Fig. 3 : plan du départ en bloc pour la catégorie « Touriste » (Source « bureau des ingénieurs SA »)

2.4.2 Le bilan qualitatif des blocs de départ

Selon le procès verbal de la séance de débriefing des responsables de Sierre-Zinal du 15 octobre 2015, « les nouveautés apportées à l'édition 2015 ont été un succès et seront remises au programme pour la prochaine édition ». Mais les avis sont partagés chez les participants. De manière générale, les participants des blocs 1 et 2 ont trouvé le

parcours plus fluide alors que les populaires des blocs 3 et 4 n'ont pas remarqué le changement.

Nous en déduisons que la nouvelle formule n'a pas atteint entièrement son objectif mais que c'est dans ce sens qu'il faut aller.

De toute évidence, l'initiative du départ en bloc a donné plus de sérénité aux participants au moment du départ. Les participants étaient en effet mis en place en fonction de leur numéro de dossard, ce qui a permis un départ plus calme.

2.4.3 Le bilan quantitatif des blocs de départ

Afin de permettre une bonne répartition des coureurs dans les blocs, nous avons bénéficié d'une estimation du temps de parcours fructueuse des populaires. Mais nous devons nous poser la question de savoir si, l'estimation globale des participants était conforme à la réalité.

Pour analyser la différence entre le temps de course estimé et le temps de course réel (données obtenues par datasport), nous avons construit des histogrammes. Sur l'axe des x, les différences de temps sont représentées (temps estimé – temps réel). Une valeur négative nous indique que la personne s'est surestimée, ce qui implique qu'elle a mis plus de temps que prévu tandis qu'une différence positive indique que la personne s'est sous-estimée, autrement dit qu'elle a mis moins de temps qu'elle ne le pensait.

Si nous prenons tous les concurrents, c'est-à-dire tous les participants qui ont indiqué une valeur pour l'estimation du temps de course lors de l'inscription, nous voyons que nous avons affaire à une gaussienne, qui est presque centrée (fig. 4). La moyenne est à -525.1 secondes, ce qui signifie une surestimation générale de **8 minutes et 45 secondes**.

Ce résultat est réjouissant, il signifie qu'en moyenne les participants s'estiment de manière correcte, bien qu'il y ait une légère surestimation. Nous obtenons un écart type de 2473.88 secondes, ce qui correspond à plus de 40 minutes. Donc il est vrai que grand nombre des participants s'estiment bien, mais il subsiste de nombreux temps estimés qui sont loin de la réalité. Le graphique étant de ce fait passablement étiré, il contient des valeurs extrêmes.

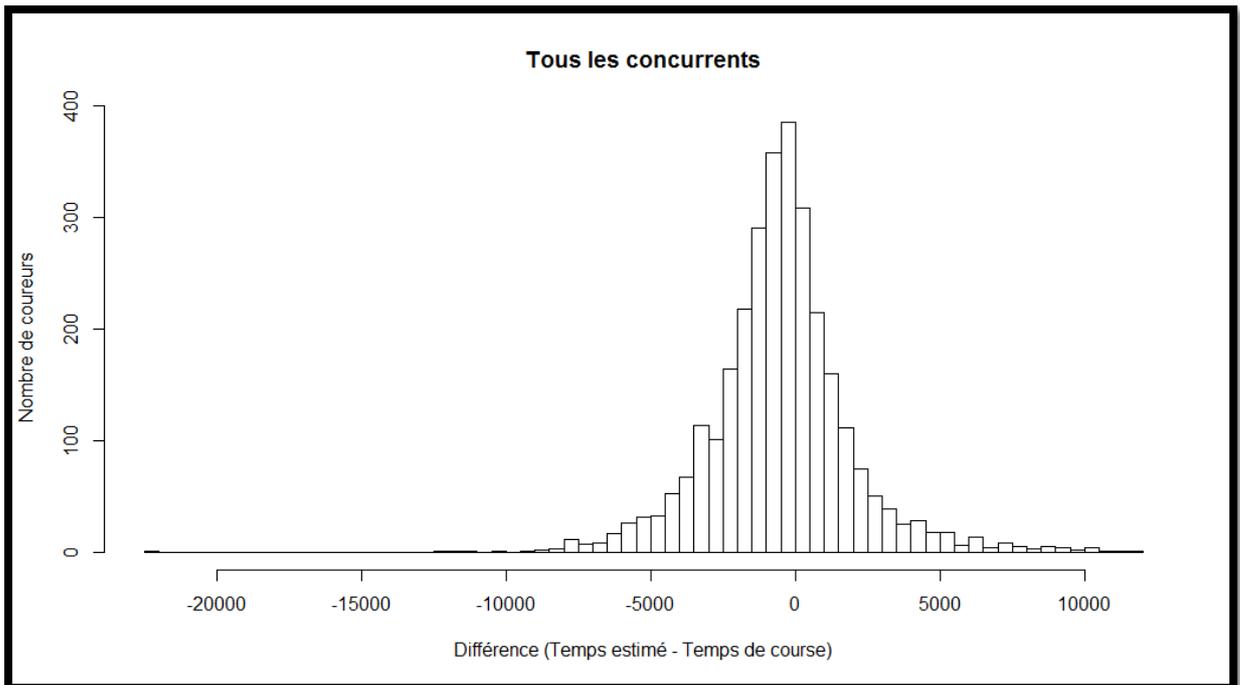


Fig. 4 : Erreur d'estimation de tous les participants à l'édition 2015 de Sierre-Zinal

Il est intéressant de séparer les résultats de l'estimation du temps final de la catégorie « Coureur » (fig. 5) et de la catégorie « Touriste » (fig. 6) afin de voir où se situent les personnes qui s'estiment le mieux et surtout le moins bien.

Il est important de définir les termes qui qualifient les personnes qui courent à Sierre-Zinal.

Définitions :

Un **participant** est une personne qui a pris part à la course Sierre-Zinal. Un **coureur** est une personne qui court dans la catégorie « Coureur » au départ de 09h30. Un **touriste** est une personne qui court dans la catégorie « Touriste » au départ de 05h00, un départ qui concerne les blocs.

Pour la suite de l'analyse, nous allons utiliser les données normalisées afin de pouvoir mieux comparer chaque catégorie entre-elles.

Si nous séparons les « Touristes » des « Coureurs », il n'est pas surprenant de voir que les Touristes se sont plus surestimés et ont une plus grande variabilité que les coureurs, qui sont, pour la plupart, des participants de meilleur niveau donc qui se connaissent d'avantage. Il y a beaucoup plus de valeurs extrêmes chez les Touristes et notamment du côté gauche de la courbe, donc dans les valeurs négatives. Ceci indique qu'il y a de nombreux participants qui se sont surestimés.

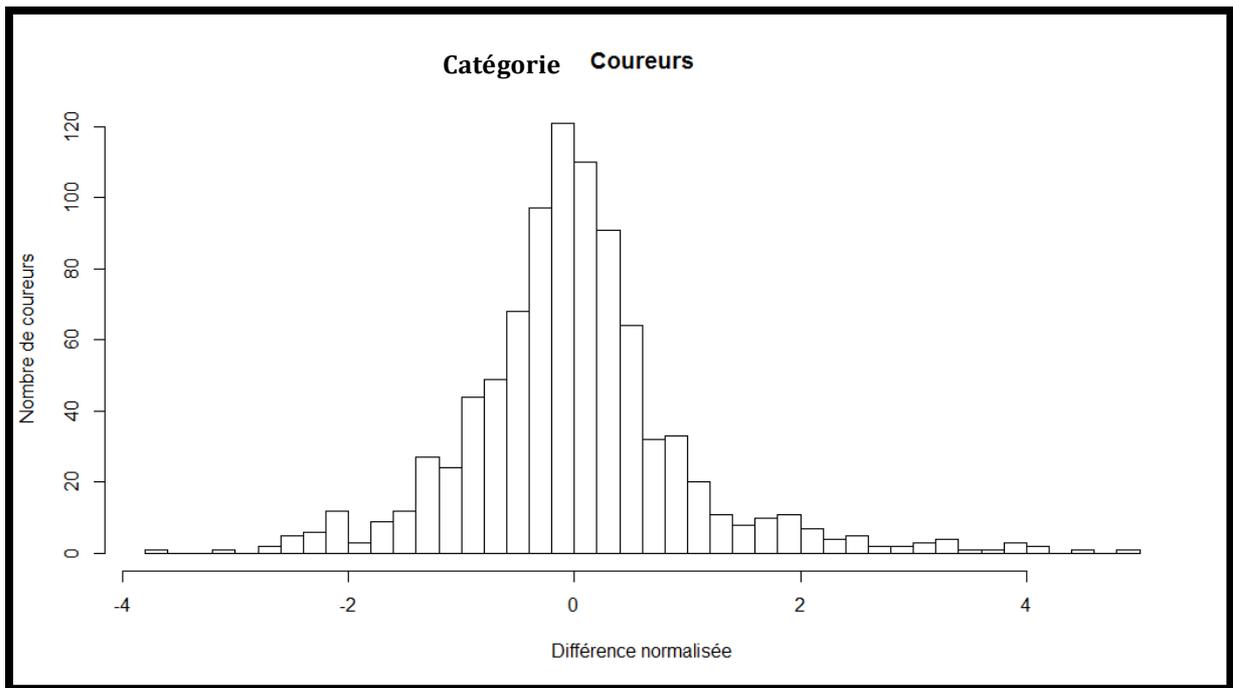


Fig. 5 : Comparaison de la catégorie « Coureurs » entre le temps de course estimé et réalisé

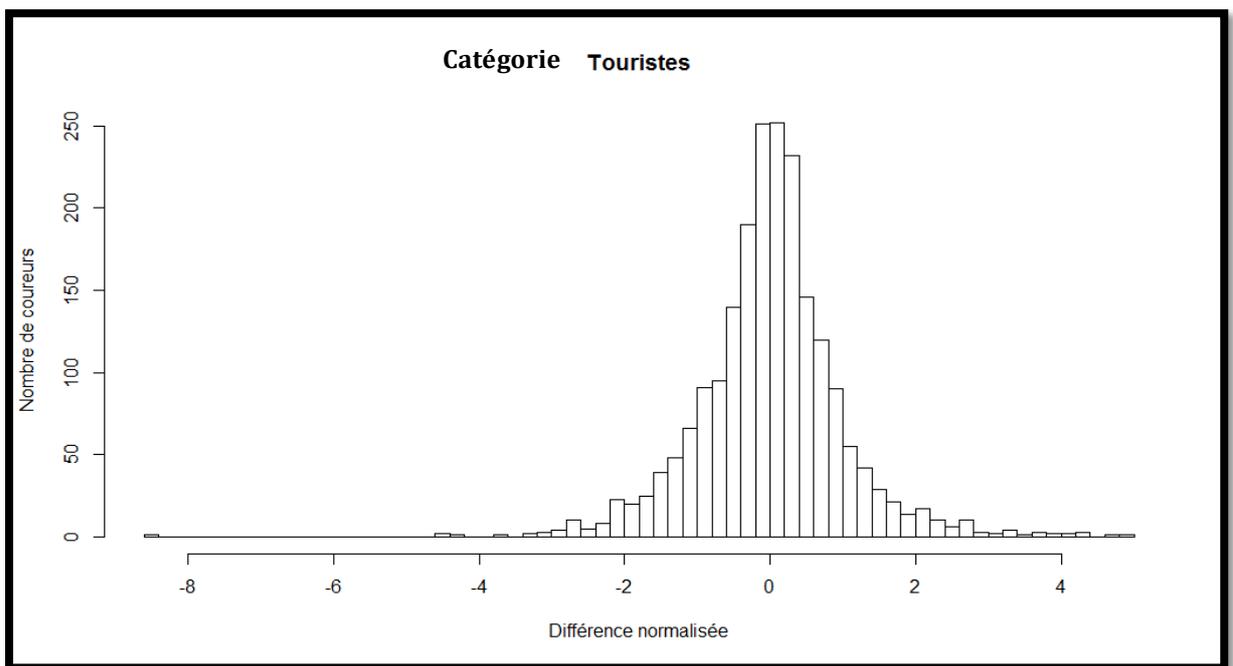


Fig. 6 : Comparaison de la catégorie « Touriste » entre le temps de course estimé et réalisé

C'est pour la catégorie « Touristes » que le départ en bloc a été donné. En observant uniquement le bloc 1 (fig. 7), nous identifions une valeur extrême, elle correspond à un sujet qui a estimé son temps de course à 52 minutes alors qu'il a mis plus de 7 heures pour rallier Zinal. Cette erreur ne doit pas perturber les résultats. Sans ce sujet, il subsiste de nombreux participants qui se sont surestimés. Nous pensons qu'il s'agit de personnes qui souhaitent partir à l'avant et qui, de ce fait, ont « arrangé » le temps prévu.

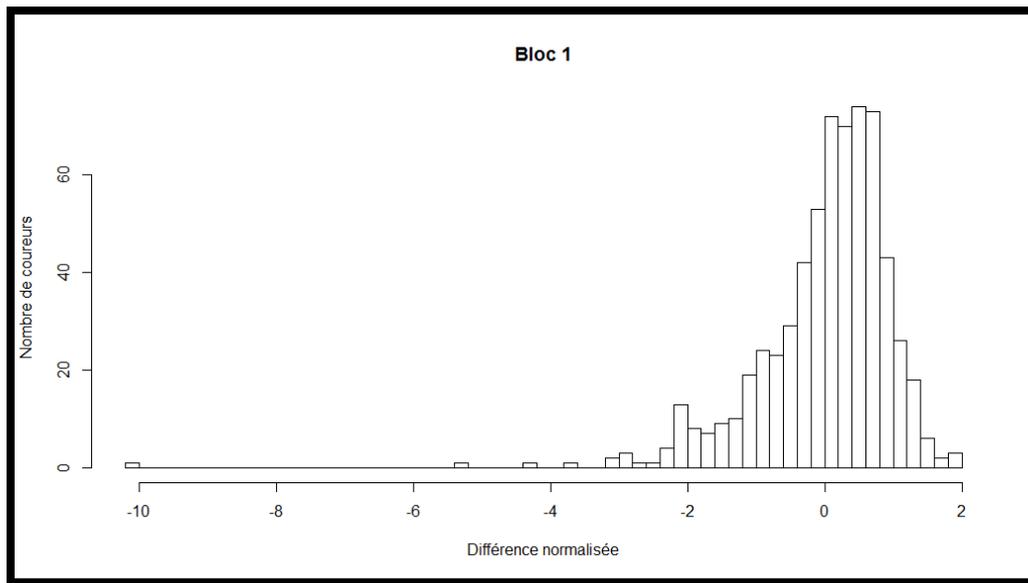


Fig. 7 : Comparaison des participants du bloc 1 de la catégorie « Touriste » entre le temps de course estimé et réalisé

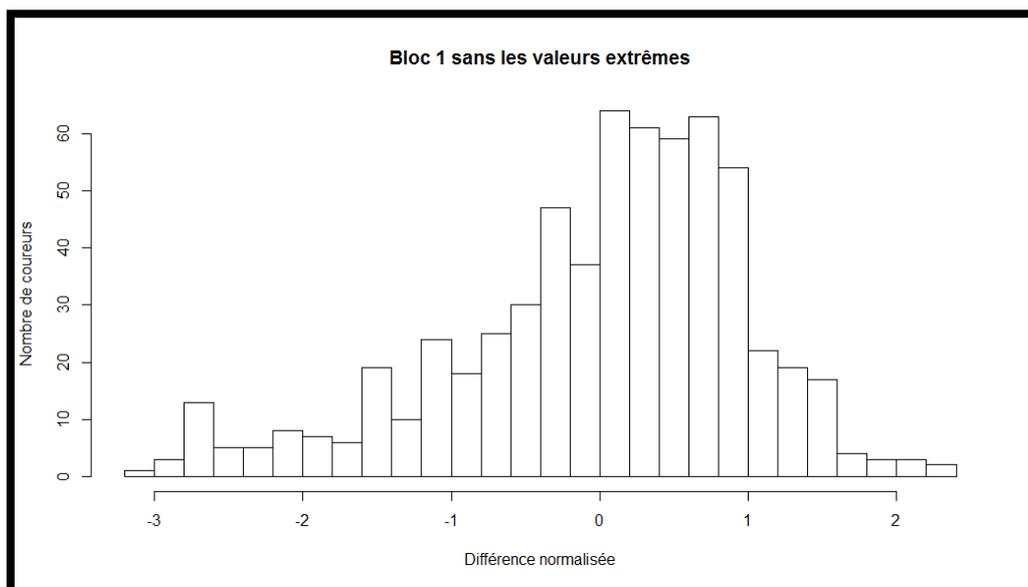


Fig. 8 : Comparaison des participants du bloc 1 de la catégorie « Touriste » entre le temps de course estimé et réalisé. La figure est représentée sans les valeurs extrêmes

Maintenant, en s'intéressant plus précisément aux différents blocs, nous voyons que plus nous nous approchons du bloc 4, plus la variabilité est grande (fig. 9 et 10).

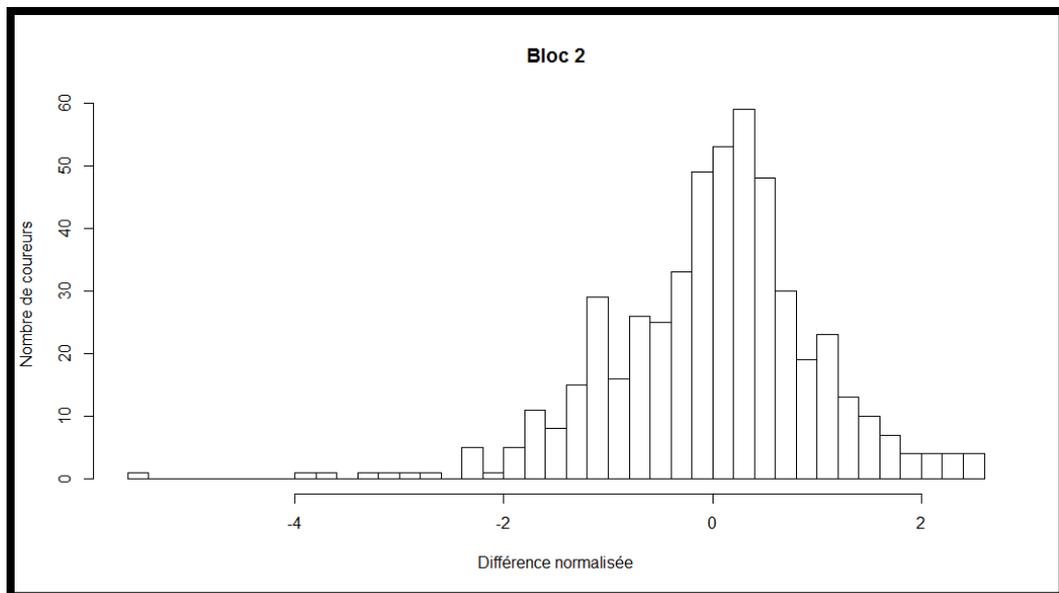


Fig. 9 : Comparaison des participants du bloc 2 de la catégorie « Touriste » entre le temps de course estimé et réalisé

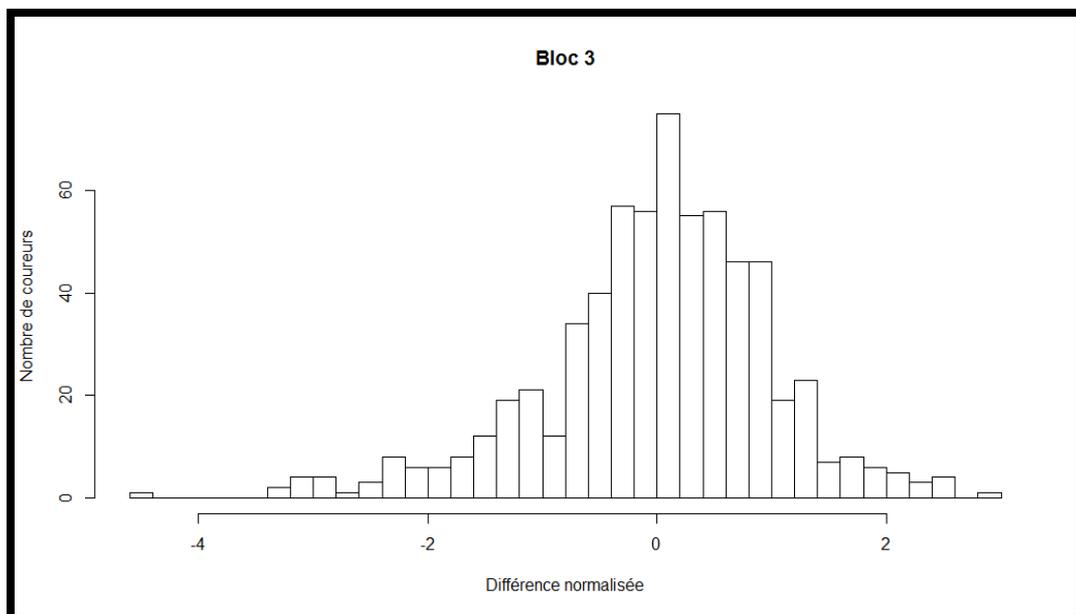


Fig. 10 : Comparaison des participants du bloc 3 de la catégorie « Touriste » entre le temps de course estimé et réalisé

Dans les résultats pour le bloc 4 (fig. 11), nous voyons que la gaussienne avec un écart type élevé, c'est-à-dire qu'elle s'étend vers des valeurs extrêmes, ce qui implique qu'il y a une plus grande variabilité que dans les blocs 2 et 3.

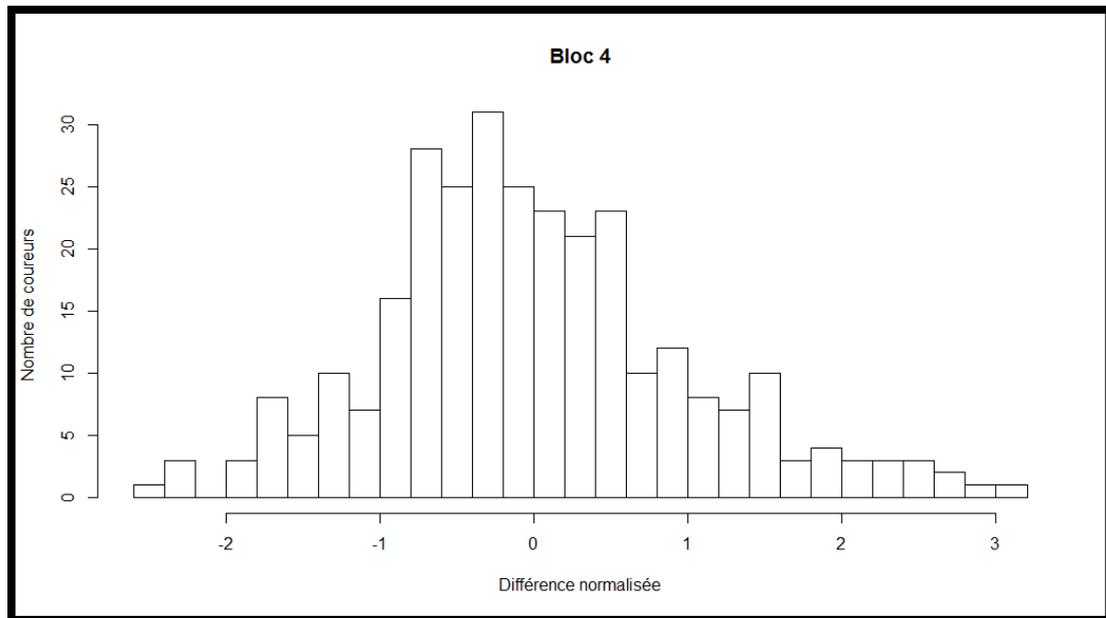


Fig. 11 : Comparaison des participants du bloc 4 de la catégorie « Touriste » entre le temps de course estimé et réalisé

A ce stade du travail, nous ne sommes pas encore en mesure de savoir si ce système des blocs a eu un effet favorable sur la fluidité au départ.

Cette forte dispersion en fonction des blocs de départ peut être liée aux bouchons et vient biaiser les résultats présentés ici. A ce stade du travail, nous pouvons dire que la simulation permettra de donner un aperçu (approximatif) de ce temps perdu pour les blocs en question.

Pour déterminer l'efficacité du départ en quatre blocs à Sierre-Zinal, il nous a fallu procéder à une simulation de la course. La simulation permettra de donner un aperçu approximatif de ce temps perdu pour chaque bloc de départ en question. Le chapitre suivant expliquera les concepts de base d'une simulation de foule.

3 Travaux théoriques précédents basés sur la simulation de foule

3.1 *La foule au quotidien*

Les foules sont omniprésentes dans le monde réel. Elles ont été étudiées de manière extensive dans les sciences sociales, le trafic ingénierie, l'architecture, les plans urbains, la robotique, la protection de personnes, etc. Plusieurs environnements virtuels sont utilisés pour l'entraînement, l'analyse des facteurs humains, les plans d'évacuation et les divertissements. Ils doivent pouvoir être simulés à large échelle avec une simulation de foule à haute fidélité et à des taux interactifs.

« Une simulation de foule réaliste implique plusieurs comportements incluant le comportement de groupe, le modèle cognitif, la synthèse de mouvement et l'interprétation » [GCCD10].

Dans ce travail, nous nous concentrons sur le mouvement de foule de modélisation et sur les dynamiques basées sur une simulation multi-agents dans un espace donné. En effet, l'animation graphique se propose de simuler et d'animer des environnements virtuels peuplés d'humains virtuels appelés « agents ».

Les règles locales, comme le terrain et les forces sociales, comme les différentes pentes, l'effet de bouchon, la condition physique des coureurs gouvernent le mouvement des agents dans l'environnement.

Un des challenges de la simulation de foule est de générer automatiquement le niveau comportemental macroscopique et d'en produire les règles locales.

Typiquement, les modèles complexes proviennent d'interactions entre les agents à l'échelle microscopique et conduisent à un comportement de foule de piétons à l'échelle globale.

Selon Samuel Lemerrier dans sa thèse intitulée « Simulation du comportement de suivi dans une foule de piétons à travers l'expérience, l'analyse et la modélisation » [L12], notre simulation sera:

- « Performante : elle doit réagir immédiatement aux réactions de l'utilisateur ;
- Autonome : les agents sont libres de décision et de mouvement ;
- Réaliste : les trajectoires s'apparentent à la réalité ; » [L12]

3.2 *Le modèle microscopique*

La base du concept microscopique consiste à cibler les interactions entre les individus et leur voisinage pour que leurs comportements en soient adaptés. Au contraire du modèle macroscopique, qui ne s'occupe pas du comportement individuel, le modèle microscopique prend en compte « les informations provenant du voisinage d'un piéton et la réaction de l'individu compte tenu de ces informations » [L12].

3.2.1 *Un modèle à base de règles*

Dans ce modèle, les agents sont traités de manière individuelle, c'est pourquoi chacun d'eux doit suivre des règles comme « l'évitement de collisions, l'asservissement à la vitesse de ses voisins, et la tendance à rester au sein du groupe » [L12]. Reynold impose plusieurs règles décrivant divers comportements humains basiques, comme « l'atteinte d'une cible, l'évitement de collision, la poursuite, la cohésion de groupe ou le suivi de leader » [R87]. Ces comportements élémentaires peuvent être combinés de manière à obtenir des comportements plus complexes.

Comme exemple concret, Kapadia et al. [KSHF09] utilisent une « architecture basée sur les affordances du piéton », donc ses options d'actions dans un environnement donné. La perception de l'environnement de chaque agent est déterminée égocentriquement et selon leur affordance. L'agent choisira l'affordance qui à une valeur élevée. Dans notre cas de la course à pied en montagne, l'affordance la plus élevée du coureur sera l'objectif final de l'arrivée, mais elle sera influencée par ses propres capacités physiques en fonction de divers paramètres (la pente du terrain, la fatigue accumulée, etc.).

Antonini et al. [ABW06] « représentent l'espace en utilisant une discrétisation dynamique basée sur l'agent en tant qu'individu pour avoir une bonne flexibilité, la possibilité de gérer des individus et être compatible avec une simulation basée agent ». Robin et al. [RABC09] ont repris cette approche en différenciant deux types de comportements : « contraint et non contraint ».

Les comportements contraints sont représentés par la notion de « suivi d'un leader ». Nous opterons plutôt pour un comportement non contraint qui a la caractéristique « d'un maintien de direction, l'atteinte d'un objectif ou le fait d'avoir une accélération libre ». L'évitement de collisions sera orienté par un modèle de forces externes.

Le modèle à base de règles permet d'obtenir des résultats relativement réalistes. En effet, le comportement à travers une règle s'exprime explicitement.

3.2.2 Un modèle géométrique

Le modèle géométrique se veut prédictif, car il peut déterminer « une future collision si aucun changement n'est apporté à la trajectoire d'un piéton » [L12]. Grâce à ce modèle, les vitesses futures seront déterminées afin de permettre à un coureur « d'éviter une collision avec les obstacles qui l'entourent » [L12].

Comme Fiorini et Shiller [FS98], nous choisissons un ensemble de vitesses accessibles à l'agent. Il pourra atteindre ces différentes vitesses compte tenu de ses capacités d'accélération. Concrètement, les pré-tests que nous avons effectués avec nos échantillons nous permettront d'évaluer et de catégoriser le niveau de nos coureurs respectifs, pour ainsi prédire la vitesse moyenne du coureur en fonction du degré de la pente sur la durée de la course Sierre-Zinal.

Le modèle appelé aussi « automates cellulaires » est fondé sur une « discrétisation de l'espace en cellules, souvent carrées » [L12]. Bien sûr, chaque agent se place sur une cellule et ne peut pas se déplacer vers une cellule occupée par un autre agent. Il se dirigera vers une cellule libre.

Inspiré par Feurtey [F00], Paris et al. [PPD07], le modèle propose « une approche prédictive basée agent à travers une perspective égocentrique ».

Dans notre étude, nul ne recule donc il n'y a pas de collision frontale. Pour le dépassement, l'agent rapide ne pourra pas passer devant un autre agent plus lent sans qu'un élargissement du parcours ne lui offre une cellule libre.

Le modèle géométrique apporte un niveau élevé de réalisme à l'échelle microscopique. Mais ce modèle ne considère pas l'intention des autres piétons, la prédiction étant principalement linéaire. Par exemple, ce modèle ne tiendra pas compte du statut social de l'agent lorsque celui-ci réduit sa vitesse pour permettre à un agent plus rapide de le dépasser.

3.2.3 Les observations de types naturelles

Grace à différentes études vidéo au sujet de la simulation de foule, Helbing et al. [HMFB01] ont souligné différentes observations qui se répètent sur le comportement de piétons :

« Les piétons sont peu enclins à faire des détours et préfèrent emprunter un chemin court et dense plutôt qu'un chemin plus long mais plus rapide.

Chaque piéton se déplace à une vitesse propre qui correspond à celle qui lui est le plus confortable.

Les piétons gardent une certaine distance à la fois entre eux et avec les différents obstacles. Cette distance diminue lorsque les piétons sont pressés ou lorsque la densité augmente.

La stratégie comportementale développée durant la tâche de marche ne demande pas beaucoup de réflexion mais se réalise de manière plus ou moins automatique.

Ils différencient trois régimes de circulation : le régime laminaire où les piétons circulent de manière relativement fluide, le régime de type « stop-&-go » où apparaissent des embouteillages à forte densité, et le régime turbulent atteint lorsque la pression dépasse un certain seuil et où les piétons sont soumis aux mouvements de la foule. »

3.3 La synthèse du mouvement

Bierlaire et al. [B03] illustrent la manière dont les agents et l'espace peuvent être représentés dans leur environnement. Ils se sont penchés sur le choix de la trajectoire, d'une vitesse ou sur l'évitement d'une collision chez l'agent.

Relatif au principe dit du « moindre effort » (voir le chapitre « perspectives de recherches ») et qui est proche des recherches de Bierlaire et al. [B03], le principe du minimum d'énergie gouverne les comportements de plusieurs systèmes dynamiques. En effet, les techniques qui minimisent la dépense d'énergie ont été utilisées pour l'animation des agents et pour synthétiser les mouvements comme la marche ou la course. Les mouvements humains peuvent être modélisés à partir des mouvements observés dans la réalité. Selon Stephen et al. [GCCD10], il existe une méthode pour déterminer automatiquement les paramètres des passants pédestres pour des données vidéo et pour vérifier les résultats obtenus au moyen d'une simulation avec des dizaines d'agents. Faute de temps, nous n'utiliserons pas la vidéo dans notre étude.

3.4 Le modèle ORCA

Dans cette section nous détaillons plus précisément le modèle ORCA [VGLM11] qui est un modèle microscopique, robuste a des simulations de foules avec nombreux agents.

3.4.1 L'évitement de collision dynamique

Eviter la collision inter-agents est un problème fondamental en simulation de foule et également en robotique. Par exemple, ce problème est défini dans le contexte d'un robot autonome et mobile qui navigue dans un environnement avec des obstacles et d'autres robots aussi en mouvement. Ces robots emploient un cycle continu de détection et d'action. Dans chaque cycle, une action du robot doit être calculée sur la base d'observations locales sur l'environnement, pour que le robot n'entre pas en collision avec les obstacles et les autres individus, tout en progressant vers son but.

Chaque robot prend en compte la vitesse observée des autres robots afin d'éviter la collision. Le robot adapte sa propre vitesse dans cette dynamique d'espace dans laquelle certaines zones sont marquées comme « interdites » du fait de la présence d'autres robots.

Beaucoup d'études ont observé l'évitement de collisions lorsque les obstacles étaient statiques, notamment Van den Berg et al. dans leur article intitulé « Reciprocal n-body Collision Avoidance » [VGLM11]. Si l'obstacle est en mouvement, sa vitesse doit être prise en compte de manière spécifique. Ce problème est généralement appelé « évitement comme astéroïde » et approche typiquement l'extrapolation de la vitesse observée afin d'estimer la future position de l'obstacle.

Plus précisément, Van den Berg et al. [VGLM11] considèrent un paquet de n-robots qui partagent un environnement. Les robots, pour simplifier, sont en forme de disque et se déplacent dans un plan.

Chaque robot A à sa propre position (p_A), sa propre vitesse (v_A) et un rayon (r_A). Ces paramètres peuvent être observés par les autres robots.

De plus, chaque robot a une vitesse max (v_{Amax}) et une vitesse de préférence (v_{Apref}) qui est une vitesse que le robot adopte pour ne pas rencontrer d'autres robots dans son déplacement vers son propre but. Ces paramètres sont propres à chaque robot et ne peuvent pas être observés par les autres robots.

Les deux objectifs sont:

- 1) « La tâche de chaque robot A est de sélectionner indépendamment et simultanément une nouvelle vitesse (v_{Anew}) pour lui-même de tel sorte qu'il n'entre en collision avec aucun autre robot pendant au moins un temps donné, de manière à continuer d'avancer à sa nouvelle vitesse pendant ce temps donné. » [VGLM11];
- 2) « Les robots peuvent choisir leur nouvelle vitesse aussi proche que possible de leur vitesse préférée » « La tâche de chaque robot A est de sélectionner indépendamment et simultanément une nouvelle vitesse (v_{Anew}) pour lui-même

de tel sorte qu'il n'entre en collision avec aucun autre robot pendant au moins un temps donné, de manière à continuer d'avancer à sa nouvelle vitesse pendant ce temps donné » [VGLM11].

Chaque robot A effectue un cycle continu de détection et d'action dans un temps donné. A chaque interaction, il intègre le rayon, la position et la vitesse de préférence des autres robots. A partir de ces informations, il déduit le demi-plan de vitesse permise ORCA « optimal reciprocal collision avoidance » [VGLM11] en ce qui concerne l'autre robot proche de la collision appelé B. Notons que la vitesse maximale du robot est une contrainte pour lui-même. En effet, il ne peut pas aller plus vite que tant. Il va choisir une nouvelle vitesse qui soit la plus proche possible de sa vitesse de préférence, parmi toutes les vitesses permises dans l'espace de travail. Le robot trouve ensuite une nouvelle position et répète le cycle d'évitement.

Un problème, mais mineur, est que le robot A ne connaît pas la vitesse maximale des autres robots. Pour contourner cette difficulté, on s'efforce de deviner la vitesse maximale des autres robots en admettant quel est égal à sa propre vitesse. Le robot admet que la vitesse maximale de l'autre robot est la même que la sienne.

3.4.2 Les obstacles

Nous suivons la une approche pour les obstacles un peu différente. En effet, ces obstacles sont statiques et les agents leur incombent d'éviter la collision avec eux.

Nous pouvons assumer que les obstacles sont modélés comme un ensemble de segments imposés par le concepteur.

Précisément, nous pouvons définir la région de vitesse permise pour A en respectant la limite du parcours appelé O. Donc, il faut définir l'ensemble de vitesses permises pour A en tenant compte de O comme demi-plan « ORCA » dont « la ligne délimitée est la tangente de v_O au point le plus proche de la vitesse optimale sur la frontière de v_O » [VGLM11]. En cas d'obstacles, nous choisissons la vitesse optimale de A égale à 0 pour tous les robots A. Cela garantit qu'il existe toujours une vitesse valide pour le robot qui évite la collision avec l'obstacle dans un temps donné. En d'autres termes, le robot s'arrêtera quand il sera devant l'obstacle et adaptera sa direction. Le robot peut

dépasser l'obstacle, c'est-à-dire sortir légèrement de la zone du parcours s'il doit éviter un autre robot et qu'il n'a pas le choix. Sa vitesse sera ralentie.

3.4.3 Discussion sur le modèle

Pour notre étude, nous nous sommes clairement inspiré de ce modèle. Nous avons d'ailleurs, dans un premier temps, utilisé la librairie fournie par les auteurs. Toutefois, un tel modèle est trop simpliste et ne prend pas en considération d'autres phénomènes particulièrement important dans notre contexte tel que les phénomènes de « stop and go »

3.5 L'effet « stop and go »

Il existe un phénomène macroscopique de vague de vitesse appelé « stop and go » ou encore « circulation en accordéon » [L12]. Ce phénomène peut être observé dans des foules piétonnières unidirectionnelles à densité élevée. En effet, lorsqu'un agent ralentit sur un chemin unidirectionnel sans espace de dépassement, les agents suivants seront ralentis eux aussi et ce ralentissement se propage le long de la « file indienne ». Lorsqu'une zone de dépassement se crée ou que l'agent de devant augmente sa vitesse, l'accélération se propage mais dans le zone inverse. Ce phénomène est primordial dans notre conception de la simulation de foule, car il est très présent lors d'une course dans laquelle les individus sont amenés à adapter constamment leur vitesse en fonction des différentes inclinaisons de la pente souvent étroite.

En s'inspirant des travaux de Moussaïd et al. [MM12], nous avons modélisé l'effet « stop and go » par une fonction prenant en considération l'ensemble des distances avec les agents voisins dans le champ visuel de l'agent concerné.

3.6 La simulation de foule à Sierre-Zinal

Nous optons pour une simulation de foule microscopique basée agent. Son comportement résulte des interactions qu'il aura avec son environnement.

L'effort cognitif de la marche chez l'être humain est faible. Or, même si cette tâche est simple, il est difficile de la traiter de manière rationnelle. La trajectoire de la marche est déterminée à la fois par des éléments externes comme les obstacles naturels et les

autres participants sur le parcours, mais aussi par des facteurs propres comme son âge, son état mental, sa forme physique, ses capacités d'endurance. Dans notre cas, le facteur qui influencera essentiellement la cadence de marche et de course des participants sera son niveau de condition physique pour une course de montagne telle que Sierre-Zinal.

Selon Samuel Lemerrier [L12], « pour simuler le comportement d'un humain dans un environnement virtuel, il est important de comprendre son fonctionnement en situation de marche ». Il est primordial d'adopter une approche expérimentale « à partir des problématiques rencontrées, émettre des hypothèses, élaborer un protocole expérimental pour évaluer leur validité à travers l'analyse des résultats, puis proposer un modèle et l'évaluer par simulation ». Dans notre cas, il est nécessaire de déterminer la vitesse de course ou de marche des coureurs en fonction de la pente du terrain et du niveau sportif des coureurs, de cibler les zones de rétrécissements et les zones de changements de rythmes, de connaître de manière qualitative les zones à risque de bouchons ainsi que le nombre de concurrents durant la course et la structure du départ en blocs.

4 Méthodologie

Cette partie du travail consiste à expliquer les étapes que nous avons suivies pour tenter de répondre à la problématique qui nous a été posée. Elle vise à trouver une solution pour fluidifier le trafic sur le parcours de Sierre-Zinal. Dans cette partie, nous nous interrogeons sur la conception virtuelle de son édition 2015, de manière à pouvoir modifier la structure des blocs de départ. La réponse à la problématique s'efforce de décrire les étapes de la création de la simulation de foule pour Sierre-Zinal, avec les paramètres extrinsèques et intrinsèques au modèle. L'énoncé des hypothèses à la base des différentes conceptions du départ en blocs y sera également traité.

Dans le cas d'une meilleure fluidité de la course avec des départs échelonnés, il serait nécessaire de déterminer quel est l'intervalle de temps idéal pour éviter les bouchons et respecter la philosophie de Sierre-Zinal.

4.1 *Les paramètres extrinsèques à la simulation*

Dans notre cas, le modèle en question est un modèle physique de simulation de foule à Sierre-Zinal, une course à pieds en montagne. Nous allons considérer pour la suite de cette étude comme **modèle** le mécanisme (ou l'application) représentant la simulation de foule. Les **paramètres** déterminent le comportement du modèle, le tout forme un **système**.

Nous considérons que parmi les paramètres certains sont intrinsèques à la simulation (ils sont déterminés par différentes lois physiques et géométriques définies par le modèle) et d'autres sont extrinsèques (ils sont donnés par les observations liées à notre contexte de course en hautes montagnes).

Nous allons révéler dans cette partie, les paramètres extrinsèques dont nous avons besoin pour la mise en œuvre du modèle pour le départ de la course. Les deux éléments primordiaux pour la conception de notre projet sont le parcours virtuel et les agents qui simuleront la course. Pour obtenir ces informations déterminantes, nous allons décrire comment le relevé GPS du parcours s'est effectué et comment nous avons configuré les éléments (taux de participation, nombre de participants par bloc de départ, leur vitesse moyenne en fonctions de la pente) des participants à Sierre-Zinal.

Pour paramétrer le modèle, nous devons également définir le comportement des agents (représentatifs au mieux des participants de la catégorie « Touriste »). Pour cela, nous avons introduit une paramétrisation du modèle via le concept de scénario.

Plus précisément voici les points :

- le parcours ;
- le nombre de participants ;
- la répartition des participants au départ ;
- la vitesse des participants ;

4.1.1 Le parcours

Notre objectif est d'appareiller entre les différentes propriétés du terrain et des contraintes géométriques liées.

Côté observation :

Pour établir ce modèle, nous sommes allés sur le terrain avec un GPS pour relever les coordonnées du parcours.

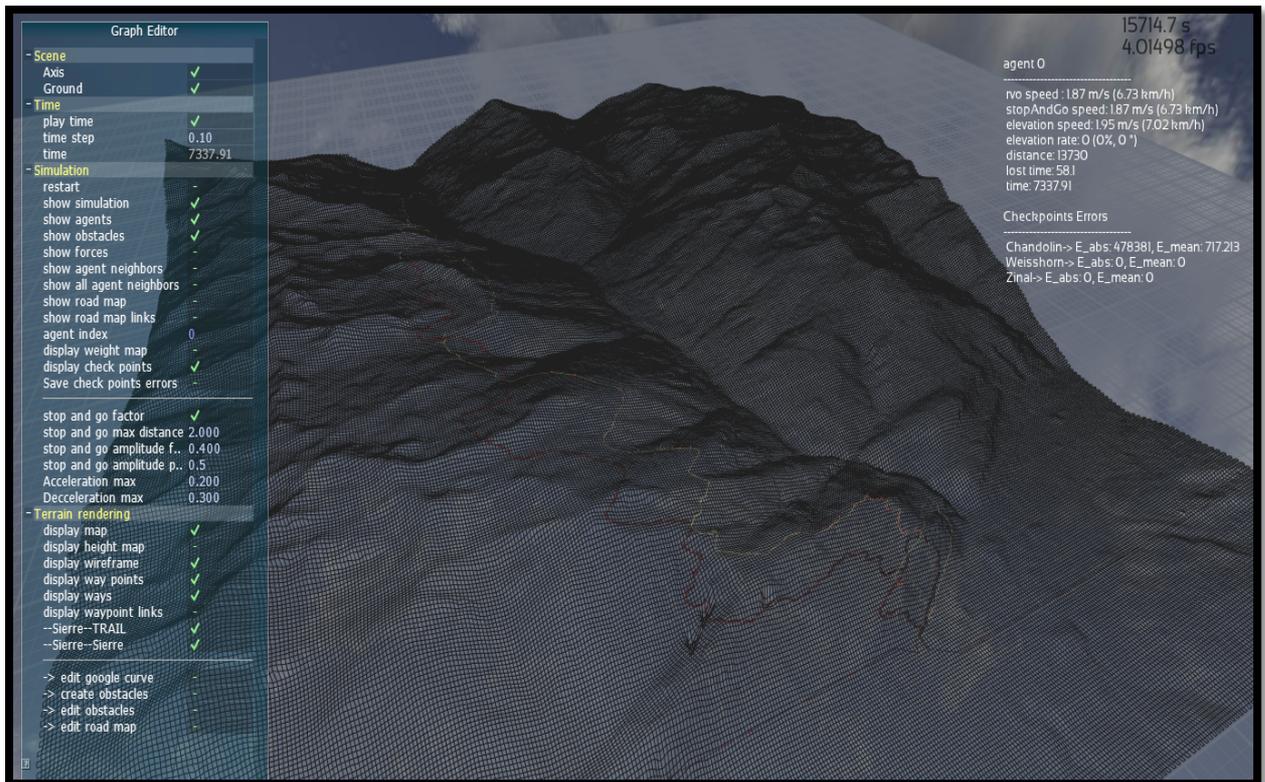
A l'occasion de deux expéditions, nous avons effectué le parcours en entier ; il mène de Sierre à Zinal en passant par Chandolin.

Nous avons bien sûr tenu compte des deux possibilités de parcours offertes aux touristes : soit par la Chapelle Saint-Antoine, soit par Niouc (voir partie « historique Sierre-Zinal»). Le relevé topographique du parcours contient deux types de données.

Le premier nous permet d'obtenir le chemin complet avec une précision en latitude et longitude. Finalement, le parcours peut être défini par une liste de coordonnées à deux dimensions (sauvegardée dans un document « google map »). Ces données sont la base de la conception du modèle de la simulation virtuelle.

Côté simulation :

Le parcours unidirectionnel de la simulation est le seul trajet possible pour nos agents. A l'inverse, tous les éléments spatiaux en dehors du trajet sont considérés comme des obstacles. Le parcours virtuel est une courbe déterminée à partir de la liste de coordonnées en latitude et longitude obtenues précédemment (fig. 12).



³Fig. 12 : La simulation de foule de Sierre-Zinal en trois dimensions

Côté observation :

Le deuxième type de données doit contenir à évaluer la largeur du parcours. De manière subjective, cette largeur était déterminée par l'estimation du nombre de personnes qui pouvaient se déplacer de front. Lorsque la largeur du chemin changeait, il nous suffisait de s'arrêter, d'entrer un « waypoint⁴ » (fig. 13) sur notre GPS et d'y insérer une note de type « 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 » relative au nombre de coureurs qui pouvaient aller de front. Au final, 116 « waypoints » nous ont permis de déterminer les différences de largeurs sur le parcours.

Côté simulation :

La précédente courbe associée aux indications de largeur de terrain permet de créer une surface « parcours ». Finalement, les obstacles sont créés comme étant la surface complémentaire au parcours sur la surface bornée représentative de la carte.

³ Aperçu global de la simulation de foule à Sierre-Zinal

⁴ Un « waypoint » est une localisation relevée et enregistrée par le GPS

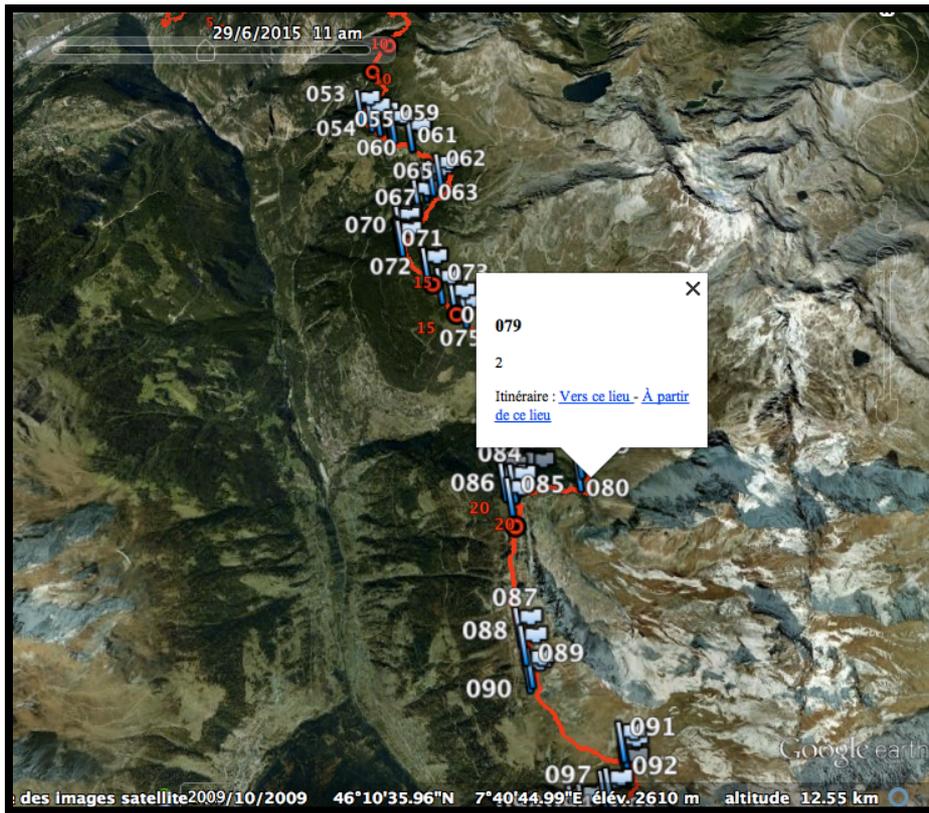


Fig. 13 : Une partie des « waypoints » sur le parcours de Sierre-Zinal

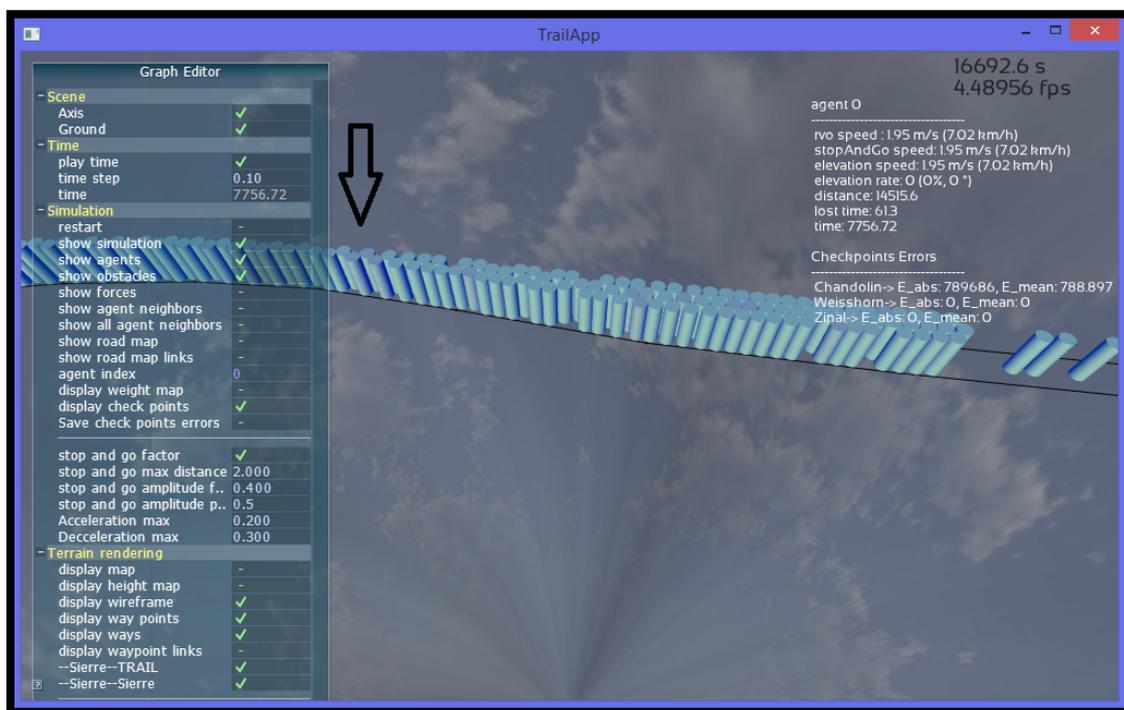


Fig. 14 : Exemple d'un rétrécissement du chemin. Sur cette figure, les agents chandolin de droit à gauche

Résultats attendus :

Le parcours était finalement complété par les fluctuations de la largeur du chemin.

Concrètement, dans la simulation de foule, lorsqu'un rétrécissement se crée, les agents doivent adapter leur vitesse afin de se déplacer en file indienne lors de passage étroit, ou au contraire, lorsque le chemin s'élargit, l'agent plus rapide qui avance derrière un agent plus lent aura l'espace suffisant pour le dépasser (fig. 14).

4.1.2 Les participants

Les Touristes de Sierre-Zinal sont appelés « agents » dans la simulation de foule. Il est primordial que la conception de la course virtuelle respecte le scénario de la course réel.

Pour respecter cette condition, nous nous sommes basés sur l'édition 2015.

Deux points importants en sont ressortis pour paramétrer la course simulée:

- 1) Le nombre de participants et leur répartition au départ.
- 2) La vitesse des participants déterminée par le relief.

Le nombre de participants et leur répartition au départ

Côté observation :

Les éléments de cette partie du travail ont été récoltés grâce à une collaboration étroite avec la maison de chronométrage Datasport. Le responsable de Datasport pour Sierre-Zinal, Etienne Gafner, a assuré parfaitement le transfert des données dont nous avons besoin.

Pour la simulation de Sierre-Zinal sur la thématique de la fluidité, nous nous sommes intéressés uniquement à la catégorie « Touristes » et aux temps qu'ils ont réalisés à Zinal. Cependant, nous n'avons pas tenu compte des abandons, car les données relatives étaient trop faibles.

Pour la 42^{ème} édition de Sierre-Zinal en 2015, selon Datasport, 2'264 « Touristes » ont pris le départ à Sierre et 2'233 sont arrivés à Zinal⁵. Nous avons tenu compte uniquement des participants dont les temps intermédiaires, le temps final ainsi que l'estimation du temps étaient complets⁶. Compte tenu de ces informations, 2'091 participants font partie de la simulation.

⁵ Statistiques des participants 2015 par catégorie selon Datasport dans la partie annexe 1.

⁶ Certains participants n'ont pas estimé leur temps c'est pourquoi leur temps final n'a pas été tenu compte dans la simulation.

Pour les 2'091 participants de cette catégorie, nous disposons du temps de passage à Chandolin (près de la moitié du parcours), à l'Hôtel Weisshorn (les trois quarts du parcours) pour chacun d'eux.

Ces trois temps de passage officiels pour chaque Touristes nous permettent de comparer la simulation et la réalité. Ces temps sont paramétrés dans le système pour que chaque agent corresponde à un Touriste de l'édition 2015 selon leurs temps réellement effectués.

Il est important de rappeler que les Touristes ont été répartis dans quatre blocs au départ, en fonction de leur temps de course estimé.

Selon les données transmises par Datasport, 453 participants se trouvaient dans le bloc 1, 583 participants dans le bloc 2, 545 participants dans le bloc 3 et 510 participants dans le bloc 4.

Nous disposons également de l'ordre d'arrivée de l'édition 2015 en fonction du bloc dans lequel se trouvait le participant. Dans une course imaginaire, on pourrait s'attendre à ce que les 453 premiers arrivés à Zinal soient issu du bloc 1, les 583 suivants du bloc 2 et ainsi de suite. Or, comme nous le savons, le temps estimé des coureurs n'a pas été parfaitement prévu, ce qui implique qu'il y a eu un brassage des blocs durant la course. Il sera primordial de tenir compte de ce phénomène de continuité entre les blocs, car nous savons que les blocs se mélangent sur le parcours. L'ordre du départ ne représente pas l'ordre d'arrivée.

Côté simulation :

Pour le départ, du moment que nous connaissons le nombre de participants par blocs, il n'est pas difficile d'insérer cette fonction dans l'exécuteur de la simulation. Concernant l'arrivée, il est plus difficile de tenir compte de cet élément. Pour paramétrer le modèle, nous avons introduit une paramétrisation du modèle via le concept de scénario (techniquement représenté par un fichier xml). Cela donne lieu à une paramétrisation fine des vitesses des coureurs pour chaque bloc, une fonction de brassage inter-blocs, une position de départ, une position d'arrivée, ainsi que des temps de départs pour les blocs. Plus précisément, voici les points :

La vitesse des participants

Côté observation :

Il est facile d'estimer la vitesse moyenne d'un coureur sur une course. En effet, il suffit de connaître la longueur du parcours, son temps de course et de convertir les données de manière à obtenir des kilomètres par heures ou de mètres par secondes. Or, pour intégrer à la simulation une fonction de vitesse pour les agents d'une simulation de foule, il est indispensable de disposer une équation qui permette de calculer la vitesse moyenne du coureur en fonction de la pente. Rappelons-le, Sierre-Zinal comporte 2'200 mètres de dénivelés positifs pour 800 mètres de dénivelés négatifs, donc la vitesse des coureurs n'est pas constante.

L'échantillon de coureurs utilisé lors des pré-tests physiques que nous retrouvons dans la partie de Guillaume Maire nous a également aidés à la conception d'une courbe de vitesse en fonction de la pente à Sierre-Zinal. Précisément, nous avons placé une montre GPS sur chacun des 25 coureurs que avaient accepté. Les entreprises Garmin et Polar nous ont prêté 21 montres qui venaient s'ajouter à celles des participants qui avaient leur propre montre.

Au final, 18 montres ont permis d'obtenir des données, dont 12 ont été utilisées sur le rapport de la vitesse en fonction de la pente.

Pour paramétrer les équations dans la fonction de la vitesse des agents, nous avons établi quatre groupes de participants relatifs aux quatre blocs de départ.

La moyenne du temps de parcours par bloc :

- Bloc 1 : 04h24'39"
- Bloc 2 : 05h04'54"
- Bloc 3 : 05h38'24"
- Bloc 4 : 06h27'13"

Ce résultat nous paraît hautement significatif quant au bien-fondé des blocs et aussi pour ce qui concerne « l'honnêteté moyenne » des participants.

Nous avons analysé les courbes de vitesse des GPS des participants qui ont réalisé un temps final le plus proche de la moyenne de chaque bloc, c'est-à-dire :

- Participant bloc 1 : 04h28'59" (à + 4'20" de la moyenne du bloc 1)
- Participant bloc 2 : 05h02'30" (à - 2'14" de la moyenne du bloc 2)
- Participant bloc 3 : 05h38'13" (à - 11" de la moyenne du bloc 3)
- Participant bloc 4 : 06h39'30" (à + 11'43" de la moyenne du bloc 4)

Côté simulation :

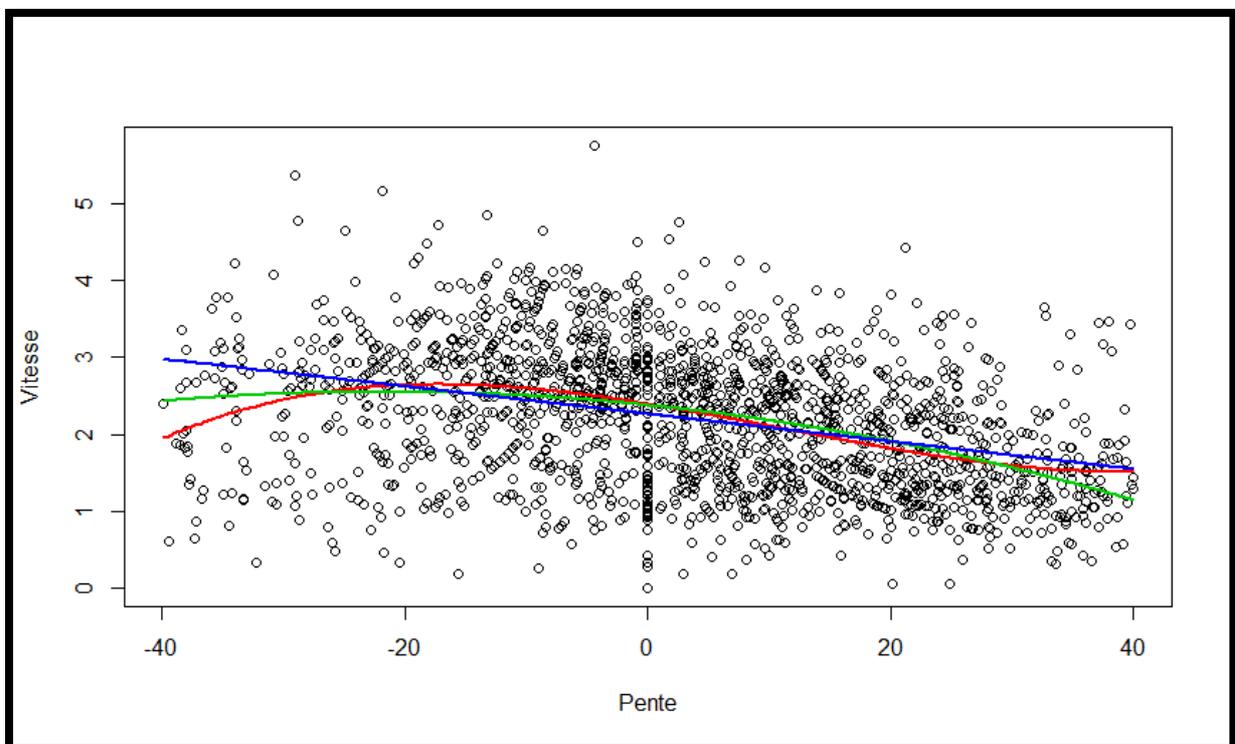
Afin de paramétrer les agents lors de la simulation de foule, nous avons utilisé les données recueillies sur les montres prêtées par Garmin. Nous avons créé des nuages de points de la la vitesse en fonction de la pente en enlevant les valeurs extrêmes, donc les pentes qui étaient plus raides que 40% et celles inférieures à -40%. Nous avons établi des régressions afin de trouver celle qui rendait le mieux compte de la relation entre la vitesse et la pente. Sur la figure 15, la régression linéaire (en bleu), quadratique (en vert) et cubique (en rouge) sont représentées. Nous avons établi des régressions avec des polynômes allant jusqu'au degré cinq. Nous y sommes tout de même très loin, dans les meilleures régressions, car le coefficient (R^2) n'est que de 0.3. La régression polynomiale du degré 3 explique au mieux le nuage de points. Il s'agit également de la courbe qui est la plus cohérente avec la réalité. Rappelons qu'un coureur a une vitesse faible dès que la pente est raide (autant positivement que négativement), que sa vitesse diminue dès qu'il y a une montée, et que pour une faible inclinaison en descente, le participant va aller plus vite qu'au plat. Or, dès que la descente devient trop raide, la vitesse de course va être fortement réduite.

Donc, nous avons effectué cette régression cubique pour tous nos sujets afin d'obtenir plusieurs courbes pour trouver une corrélation entre la vitesse et la pente pour chaque bloc de départ (figure 16). Nous avons identifié quatre courbes différentes en prenant des personnes représentatives des quatre blocs en figure 15. Pour obtenir ces courbes représentatives, nous avons établi des moyennes entre les différents participants qui ont effectué un temps très voisin. Au fil des simulations, il a fallu affiner les courbes, pour qu'elles représentent au mieux la réalité. Il existe des erreurs quantifiables avec les premières régressions (dûes aux bouchons).

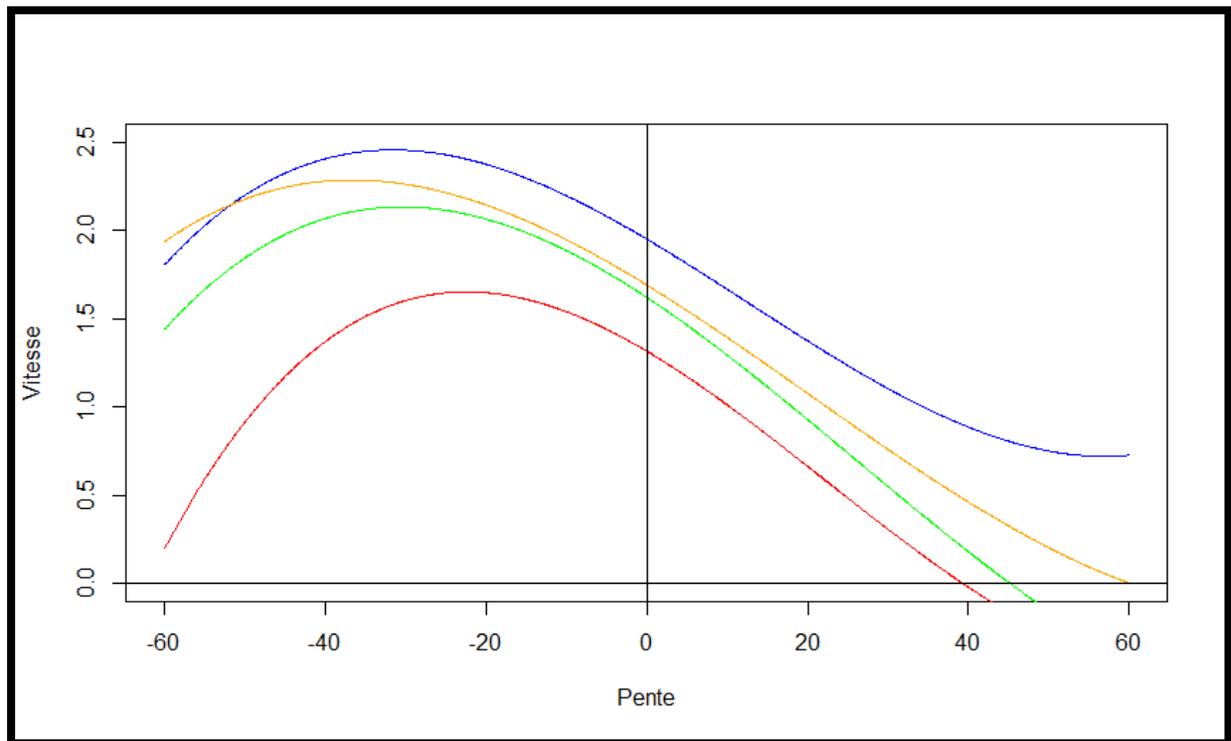
Vu le niveau de précision des données GPS, nous pouvons affirmer que les paramètres sortants des régressions sont imprécis et peuvent être sensiblement améliorés. Par ailleurs, les données incluent les ralentissements, ce qui induit nécessairement un biais. Ces données sont donc des observations qui nous donnent une tendance mais dispose d'une erreur que l'on estime allant de 0 à 15%.

Par ailleurs, nous établissons l'hypothèse que le modèle de simulation est robuste et fiable, de ce fait, nous proposons de faire évoluer les paramètres des régressions pour mettre en adéquation au mieux la différence entre la réalité et la simulation. Ce processus pourrait s'apparenter à « un apprentissage par renforcement ».

Nous avons analysé les différences de temps qu'il y avait entre les agents de la simulation et les coureurs lors de l'édition 2015 de la course. Dès qu'un bloc avait de grandes différences aux points de passages (Chandolin, Weisshorn, Zinal), nous avons apporté des modifications à la courbe qui représentait le bloc. Il a fallu jouer sur les coefficients afin soit rendre les agents plus rapide à la montée, soit à la descente ou encore au plat. La difficulté était de trouver la courbe idéale sans perturber les autres paramètres.



⁷ Fig. 15 : La régression linéaire (en bleu), quadratique (en vert) et cubique (en rouge)



⁸ Fig. 16: Chaque courbe représente un bloc de départ en fonction des données apportées par nos échantillons- La courbe bleue pour le bloc 1, la courbe orange pour le bloc 2, la courbe verte pour le bloc 3 et la courbe rouge pour le bloc 4.

4.2 Les paramètres intrinsèques à la simulation

Concernant les paramètres intrinsèques. Notons que ces éléments vont influencer la simulation de foule de manière interne au modèle. Le phénomène de « stop-and-go » et du phénomène de continuité vont être expliqués dans cette partie.

4.2.1 Le phénomène « stop and go »

Comme sa traduction l'indique, « stop and go » signifie s'arrêter et repartir. C'est à l'échelle macroscopique d'une simulation de foule, c'est-à-dire de l'ordre de la foule et non de l'agent, que nous pouvons observer le phénomène. En effet, lorsqu'un déplacement de foule revêt la forme d'une file indienne, il existe des contraintes qui vont ralentir certains ou accélérer d'autres. Si le participant ralentit et si plusieurs

⁷ Figure 14 établie par Guillaume Maire

⁸ Figure 15 établie par Guillaume Maire

participants le suivent de près sans disposer d'une possibilité de dépassement, le ralentissement se propage comme une vague le long de la file.

Le phénomène se retrouve pour l'accélération. Les ralentissements et les accélérations sont déterminés par le changement de pente du terrain ou par la capacité physique de chaque participant. La vitesse d'un coureur change constamment sur un parcours tel que Sierre-Zinal mais elle ne change pas nécessairement de manière proportionnelle pour tous. Cela implique, dans une situation de file indienne, un effet dit « stop and go ».

Dans l'analyse virtuelle, il est important d'ajouter cette fonction pour les agents.

Nous présentons ici les paramètres intrinsèques au modèle mais nous faisons l'hypothèse pour cette première étude qu'ils sont fiables sur la base des publications mentionnées [MM12] :

4.2.2 La continuité

Lorsque nous paramétrons une vitesse moyenne pour chacun des blocs, nous remarquons que les agents d'un même bloc se déplacent constamment autour de cette vitesse en fonction de la pente. Il existe alors peu d'interactions entre les blocs. Lorsque nous simulons la course, le bloc 1 se détache instantanément des autres blocs et une nette séparation en découle. Or, si nous voulons illustrer la course de manière réaliste, nous devons intégrer le fait que les blocs se mélangent dès le départ. Et il arrive ainsi que certains éléments du bloc 1 se retrouveront avec des participants de blocs plus lents.

Pour modifier les paramètres de notre simulation de foule, nous utilisons un fichier appelé « exécutable ». Dans ce fichier, nous paramétrons la continuité linéaire entre les blocs de manière à établir une continuité entre les blocs.

- Pour le bloc 1, une partie du bloc représente le 50% de la population à 100% des valeurs du bloc 1 (vitesse du bloc 1). L'autre partie du bloc 1 représente le 50% de la population entre les valeurs du bloc 1 et celles du bloc 2 (vitesse du bloc 1 et 2).

- Pour le bloc 2, une partie du bloc représente le 50% de la population entre les valeurs du bloc 1 et celles du bloc 2 (vitesse du bloc 1 et 2). L'autre partie du bloc 2 représente le 50% de la population entre les valeurs du bloc 2 et celles du bloc 3 (vitesse du bloc 2 et 3).
- Pour le bloc 3, une partie du bloc représente le 50% de la population entre les valeurs du bloc 2 et celles du bloc 3 (vitesse du bloc 2 et 3). L'autre partie du bloc 3 représente le 50% de la population entre les valeurs du bloc 3 et celles du bloc 4 (vitesse du bloc 3 et 4).
- Pour le bloc 4, une partie du bloc représente le 50% de la population entre les valeurs du bloc 3 et celles du bloc 4 (vitesse du bloc 3 et 4). L'autre partie du bloc 4 représente le 50% de la population à 100% des valeurs du bloc 4 (vitesse du bloc 4).

Cette paramétrisation est directement liée aux observations que nous avons fait vis-à-vis des données mentionnées précédemment. Une autre manière de faire aurait été de proposer une régression globale g incluant l'ensemble des participants mesurés, puis de répartir les participants vis-à-vis de g avant de les placer dans les blocs.

4.3 Les hypothèses du départ en bloc

Comme décrit en début de la présente étude, la nouveauté du départ en bloc a été testée pour cette 42^e édition de Sierre-Zinal. Rappelons-le, le résultat qualitatif du départ en bloc nous montre, après plusieurs témoignages de participants, un avis partagé. Les participants des blocs 1 et 2 ont trouvé le parcours moins encombré que les autres années alors que les Touristes des blocs 3 et 4 n'ont pas observé de changement. Nous en déduisons que la nouveauté du départ en bloc avec une structure en 4 blocs pour un départ unique n'a pas atteint entièrement son objectif mais que la structure doit mûrir. Nous avons entendu à plusieurs reprises « mais pourquoi vous n'espacez pas les blocs à trente minutes d'intervalles ? » ou encore « faites une dizaine de blocs et espacez les ».

Le départ en peloton (ou du moins au maximum regroupé) fait parti des contraintes imposées par l'organisation. Une attention soutenue est portée vers la recherche d'une meilleure solution.

L'ampleur de la course s'est construite au fil des éditions et plusieurs scénarios ont été proposés. Les possibilités de départs ont été analysées par Jean-Claude Pont pour donner la structure suivante :

Départ de la catégorie « Coureurs » à 09h30, car :

- Arrivée de premiers à Zinal pour l'heure de pointe, c'est-à-dire aux alentours de midi. Les supporters sont présents en masse pour cette arrivée mythique qui confronte les meilleurs coureurs de montagne au monde.
- Départ de jour et conditions météorologiques optimales.
- Permet aux « Coureurs » plus lents d'arriver en fin d'après-midi.
- Si le départ était donné plus tôt, ils devraient dépasser nettement plus de « Touristes ».
- Si le départ été donné plus tard, le mélange dosé entre les deux catégories sur le parcours n'existerait plus et la course perdrait de sa spécificité.

Départ de la catégorie « Touristes » à 05h00, car :

- Pour permettre un équilibre durant le brassage qui a lieu entre les deux catégories : En effet, les premiers « Coureurs » dépassent une partie des « Touristes ». Ce mélange permet une mixité sur le parcours entre les athlètes de haut niveau et les coureurs populaires. Du point de vue de l'élite, le taux d'encouragement sera augmenté sur le parcours sans devoir dépasser sans arrêt. Selon le populaire, pouvoir se confronter directement à l'élite et avoir le plaisir de l'encourager sur le parcours donne une satisfaction générale supplémentaire. Les dépassements sont pénibles pour les Touristes (encore plus que pour les Coureurs), c'est pourquoi il est important d'espacer considérablement les deux départs.
- Les derniers de cette catégorie n'arrivent pas trop tard à Zinal et peuvent encore participer à la fête.

- Si le départ était donné plus tôt, ils courraient longtemps dans la nuit et les premiers arriveraient avant 08h00 à Zinal. De plus, les postes de ravitaillement devraient être mis en place beaucoup plus tôt. Avancer le départ démotiverait les bénévoles volontaires. Une autre raison pour éviter un départ plus tôt est parce que certains participants viennent de loin. Si le départ était donné plus tard, cette catégorie partirait trop proche de la catégorie « Coureurs » et le taux de dépassements entre les coureurs et les touristes serait augmenté. Il faudrait alors repousser le départ des coureurs en conséquence ;

Comme nous avons pu le voir, les horaires des départs sont régis par plusieurs contraintes. Il est important d'en tenir compte pour envisager une structure en bloc différente.

Selon le directeur de la course des cinq 4'000 Vincent Theytaz, il est envisageable, pour le respect de la tradition et des éléments logistiques déjà cités, de créer cinq blocs de départ au maximum avec un départ différé de deux minutes au minimum et de dix minutes au plus entre chaque bloc. Le dernier « Touriste » doit avoir pris le départ à 05h30 au plus tard. Par conséquent, le départ des coureurs doit être absolument repoussé pour ne pas augmenter le taux de dépassements entre les deux catégories.

5 Résultats

Dans cette partie, nous démontrerons la validité du modèle de la simulation de foule à Sierre-Zinal. Pour que la simulation puisse être utilisée à des fins d'analyse de départ en bloc, elle doit être fidèle et représentative de la réalité.

Il est important de définir les termes suivants pour la compréhension des résultats :

Le temps final réel est la valeur du terrain de référence, c'est-à-dire les temps de parcours effectués par les participants à Sierre-Zinal lors de l'édition 2015.

La simulation de référence est la simulation de Sierre-Zinal pour la catégorie « Touriste » selon la représentation d'un départ unique de l'édition 2015.

La simulation expérimentale (dit à intervalle de temps entre les blocs) est la simulation de Sierre-Zinal effectuée avec un décalage dans le temps entre les blocs.

Suite à la validation du modèle qui représentera la course Sierre-Zinal, nous déterminerons si un départ en bloc échelonné fluidifiera la course. Si tel est le cas, nous analyserons l'intervalle de temps idéal entre chaque bloc de départ. Pour se faire, nous utiliserons deux méthodes de contrôle.

La première consiste à comparer la simulation de référence avec les résultats des simulations à intervalles de temps pour espérer obtenir un gain de temps à l'arrivée.

La deuxième demande une comparaison des « lost-time » pour chaque simulation à intervalle de temps.

Le « lost-time » est un paramètre qui a été attribué à chaque agent de manière à pouvoir déterminer le temps qu'il a perdu sur l'ensemble du parcours. Il est calculé de la manière suivante :

$losttime(a) = (tempsSimulation(a) - tempsOptimal(a))$ avec

$a = \text{agent}$,

tempsSimulation = temps calculé par la simulation au point de passage correspondant (Chandolin, Hôtel Weisshorn, Zinal),

tempsOptimal = temps calculé pour l'ensemble de la course jusqu'à l'arrivée à Zinal sans ralentissement dus à l'interférence entre les agents (autrement dit, l'agent est seul sur le parcours) et conformément aux fonctions de vitesse que nous avons déterminées.

Comme nous le savons depuis la première édition de la course Sierre-Zinal, l'existence de bouchons sur le parcours induit des ralentissements, plus ou moins importants, sur le parcours.

Si la logique est respectée et que l'intervalle de temps augmenterait la fluidité de la course, les « lost-time » diminuerait pour chaque agent.

5.1 La validité du modèle

Après plusieurs essais de calibrage, notre processus d'adaptation converge vers une erreur satisfaisante (qu'il faut maintenant valider avec d'autres jeux de données, cf « partie discussion »).

Nous avons défini quatre points de contrôle pour déterminer la validité du modèle :

- La validité du modèle en fonction de l'erreur aux points de chronométrage.
- La représentativité visuelle du phénomène de continuité.
- La fidélité du modèle en cas de répétition d'une même simulation.

1) La validité du modèle en fonction de l'erreur aux points de chronométrage :

Nous disposons de trois points de chronométrage sur le parcours. A Chandolin (à la moitié du parcours), à l'hôtel Weisshorn (au trois quart du parcours) et à Zinal (à l'arrivée de la course).

La simulation calcule automatiquement l'erreur de temps qu'il existe entre chaque coureur dans la réalité et chaque agent de la simulation. En effet, par l'intermédiaire de DataSport, nous bénéficions de ces trois points de chronométrage pour tous les « Touristes » de l'édition 2015.

Cette erreur nous permet de déterminer la correspondance qu'il existe entre la simulation et la réalité en tenant compte du phénomène de continuité indiqué dans le chapitre suivant (tableau 1 en page 46):

Tableau 1 : le temps total de la catégorie « Touriste » avec la comparaison de l'erreur qu'il y a avec la simulation de référence

TOTAL « Touristes »	Chandolin	Hôtel Weissshorn	Zinal
Réalité (s)	9'097s	13'848s	19'659s
Erreur simulation (s)	(-) 625s	232s	1'204s
Erreur simulation (min)	10min	4min	20min
Pourcentage d'erreur (%)	6.87%	1.68%	6.12%
Erreur accumulée (%)	14.67%		

Voici le détail de ces erreurs par bloc lors de cette simulation de référence (tableaux 2, 3, 4 et 5):

Les valeurs négatives signifient que la moyenne des agents relatifs à chaque bloc est trop rapide par rapport à la réalité.

A l'inverse, les valeurs positives représentent un retard des agents en comparaison à la réalité.

Tableau 2 : le temps total du bloc 1 de la catégorie « Touriste » avec la comparaison de l'erreur qu'il y a avec la simulation de référence

BLOC 1	Chandolin	Hôtel Weissshorn	Zinal
Réalité (s)	/	/	15'879s
Erreur simulation (s)	(-) 552s	57s	1'149s
Erreur simulation (min)	(-) 9min	1min	19min

Tableau 3 : le temps total du bloc 2 de la catégorie « Touriste » avec la comparaison de l'erreur qu'il y a avec la simulation de référence

BLOC 2	Chandolin	Hôtel Weissshorn	Zinal
Réalité (s)	/	/	18'294s
Erreur simulation (s)	(-) 591s	(-) 2s	1'117s
Erreur simulation (min)	(-) 10min	(-) 0min	19min

Tableau 4 : le temps total du bloc 3 de la catégorie « Touriste » avec la comparaison de l'erreur qu'il y a avec la simulation de référence

BLOC 3	Chandolin	Hôtel Weisshorn	Zinal
Réalité (s)	/	/	20'304s
Erreur simulation (s)	(-) 542s	211s	1'507s
Erreur simulation (min)	(-) 9min	4min	25min

Tableau 5 : le temps total du bloc 4 de la catégorie « Touriste » avec la comparaison de l'erreur qu'il y a avec la simulation de référence

BLOC 4	Chandolin	Hôtel Weisshorn	Zinal
Réalité (s)	/	/	23'233s
Erreur simulation (s)	(-) 810s	(-) 179s	864s
Erreur simulation (min)	(-) 14min	(-) 3min	14min

2) La représentativité visuelle du phénomène de continuité :

Nos premières simulations n'étaient pas très éloignées de la réalité, mais le décalage nous a semblé encore trop important. Cependant, il n'existait aucune interaction entre les blocs durant la simulation de la course. Il nous a alors paru nécessaire de trouver un moyen permettant de modéliser les interactions entre les différents blocs selon les observations terrain.

Pour illustrer le phénomène de continuité qui apparaît durant une course de montagne telle que Sierr-Zinal, nous avons analysé l'ordre d'arrivée des « Touristes » en fonction de leur bloc respectif lors de l'édition 2015 (observations vérité terrain) :

Au départ, la répartition du nombre de coureur par blocs est le suivant (tableau 6 en page 47):

Tableau 6 : répartition du nombre de « Touristes » par bloc au départ

NUMERO DU BLOC	NOMBRE DE TOURISTES
1	453
2	583
3	545
4	510

A l'arrivée, le temps final moyen par bloc se présente ainsi (tableau 7):

Tableau 7 : temps finaux moyens par bloc avec un pourcentage du nombre de « Touristes » par bloc de départ

BLOC	COUREURS	TEMPS MOYENS	POURCENTAGE
1	453	04h24'39"	21.66%
2	583	05h04'54"	27.88%
3	545	05h38'24"	26.07%
4	510	06h27'13"	24.39%

Si tous les touristes avaient prévu exactement leur temps, les intervalles de temps pour chaque bloc devraient être (tableau 8) :

Tableau 8 : répartition des participants dans l'ordre d'arrivée s'ils étaient arrivés selon leur bloc de départ respectif

BLOC	1 ^{ER} TEMPS	DERNIER TEMPS	RANGS	INTERVALLES
1	De 03h18'29"	A 04h35'36"	De 1 à 453	1
2	De 04h35'51"	A 05h17'21"	De 454 à 1'036	2
3	De 05h17'21"	A 05h59'05"	De 1'037 à 1'581	3
4	De 05h59'26"	A 10h17'28"	De 1'582 à 2'091	4

En réalité, pour l'arrivée nous avons le tableau suivant (tableau 9) :

Tableau 9 : ordre d'arrivée des participants « Touristes » selon la réalité de la course Sierre-Zinal 2015

INTERVALLES	Issus du BLOC 1	Issus du BLOC 2	Issus du BLOC 3	Issus du BLOC 4
1 (453 coureurs)	319	108	17	9
2 (583 coureurs)	103	303	138	39
3 (545 coureurs)	25	137	266	117
4 (510 coureurs)	6	35	124	345

Cette configuration à l'arrivée nous démontre qu'il existe un réel brassage entre les concurrents de chaque bloc durant la course.

Dans les paramètres de la simulation, nous insérons une fonction de continuité comme décrit dans le chapitre précédent. Or, dans notre modèle, nous avons la possibilité d'insérer cette fonction de continuité de type linéaire ou exponentielle.

Nous présentons ci-dessous les comparaisons entre les deux représentations graphiques sachant que:

Exponentielle : $w(i) = e^{-ax^2}$ avec un coefficient donnant +/- d'importance au groupe en question, $x = (i-n/2)/(n/2)$, i le ième agent du bloc et n le nombre d'agent dans le bloc. Finalement, $w(i) \in [0,1]$

Linéaire : $w(i)=i-n/2$

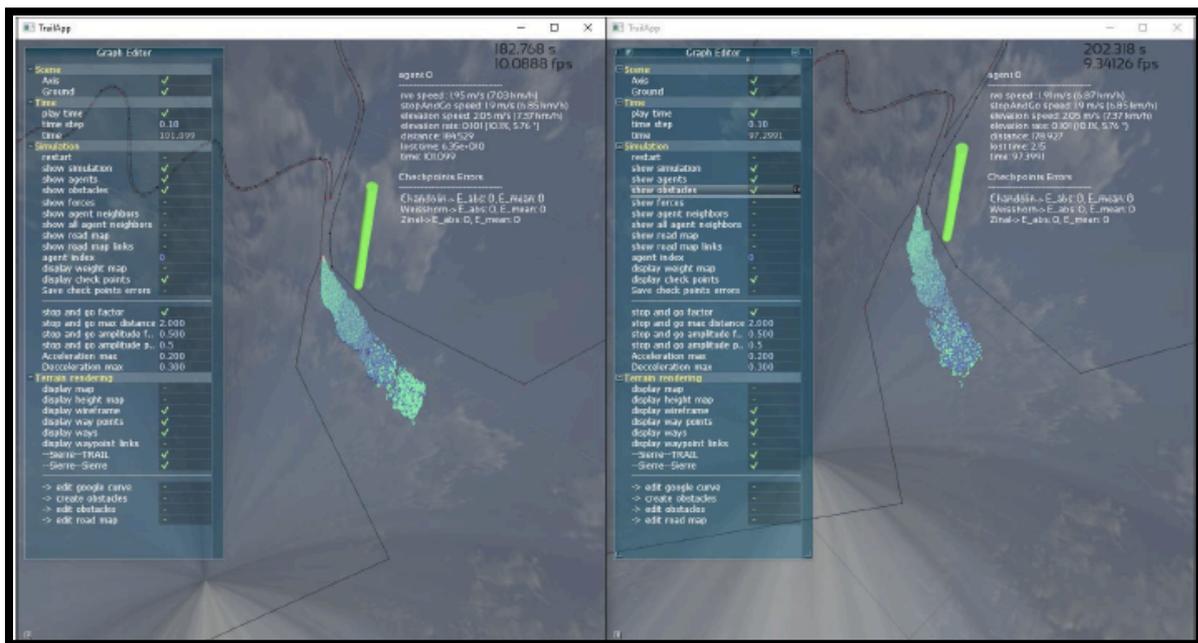


Fig. 17 : Comparaison des blocs de départ, à gauche avec la fonction exponentielle, à droite avec la fonction linéaire

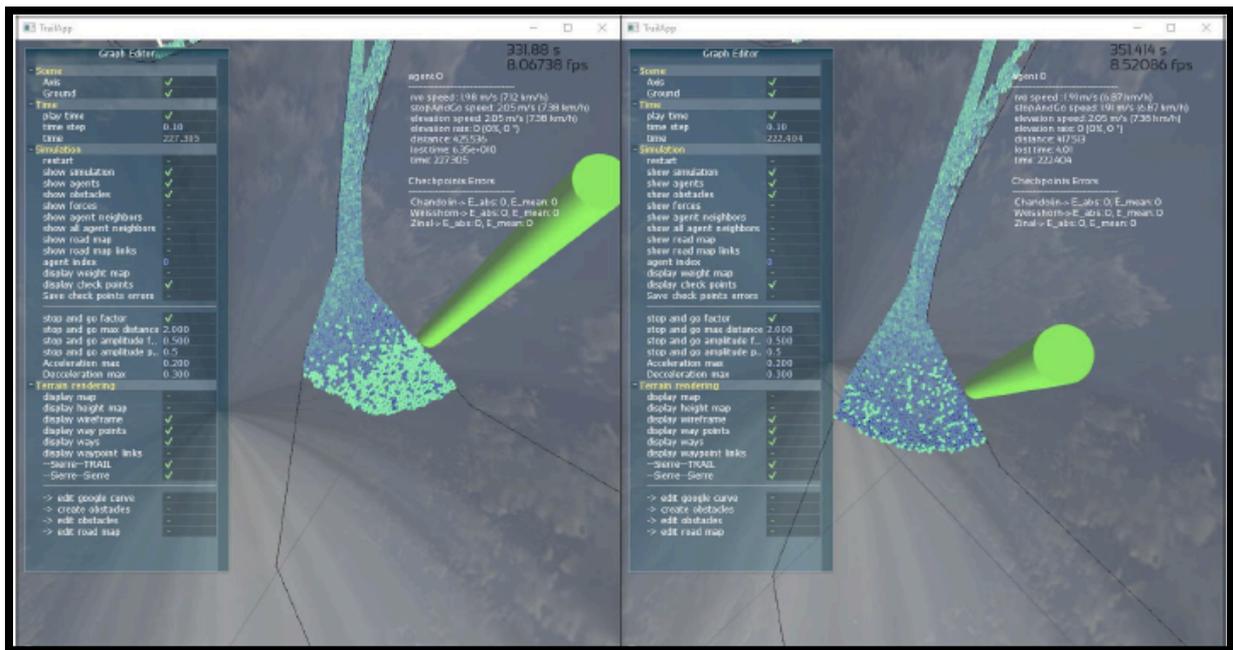


Fig. 18: Résultat visuelle de la comparaison des blocs de départ, à gauche avec la fonction exponentielle, à droite avec la fonction linéaire

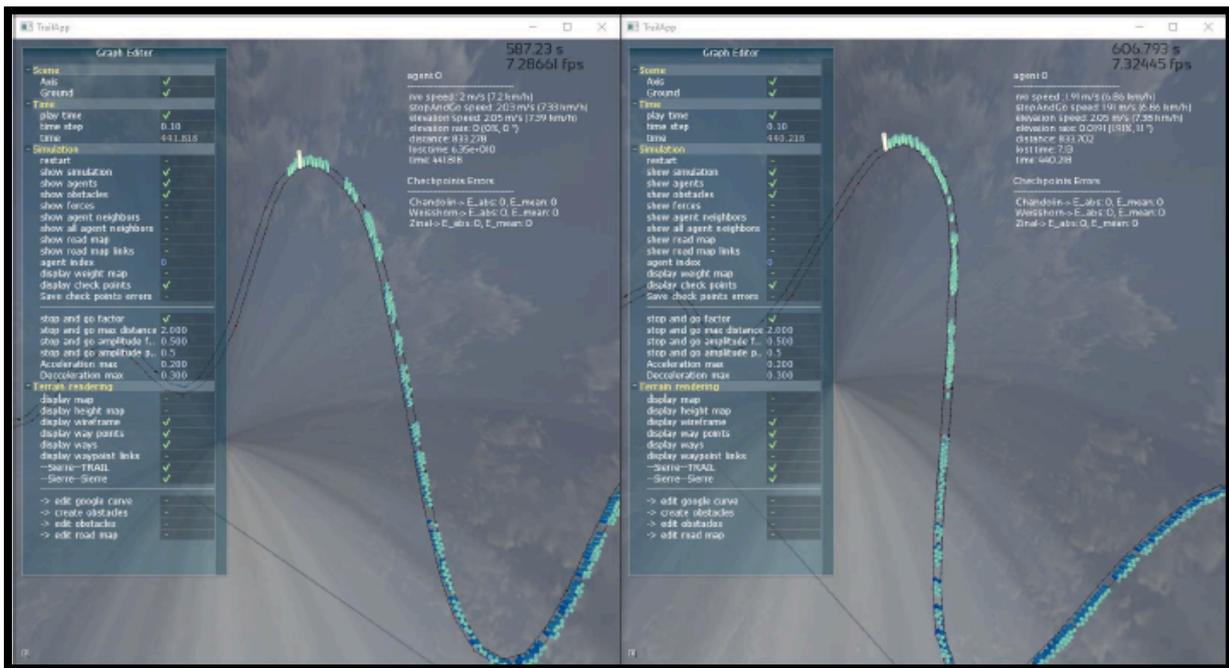


Fig. 19 : Comparaison des blocs de départ, à gauche avec la fonction exponentielle, à droite avec la fonction linéaire

Dans la figure 17, nous observons une meilleure répartition entre les blocs au départ sur la simulation exponentielle. Les différences de couleurs représentent les 4 blocs.

Dans la figure 18, nous pouvons remarquer une répartition trop aléatoire dans la partie linéaire alors que pour la simulation exponentielle le bloc 4 en vert clair apparaît uni comme dans la réalité.

Dans la figure 19, la continuité est mieux prononcée dans la partie exponentielle. Comme nous le montre la figure 20 ci-dessous, la simulation linéaire permet trop d'espace entre les agents durant la course alors qu'en réalité la continuité est marquée durant la course.

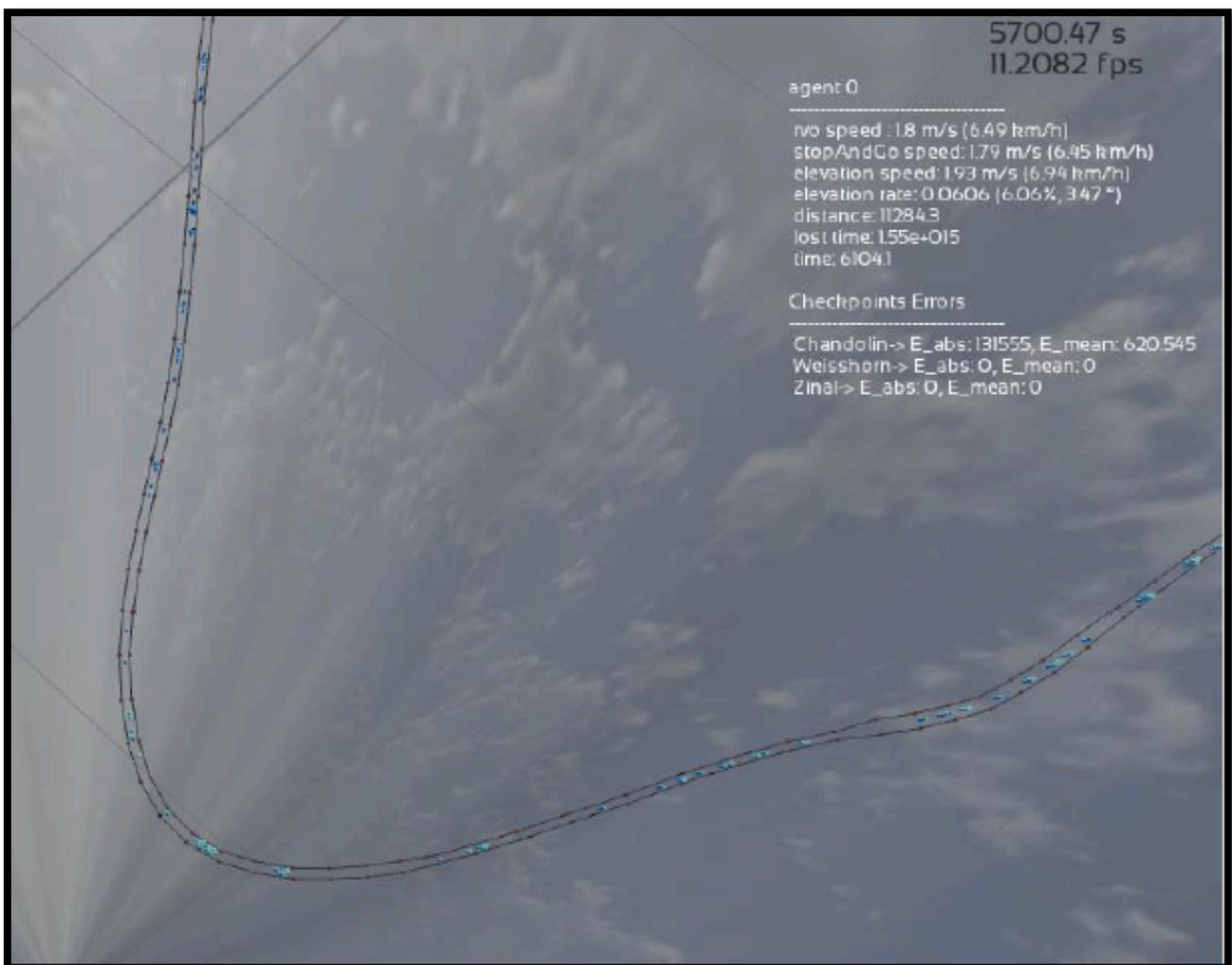


Fig. 20 : Exemple de l'espacement entre les agents dans la simulation linéaire. Il existe un manque de continuité

3) La fidélité du modèle en cas de répétition d'une même simulation :

Nous avons effectué plusieurs fois une simulation avec les mêmes paramètres. Le tableau suivant nous indique la différence en pourcentage d'une simulation à l'autre (tableau 10) :

Tableau 10 : erreur moyenne du temps d'une même simulation lancée à plusieurs reprises

ERREUR SIM REFERENCE	Chandolin	Hôtel Weisshorn	Zinal
Erreur totale (s)	-30	-18	-52
Erreur totale (%)	-0.33	-0.13	-0.26
Erreur bloc 1 (s)	12	21	35
Erreur bloc 1 (%)	/	/	0.22
Erreur bloc 2 (s)	-57	-94	-119
Erreur bloc 2 (%)	/	/	-0.65
Erreur bloc 3 (s)	-42	-62	-107
Erreur bloc 3 (%)	/	/	-0.53
Erreur bloc 4 (s)	-26	-12	-42
Erreur bloc 4 (%)	/	/	-0.18

La différence de temps entre les deux simulations de référence ne dépasse pas le 0.65%. En moyenne, il y a 0.27% d'erreur. 0.65% d'erreur, pour une course qui représente plus de cinq heures en moyenne, représente environ deux minutes, ce qui nous semble négligeable à ce stade de l'étude. La fiabilité du modèle pour une même simulation peut être considérée comme bonne.

5.2 Les départs en blocs échelonnés

Maintenant que la simulation de base représente l'édition 2015 avec une moyenne de 6.12% d'erreur à Zinal, une continuité respectée et une fidélité du modèle, nous pouvons interpréter ce qui aurait pu se passer en modifiant la structure du départ en bloc.

Voici un récapitulatif des données de la simulation de référence (tableau 11) :

Tableau 11 : moyenne en secondes par bloc de départ à chaque point de contrôle de la simulation de référence

SIM REFERENCE	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4
Chandolin	6533	7711	8763	9701
Hôtel Weisshorn	10913	12643	14333	15798
Zinal	16485	18989	21475	23564

L'objectif de cette partie est de prouver que lors de départs en bloc échelonnés les participants rencontreraient moins de zones d'attentes qu'avec un départ unique.

De plus, nous envisageons de déterminer quel est l'intervalle de temps idéal entre les blocs de départ.

Un temps idéal entre les blocs de départ doit se situer entre deux et huit minutes, du point de vue de la logistique de la course. Si nous avons simulé jusqu'à dix minutes d'intervalle, c'est pour évaluer la tendance qu'il pourrait exister au delà de huit minutes.

Nous avons défini deux méthodes pour analyser les hypothèses de départ.

La première méthode indique que, si les agents d'une simulation paramétrée avec des départs échelonnés éviteraient les bouchons, le temps moyen final des participants serait diminué.

La deuxième méthode cherche à comparer la moyenne des « lost-time » entre les simulations et celle de référence. Plus les « lost-time » sont faibles, plus la course est fluide.

Nous analysons la simulation de la course selon les deux méthodes définies plus haut, de manière à illustrer des départs en quatre blocs échelonnés entre deux et dix minutes entre chaque bloc. Nous testons alors les intervalles de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 10 minutes.

5.2.1 Première méthode : la variation du temps final mis par les agents avec des départs échelonnés

Dans un premier temps, nous avons lancé la simulation de référence. Les données par blocs à Zinal ont été reportées de manière à ce que nous puissions disposer d'une comparaison directe avec la simulation des résultats dits « de référence ».

Ensuite, nous avons effectué une simulation pour chaque choix d'intervalle entre les blocs (soit neuf simulations).

Les données pour les simulations allant de deux minutes à dix minutes nous les avons reportées de manière à obtenir une comparaison directe avec la simulation de référence.

La valeur qui nous intéresse est la différence de temps entre le temps final d'une simulation avec un intervalle de temps au départ et celui de la simulation de référence.

En analysant la différence de temps pour chaque bloc dans les simulations avec des départs échelonnés allant de deux minutes à dix minutes, en comparaison avec la simulation de référence, nous obtenons les résultats suivants (fig. 21):

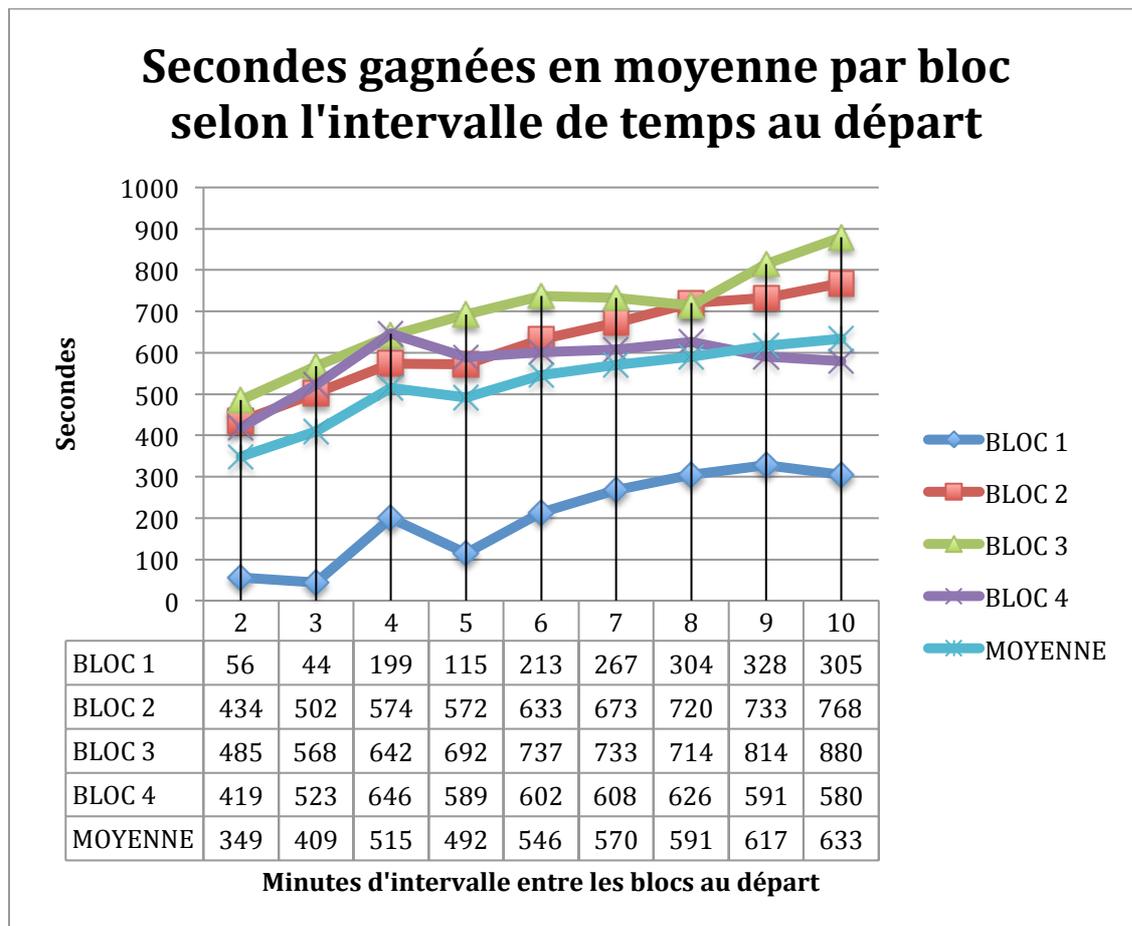


Fig. 21 : graphique du temps gagné en moyenne par bloc selon l'intervalle de temps au départ. Le gain de temps en seconde est comparé au temps final de la simulation de référence

L'analyse de ce graphique révèle un gain de temps par rapport à la simulation de référence.

Afin de faire mieux comprendre ces résultats, nous analysons la tendance de chaque bloc :

Bloc 1

Minutes d'intervalle avec le temps gagné le plus élevé : 9

Minutes d'intervalle qui montrent le plus grand gain de temps d'un intervalle à l'autre: 4

Minutes d'intervalle qui montrent une diminution du temps gagné : 3, 5 et 10

Le temps gagné du bloc 1 est faible. Dans toutes les hypothèses d'un départ en bloc, qu'elles soient échelonnées ou non, c'est le bloc 1 qui partira le premier. Nous pouvons nous demander pourquoi ce bloc gagne-t-il tout de même du temps.

La réponse est la suivante : une partie des participants qui se trouvent dans le bloc 1 n'appartient pas à ce bloc. Dans la simulation de référence comme dans la simulation avec un intervalle de temps, certains courent à une allure qui relève plutôt d'un autre bloc. La nature de la course veut que ces participants soient mêlés à d'autres. Ils se font en effet dépasser par les plus rapides du bloc suivant. Avec un intervalle de temps, le bloc 1 gagne du temps mais ce temps gagné n'est pas déterminant pour la course.

Avec un espace marqué entre les blocs, les participants du bloc 1 se font moins rattraper par les poursuivants. Moins il y a d'interaction entre les blocs, moins il y aura de bouchons.

Bloc 2

Minutes d'intervalle avec le temps gagné le plus élevé : 10

Minutes d'intervalle qui montrent le plus grand gain de temps d'un intervalle à l'autre: 4

Minutes d'intervalle qui montrent une diminution du temps gagné : 5

Avec le bloc 2, nous observons une nette augmentation du gain de temps final à deux minutes d'intervalles (434 secondes gagnées sur la simulation de référence alors que le bloc 1 ne dépasse pas le gain de 328 secondes). L'augmentation du gain de temps final est perdue jusqu'à quatre minutes d'intervalles, puis ce gain de temps diminue à cinq minutes. Le gain de temps recommence entre six et dix minutes.

Bloc 3

Minutes d'intervalle avec le temps gagné le plus élevé : 10

Minutes d'intervalle qui montrent le plus grand gain de temps d'un intervalle à l'autre: 9

Minutes d'intervalle qui montrent une diminution du temps gagné : 7 et 8

Le gain de temps augmente constamment (jusqu'à 737 secondes) pour redescendre à sept et huit minutes d'intervalle (714 secondes). Il reprendra son ascension fortement à neuf minutes. Les valeurs du gain de temps final du bloc 3 sont les plus élevées de ce graphique (allant d'un gain de 485 secondes à 880 secondes). Le bloc 3 se retrouve au centre du trafic durant la course. Il est marqué par les plus grandes différences du niveau des participants. De plus, le bloc 3 démarre après que sont partis plus de la moitié du flux des participants. Ainsi, c'est sur ce bloc critique que s'observent la plupart des ralentissements. Pour ce bloc, le gain de temps est considérablement élevé, ce qui démontre une amélioration du temps final dans ce bloc critique.

Bloc 4

Minutes d'intervalle avec le temps gagné le plus élevé : 4

Minutes d'intervalle qui montrent le plus grand gain de temps d'un intervalle à l'autre: 4

Minutes d'intervalle qui montrent une diminution du temps gagné : 5 et 10

Le bloc 4 n'est pas dans le cas du gain de temps le plus élevé, car c'est le dernier bloc à partir. Dans ce bloc nous trouvons une partie des participants les plus lents et qui sont, de ce fait, pratiquement indifférents à ce qui se passe devant. En revanche, les participants rapides de ce bloc profiteront de l'intervalle de temps entre les blocs et leurs temps final sera alors augmenté.

Nous remarquons que le gain de temps final augmente fortement jusqu'à quatre minutes, à son maximum, car les participants rapides de ce bloc sont moins freinés grâce à l'espacement entre les blocs. La course est plus étirée, ce qui réduit l'accumulation des participants dans la zone de rétrécissement.

Moyenne des blocs

Minutes d'intervalle avec le temps gagné le plus élevé : 10

Minutes d'intervalle qui montrent le plus grand gain de temps d'un intervalle à l'autre: 4

Minutes d'intervalle qui montrent une diminution du temps gagné : 5

La moyenne pour les blocs est marquée par une forte augmentation du gain de temps, jusqu'à quatre minutes d'intervalle (allant de 349 secondes à 515 secondes), puis l'augmentation du gain de temps final baisse jusqu'à cinq minutes d'intervalle (492 secondes) ; pour augmenter à nouveau jusqu'à dix minutes (633 secondes).

En moyenne, les participants gagneraient au minimum 349 secondes sur le temps total, soit environ cinq minutes et quarante-cinq secondes.

Concernant la fluidité de la course, **nous remarquons qu'un départ échelonné permet un gain du temps final pour tous les blocs par rapport à un départ unique** (un minimum de 349 secondes pour un maximum de 633 secondes en moyenne).

Pour Sierre-Zinal, **huit minutes d'intervalle entre les blocs représentent en moyenne le gain de temps final le plus élevé avec 591 secondes** (en réalité, dix minutes d'attente entre les blocs indique la valeur du gain de temps final le plus élevé, mais l'organisation de la course nous permet d'aller jusqu'à huit minutes d'attente entre les blocs). Par contre, **quatre minutes d'intervalle entre les blocs illustrent un gain de temps plus efficace (515 secondes)**, car le gain est notable pour une augmentation du temps d'attente minime entre les blocs.

Dans cette étude, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont du être introduites et les résultats de cette étude pourraient en être influencés.

5.2.2 Deuxième méthode : l'analyse des « lost-time » après des départs échelonnés

Comme les sondages qualitatifs l'ont démontré depuis plusieurs années à Sierre-Zinal, la présence des bouchons oblige un certain nombre de participants à ralentir quelques fois.

Avec plus de quatre-cents participants par bloc, les bouchons sont inévitables au sein d'un même bloc.

Dans cette étude, le « lost-time » indiqué comprend toujours une part du temps perdu au sein même du bloc.

Si nous analysons les « lost-time » de la simulation de référence avec des simulations relatives à des départs échelonnés allant de deux minutes à dix minutes, nous obtenons les résultats suivants (fig. 22):

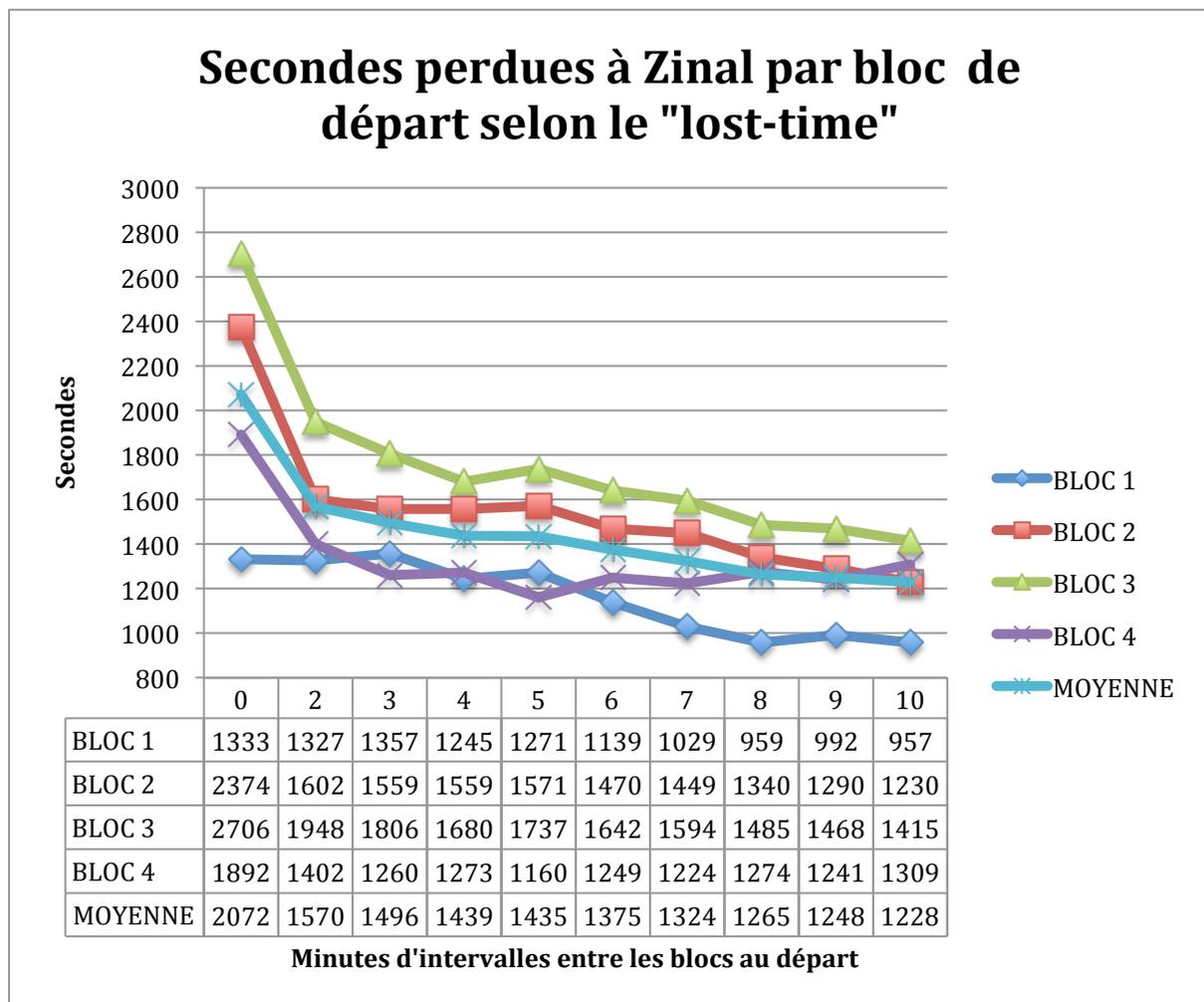


Fig. 22 : graphique du temps perdu en moyenne par bloc selon le « lost-time ». La perte de temps en seconde est comparée à la perte de temps totale de la simulation de référence

Tableau 12 : pourcentage de la diminution du temps perdu entre le « lost-time » de la simulation de référence et le « lost-time » pour chaque intervalle de temps entre les blocs

	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4	MOYENNE
2	0.45%	32.52%	28.01%	25.90%	24.39%
3	(-)1,8%	34.33%	33.26%	33.40%	27.97%
4	6.60%	34.33%	37.92%	32.72%	30.68%
5	4.65%	33.82%	35.81%	38.69%	30.90%
6	14.55%	38.08%	39.32%	33.99%	33.77%
7	22.81%	38.96%	41.09%	35.31%	36.23%
8	28.06%	43.56%	45.12%	32.66%	39.10%
9	25.58%	45.66%	45.75%	34.41%	39.90%
10	28.21%	48.19%	47.71%	30.81%	40.87%

Les pourcentages ci-dessus (tableau 12) nous permettent de nous rendre compte du pourcentage de gain de temps entre le « lost-time » de la simulation de référence et le « lost-time » pour chaque intervalle de temps entre les blocs. Les valeurs positives montrent une diminution du temps perdu alors que les valeurs négatives signifient l'inverse.

Nous déduisons de ce graphique (fig. 22) qu'une diminution non négligeable du temps perdu par rapport à la simulation de référence (temps 0). Mise à part le bloc 1, les blocs gagnent environ 490 secondes par rapport au « lost-time » de la simulation de référence. La plus grande baisse du temps perdu d'un intervalle de temps à l'autre se situe entre la simulation de référence et deux minutes entre les blocs.

Pour mieux exprimer les résultats, analysons la tendance de chaque bloc :

Bloc 1

Minutes d'intervalle avec le temps perdu le plus bas: 10

Minutes d'intervalle qui montrent la plus grande diminution de temps d'un intervalle à l'autre (excepté 2) : 6

Minutes d'intervalle qui montrent une augmentation du temps perdu: 3

De manière générale, les valeurs « lost-time » pour le bloc 1 sont plus faibles que celles des autres blocs. La raison en est la même que pour le gain de temps. Le bloc 1 est moins sujet aux bouchons.

A l'intérieur de certaines limites, plus l'intervalle de temps entre les blocs augmente, plus le temps perdu diminue (jusqu'à 376 secondes avec un intervalle de dix minutes entre les blocs), mise à part avec trois minutes d'écart d'intervalle entre les blocs de départ. La plus grande baisse du temps perdu se situe, selon notre simulation et nos hypothèses, à six minutes d'intervalle entre les blocs.

Bloc 2

Minutes d'intervalle avec le temps perdu le plus bas: 10

Minutes d'intervalle qui montrent la plus grande diminution de temps d'un intervalle à l'autre (excepté 2) : 8

Minutes d'intervalle qui montrent une augmentation du temps perdu: 5

Le temps perdu du bloc 2 diminue constamment mais pas de manière prononcée, sauf à cinq minutes d'intervalle entre les blocs de départ.

Bloc 3

Minutes d'intervalle avec le temps perdu le plus bas: 10

Minutes d'intervalle qui montrent la plus grande diminution de temps d'un intervalle à l'autre (excepté 2) : 3

Minutes d'intervalle qui montrent une augmentation du temps perdu: 5

Le temps perdu est le plus élevé pour le bloc 3 (2706 secondes pour la simulation de référence). Comme nous l'expliquions plus haut, le bloc 3 représente la partie des participants qui rencontre le plus de bouchons, c'est pourquoi le « lost-time » y est élevé. Or, il diminue considérablement au fil de l'augmentation des intervalles de temps (jusqu'à 1415 secondes avec dix minutes d'intervalle entre les blocs), mise à part pour un départ donné avec cinq minutes d'intervalle entre les blocs.

Bloc 4

Minutes d'intervalle avec le temps perdu le plus bas: 5

Minutes d'intervalle qui montrent la plus grande diminution de temps d'un intervalle à l'autre (excepté 2) : 3

Minutes d'intervalle qui montrent une augmentation du temps perdu: 4, 6, 8 et 10

La valeur « lost-time » la plus basse du bloc 4 se situe à cinq minutes d'intervalle entre les blocs (1160 secondes). Jusqu'ici, l'intervalle de cinq minutes entre les blocs de départ a montré une tendance qui allait vers un gain de temps final réduit et un « lost-time » élevé par rapport aux autres temps d'intervalle entre les blocs. La courbe du bloc 4 illustre une variation générale des « lost-time » en fonction de l'intervalle de temps entre les blocs. Quoi qu'il en soit, le temps perdu diminue fortement si nous comparons les intervalles de temps et la simulation de référence.

Moyenne des blocs

Minutes d'intervalle avec le temps perdu le plus bas: 10

Minutes d'intervalle qui montrent la plus grande diminution de temps (excepté 2) : 3

Minutes d'intervalle qui montrent une augmentation du temps perdu (ici la moins bonne diminution): 5

La courbe de la moyenne du temps perdu dit « lost-time » entre les blocs en fonction de l'intervalle de temps qui sépare les blocs diminue constamment (jusqu'à 1228 secondes de temps perdu à dix minutes d'intervalle entre les blocs, alors que le temps perdu de la simulation de référence est de 2072 secondes) avec l'augmentation de l'intervalle de temps.

Mise à part une légère diminution de cette valeur à cinq minutes d'intervalle (1435 secondes), **espacer les départs entre les blocs permet, selon notre simulation et nos hypothèses, aux participants de diminuer la perte de temps causée par les ralentissements.**

Pour Sierre-Zinal, **huit minutes d'intervalle entre les blocs indiquent la valeur « lost-time » la plus faible avec un « lost-time » diminuant de 807 secondes par rapport à la simulation de référence** (en réalité, dix minutes d'attente entre les blocs indique une valeur « lost-time » de 844 secondes de moins que celui de la simulation de référence, mais l'organisation de la course nous permet d'aller jusqu'à huit minutes d'attente entre les blocs). Cependant, **deux minutes d'intervalle entre les blocs représente le meilleur ratio entre une diminution du temps perdu et un temps entre les blocs relativement faible avec une diminution d'environ 500 secondes par rapport à la simulation de référence.**

Rappelons que dans cette étude, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont du être introduites et les résultats de cette étude pourraient en être influencés.

6 Discussion

Dans ce chapitre, nous proposons une réflexion critique notre travail. Nous relèverons, dans un premier temps, les points forts et les limites du travail. Dans un deuxième temps, nous évoquerons les perspectives de recherches futures.

6.1 Points forts et limites du travail

Le premier élément qui nous semble devoir être mentionné concerne l'étroite correspondance entre la simulation de foule de Sierre-Zinal et la réalité. La différence qui existe entre la simulation et la réalité peut effectivement être diminuée, mais avec les moyens à disposition pour cette première étude, nous sommes satisfaits d'avoir obtenu 6.12% d'erreur au temps final.

Par ailleurs, la conception géométrique et sa représentation graphique de la simulation est conforme à la réalité. Les largeurs, les pentes et les différentes coordonnées géographiques ont été relevées directement sur le terrain.

Les résultats des participants dont nous disposons pour l'étude sont proches de la moyenne des quatre blocs de départ. Grâce à ces résultats, nous avons établi les équations de vitesse pour chaque bloc selon la pente.

A noter qu'il était impossible d'avoir les bonnes régressions de la vitesse du fait qu'elles sont données à partir de valeurs sur des Touristes eux mêmes sujets aux interactions sociales de la foule. La solution consiste à mesurer, sur un nombre suffisamment conséquent et significatif de participants, leurs valeurs sans ralentissement (avec un matériel précis).

L'espacement des blocs de départ par intervalle de temps fait voir des résultats plausibles. Cette solution permet de gagner du temps par rapport au temps final pour l'ensemble des blocs. Elle conduit à une diminution du temps perdu (appelé « lost-time ») sur l'ensemble de la course, par rapport à un départ unique.

Datasport nous a fourni des données chronométriques précises et complètes. Nous avons ainsi pu établir une correspondance étroite entre la simulation et la réalité.

Le résultat final permet de fluidifier la course Sierre-Zinal afin de satisfaire les participants. Nous espérons que cette étude puisse servir les besoins de la Course Sierre-Zinal et, qui sait, d'autres courses.

Pour ce qui concerne les limites de notre étude, nous relevons un manque de points de chronométrage sur le parcours. Les données précises que nous utilisons sont au nombre de trois. Elles sont précises mais leur nombre est encore insuffisant. La zone entre Sierre et Chandolin constitue environ la moitié du parcours. Dans l'idéal, un point de chronométrage supplémentaire serait au poste de ravitaillement de Ponchette.

Autre élément à noter, nous ignorons la répartition des participants passant par Saint-Antoine ou par Niouc. Pour palier cette lacune, nous effectuerons un recensement à l'occasion de l'édition 2016. De ce fait, dans la conception de la simulation de foule, nous avons paramétré cette répartition qui se fait dans notre simulation de manière aléatoire. Nous obtenons un « lost-time » uniquement à l'arrivée. Dans l'idéal, il aurait fallu connaître les données « lost-time » à chaque point de chronométrage de manière à déterminer les zones d'attentes avec plus de précision.

Dans le même ordre d'idée, chaque agent était référencé à un bloc de départ. Or, certains d'entre eux ont choisi un bloc qui n'est pas en conformité avec leurs capacités. Dans l'idéal, nous aurions dû procéder à une audition permettant de cibler les aptitudes physiques de chaque agent, le degré de son entraînement, de manière à choisir ensemble le bloc auquel il devrait appartenir.

Faute de temps, nous nous sommes restreints à la simulation de la catégorie « Touriste ». Le départ des « Coureurs » quatre heures trente plus tard à Sierre et le départ des « Juniors » quatre heures quinze plus tard à Chandolin auraient influencé les résultats. Mais dans une mesure qui nous semble négligeable – du point de vue du temps- pour l'objectif que nous avons en vue.

Pour finir, nous avons simulé la course en conservant quatre blocs de départ. L'importance du nombre de blocs au départ n'a pas été évaluée dans ce travail.

Lors d'une course à pied en montagne, il est difficile d'en expliquer l'aspect social. Incontestablement, il existe un certain nombre de comportements sociaux qui vont influencer la cadence des coureurs.

A Sierre-Zinal particulièrement, l'ambiance est festive. Effectivement, l'objectif de la majorité des participants est de rallier Sierre à Zinal pour le plaisir et pour le partage.

C'est dans cet esprit que la catégorie « Touriste » a été créée, une catégorie dans laquelle les participants ne sont pas classés.

L'esprit qui règne à Sierre-Zinal engendre une bonne ambiance lequel induit naturellement du fair-play. Ce fair-play conditionne à son tour une attitude propre à faciliter les dépassements par exemple. Nous connaissons le cas d'un participant qui en était à sa 40^e édition et qui a fait une chute sérieuse s'étant mis sur la bordure pour laisser passer un autre participant.

Un problème physique ou technique peut survenir à tout moment. C'est un événement impossible à prévoir.

Pour exemple, un participant nous rapportait après sa course, qu'un coureur qui le précédait dans un passage étroit, ralentissait le peloton. En fait, un participant vomissait sur le chemin et plusieurs compagnons de pelotons s'étaient accumulés autour de lui pour prendre de ses nouvelles. Un bel exemple de solidarité !

Les participants disposent de six postes de ravitaillement sur l'ensemble de la course. Pour connaître le temps d'arrêt de chacun à ces différents postes, il faudrait effectuer une étude spéciale, mais son intérêt n'est peut-être pas évident.

Sous les encouragements du public, un participant augmente probablement son allure, malgré la fatigue.

Il existe tant d'exemples pour expliquer les variations de vitesse induits par l'aspect social sur le parcours de Sierre-Zinal.

On voit bien que les changements de vitesse des concurrents ne sont pas déterminés uniquement par la pente et la condition physique des participants.

Il n'est guère possible de modéliser ces aspects sociaux dans notre simulation de foule et nous ne pouvons pas en tenir compte dans ce travail.

Nous devons être prudent quant à la validité de la simulation. Elle ne fournit que des ordres de grandeur. Une simulation n'est qu'une copie plus ou moins approchée de la réalité. Dans cette étude, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont du être introduites et les résultats de cette étude pourraient en être influencés. Un travail semblable sur l'édition 2016 de la Course Sierre-Zinal nous permettra d'affiner les techniques utilisées avec de nouvelles données chronométriques à certains endroits clés du parcours. Effectivement, nous ne sommes pas en mesure d'affirmer que l'édition 2015 soit représentative. Le nombre de participants peut varier d'une édition à l'autre et cet élément ne doit pas être négligé. Il existe d'autres paramètres dont nous n'avons pas tenu compte, comme l'état du terrain (sec, humide, glissant, etc.), l'état de l'atmosphère

(température, pression, humidité, etc.). Nous devons éviter d'être trop catégorique sur la valeur des résultats. Concernant les vitesses ascensionnelles et horizontales, il existe un degré d'approximation qui s'attache à ses simulations et qui pourrait faire varier nos résultats.

6.2 Perspectives de recherches

Par le biais d'une simulation de foule à Sierre-Zinal, cette étude représente un moyen innovant d'analyser le trafic lors d'une course à pied en montagne.

Si nous tenons compte des améliorations qui pourraient s'ensuivre, et pour être pertinent, il nous faudrait disposer une caméra à l'intersection des chemins qui passent par Saint-Antoine et par Niouc. La proportion des participants passant d'un côté ou de l'autre pourrait alors évaluée avec précision. Nous pourrions également envisager de filmer les zones des bouchons aux alentours du poste de ravitaillement de Beauregard afin de mieux comprendre les composantes du trafic à ces endroits.

Dans notre étude, le temps de pause des participants aux différents postes de ravitaillement a été négligé. Il peut être intéressant de déterminer la durée moyenne de pause des participants en fonction de leur temps final.

Pour obtenir un résultat qui soit comparable entre la simulation et la réalité, l'idéal serait de disposer de puces GPS pour tous les participants à Sierre-Zinal. Mais cette solution n'est envisageable qu'avec l'aide d'un sponsor.

Pour combler le manque des données entre Sierre et Chandolin, il serait judicieux d'installer un tapis de chronométrage à Ponchette. L'étude pourrait alors être complétée et les zones de bouchons seraient déterminées avec une plus grande précision.

Une étude entière pourrait-être consacrée à l'évolution de la fatigue durant la course.

Dans une étude future, simuler la course en variant le nombre de blocs au départ permettrait de déterminer la portion de temps perdu au sein même d'un bloc. Le nombre de participants optimal par bloc de départ pourrait ainsi être mieux déterminé.

Afin de compléter cette étude, nous devrions intégrer le départ des « Coureurs » et celui des « Juniors » pour vérifier l'évolution des zones d'attentes et étudier les dépassements. Notons que le dépassement des « Touristes » par les coureurs est un souci majeur dans la course des Cinq 4'000, mais davantage pour les Touristes que pour les Coureurs. Le taux de dépassement ne devrait pas être augmenté avec un espacement dans le temps entre les blocs. Le départ des coureurs doit être déplacé en conséquence pour ne pas contraindre les « Touristes » à devoir trop souvent se mettre de côté. Il faudrait également valider le modèle avec d'autres jeux de données de Sierre-Zinal et d'autres courses.

Pour améliorer la simulation de foule, nous pouvons nous baser sur « le principe du moindre effort » décrit ci-dessous :

Le principe du moindre effort « PLE » dicte le mouvement humain et les dynamiques de foule. Il gouverne des comportements régulièrement observés. Les agents visent à dépenser le moins d'effort possible. La formulation du principe de moindre effort a influencé la conception de systèmes récents de modélisation de la foule qui mesurent l'effort en termes de « temps, de distance, de congestion et d'accélération » [GCCD10].

Comme dans l'article « PLEdestrians : A least-effort approach to crowd simulation » de Stephen. J. Guy et al. [GCCD10], nous utilisons le « PLEdestrians », un algorithme qui calcule la trajectoire biomécanique d'énergie efficace pour chaque individu dans une simulation multi-agents. Notre formulation serait alors fondée sur le principe du moindre effort et des modèles biomécaniques du mouvement. Elle conduirait les agents le long d'une route vers un but précis et évite la collision, réduit la quantité de mouvement et maintient la vitesse préférée de chaque agent.

Les nouvelles composantes incluent :

- 1) « une simple formulation d'énergie » [GCCD10] : un nouveau modèle mathématique pour représenter l'effort dépensé par chaque agent, basée sur une formulation biomécanique qui minimise la quantité totale de l'énergie métabolique utilisée lors du trajet;
- 2) « une trajectoire efficace de calcul, une simple formulation d'énergie » [GCCD10] : nous réduisons le problème du calcul de trajectoire par optimisation. Nous minimisons l'énergie biomécanique requise pour la trajectoire, tout en évitant les autres agents et les obstacles.
Nous exploitons les propriétés de « convexités » de notre fonction de « PLE » et utilisons un système de groupement, comme la classification des niveaux des participants, pour calculer efficacement la vitesse de chaque agent dans les simulations complexe.

L'environnement de la simulation contient N agents hétérogènes et des obstacles statiques et dynamiques. Chaque agent A à une position actuelle et il se dirige vers un

but. Les deux facteurs sont considérés comme input, c'est à dire propres à l'agent. Nous présentons cela dans une surface circulaire ou polygonale. Chaque agent a un rayon r_A et une vitesse v_A .

La simulation globale procède par « pas de temps discrets », « une trajectoire efficace de calcul », « une simple formulation d'énergie » [GCCD10] et nous mettons à jour la position et la vitesse de chaque agent à chaque étape. A chaque étape, l'agent utilise la position actuelle, la position du but et l'information sur ses voisins pour calculer la nouvelle vitesse pour le temps de l'étape. Dans notre simulation, il tiendra compte aussi de la pente. La gamme de vitesses possibles pour éviter les autres agents et les obstacles est calculée pour chaque agent à chaque étape.

L'algorithme choisit une vitesse parmi celles autorisées en fonction de la condition physique de nos échantillons et de la pente du terrain, de manière à minimiser l'effort attendu pour atteindre le but.

7 Conclusion

L'engouement qui existe pour la course à pied en montagne ne cesse de croître. En tant que précurseur de ce sport, Sierre-Zinal est devenue une course à pied en montagne réputée dans le monde. A ce jour, les inscriptions sont limitées et des participants hors délais ne sont plus acceptés. Malgré la limitation du nombre d'inscriptions, le problème des bouchons et des dépassements n'est pas encore complètement réglé.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer la meilleure configuration du départ en blocs pour diminuer l'effet de ces problèmes, à défaut de les éradiquer. Pour ce faire, nous avons placé l'édition 2015 de la course de Cinq 4'000 dans une simulation, pour la catégorie « Touriste ».

Nous avons rassemblé les éléments principaux (relevé de terrains, vitesse de participants selon le bloc de départ, disposition des blocs, données relatives aux participants, etc.) pour mettre en place une simulation qui représente la course avec une erreur moyenne de 6.12% sur le temps final des participants entre la simulation de référence et la réalité.

Après avoir proposé un modèle approché, nous avons lancé plusieurs simulations en espaçant de plusieurs minutes les blocs au départ. En respectant les directives logistiques de la course, l'intervalle de temps entre les blocs peut aller de deux à huit minutes.

En comparant le temps final de l'ensemble des participants entre un départ unique (simulation de référence) et des départs échelonnés, nous obtenons un gain du temps final avec des départs échelonnés. La moyenne des participants indique un gain de 349 secondes sur le temps final avec un départ donné toutes les deux minutes entre chaque bloc, et un gain de 633 secondes si les départs étaient donnés avec dix minutes d'intervalle entre les blocs.

En comparant le temps perdu (« lost-time ») moyen de l'ensemble des participants entre un départ unique (simulation de référence) et des départs échelonnés entre les blocs, nous obtenons une diminution du temps perdu avec des départs échelonnés. La moyenne « lost-time » des participants indique une diminution du temps perdu de 502 secondes avec un départ donné toutes les deux minutes entre chaque bloc, et une diminution du temps perdu de 844 secondes avec un départ donné toutes les dix minutes entre chaque bloc.

Les intervalles de deux, quatre et huit minutes entre les départs des blocs ont été les temps d'attente au départ les plus convaincants pour une meilleure fluidité de la course. C'est bien sûr au comité d'organisation de choisir l'intervalle de temps qui lui paraît le plus favorable pour la course.

Nous espérons que cette étude offre de nouvelles perspectives pour la fluidification de courses de montagne.

8 Remerciements

Mes remerciements vont d'abord au maître assistant Thibaut Le Naour qui a cru en ce projet, qui m'a constamment encouragé et pour la création d'une simulation de foule adaptée à Sierre-Zinal, une simulation sans laquelle ce travail n'aurait pas été possible.

Mes remerciements vont aussi à mon condisciple et ami Guillaume Maire qui n'a pas hésité, poussé par la passion de la course en montagne, à collaborer avec moi dans ce projet. Ses compétences en mathématique et ses qualités de jugement ont permis au projet d'avancer.

Votre présence sur le parcours de Sierre-Zinal le 9 août 2015 a montré votre motivation pour la course à pied en montagne, particulièrement pour l'avenir de Sierre-Zinal.

J'adresse aussi un merci particulier aux participants qui ont accepté de prendre part aux tests sportifs et de porter une montre GPS durant la course :

Albrecht Adrien, Albrecht Emilien, Aymon Stéphane, Botteron Catherine, Briguet Géraldine, Bruttin Jolan, Clivaz Virginie, Constantin Viviane, Dayer Alexandra, Delay Jean-Philippe, Delay Sarah, Dessimoz Sandy, Epiney Lucien, Genoud Muriel, Gremion Christophe, Hirsig Véronique, Liechti Gaëtan, Maire Serge-André Morard Steve, Oggier Lucas, Solioz Arnaud, Tosi Christine, Zufferey Adrien, Zufferey Jérémy et Zufferey Mathieu.

Enfin, j'adresse mes remerciements à Jean-Claude Pont pour la correction du travail final, pour son avis critique et pour les conseils utiles qu'il m'a prodigués. Mise à part son titre de professeur honoraire de l'Université de Genève, Jean-Claude est le fondateur de Sierre-Zinal. Il a été directeur de la course durant 42 ans ! Jean-Claude est aujourd'hui président de l'Association Sierre-Zinal.

Merci également au comité de Sierre-Zinal, plus particulièrement à son directeur Vincent Theytaz, pour sa confiance qu'il accorde à cette étude.

Pour finir, je remercie Luc Genoud et ainsi que Christian Briguet (par le biais du ski-club de Miège) pour le prêt d'ordinateurs sophistiqués qui ont permis à la simulation de fonctionner. Dans cette liste de remerciements, je ne saurais oublier Etienne Gafner de la maison *Datasport* pour la transmission des données relatives au chronométrage et l'entreprise Bucher et Walt SA à Saint-Blaise qui nous ont très généreusement prêté 9 montres de la marque Garmin (Forerunner 220) ainsi que des collaborateurs de Polar Suisse (Polar Electro Europe AG à Zoug) qui nous ont mis à dispositions 8 Polar V800.

9 Bibliographie

9.1 *Livres et articles scientifiques*

- [ABW06] G. Antonini, M. Bierlaire, M. Weber (2006). *Discrete choice models of pedestrian walking behavior*. *Transportation Research Part B : Methodological*, 40 :667 – 687.
- [B03] M. Bierlaire (2003). *Behavioral dynamics for pedestrians*. In 10th International Conference on Travel Behavior Research.
- [F00] F. Feurtey (2000). *Simulating the collision avoidance behavior of pedestrians*. Master's thesis, University of Tokyo, School of Engineering.
- [FS98] P. Fiorini, Z. Shillert (1998). *Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles*. *International Journal of Robotics Research*.
- [GCCD10] S. J. Guy, J. Chhugani, S. Curtis, P. Dubey, M. Lin, D. Manocha (2010). *PLEdestrians: A least-effort approach to crowd simulation*. *Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*.
- [GKLM11] S. J. Guy, S. Kim, M. Lin, D. Manocha (2011). *Simulating Heterogeneous Crowd Behaviors Using Personality Trait Theory*. *Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*.
- [HMFB01] D. Helbing, P. Molnar, I. J. Farkas, K. Bolay (2001). *Self-organizing pedestrian movement*. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 28(3) : 361–383.

- [KSHF09] M. Kapadia, S. Singh, W. Hewlett, P. Faloutsos (2009). *Egocentric affordance fields in pedestrian steering*. In I3D '09 : Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games, pages 215–223, New-York, NY, USA.
- [L12] S. Lemercier (2012). *Simulation du comportement de suivi dans une foule de piétons à travers l'expérience, l'analyse et la modélisation*. Modeling and Simulation. Université Rennes 1.
- [PPD07] S. Paris, J. Pettre, S. Donikian (2007). *Pedestrian reactive navigation for crowd simulation : a predictive approach*. In Eurographics'07 : Computer Graphics Forum, volume 26, pages 665–674.
- [P13] J.-C. Pont (2013). *Courir dans une Cathédrale, la course des cinq 4'000 Sierre-Zinal 1974-2013*. Association Sierre-Zinal.
- [R87] C. W. Reynolds (1987). *Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model*. In SIGGRAPH '87 : Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 25–34, New York, NY, USA.
- [RABC09] T. Robin, G. Antonini, M. Bierlaire, J. Cruz (2009). *Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model*. Transportation Research Part B : Methodological, 43 :36 – 56.
- [VGLM11] J. Van den Berg, S. J. Guy, M. Lin, D. Manocha (2011). *Reciprocal n-body Collision Avoidance*. Star.

9.2 Sites internet

- [LT15] Le Temps (2015). Consulté le 23 novembre 2015. Disponible sur : <http://www.letemps.ch/sport/2015/09/18/folle-ascension-trail-running>
- [MM12] Moussaïd et al. concernant l'effet « stop and go ». Consulté le 1^{er} février 2016. Disponible sur : <http://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1002442>
- [OFS14] Office Fédéral du Sport (2014). Brochure consultée le 23 novembre 2015. Disponible sur : http://www.sportobs.ch/fileadmin/sportobs-dateien/Downloads/Sport_Schweiz_2014_f.pdf
- [SW15] Swiss-running (2015). Consulté le 23 novembre 2015. Disponible sur : <http://www.swiss-running.ch/fr/running/plus-darticles/9398-cs-de-trail-running--premiere-en-suisse-romande.html>
- [SZ15] Sierre-Zinal (2015). Consulté le 23 novembre 2015. Disponible sur : <http://sierre-zinal.com/>
- [TO15] Tour Observation (2015). Consulté le 23 novembre 2015. Disponible sur : <http://www.tourobs.ch/fr/actualites-et-articles/articles/id-3159-le-trail-running-ou-course-en-montagne/>

10 Annexes

10.1 Statistiques des participants à l'édition 2015 de Sierre-Zinal

Sierre-Zinal 2015 - statistique inscriptions

date: 13.10.15
heure: 11:08:17
page: 1

statistique catégories

catégorie	M/F	de	à	total	partis	classés
1: Elites Hommes	M	1976	1995	615	539	527
2: Vétérans I	M	1966	1975	292	244	232
3: Vétérans II	M	1956	1965	148	126	120
4: Vétérans III	M	1917	1955	36	31	26
Hommes				1091	940	905
11: Elites Femmes	F	1976	1995	137	109	104
12: Femmes I	F	1966	1975	71	61	60
13: Femmes II	F	1900	1965	27	25	22
Femmes				235	195	186
21: Tourist		1900	2015	2466	2264	2233
Tourist				2466	2264	2233
31: Juniors Hommes	M	1996	2015	145	139	138
32: Juniors Femmes	F	1996	2015	55	50	47
Juniors				200	189	185
total				3992	3588	3509

10.2 Résultats des secondes gagnées par bloc selon l'intervalle de temps au départ, en comparaison à la simulation de référence

ERREUR 2 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	39	0.60%	333	4.31%	368	4.20%	393	4.05%	3.29%
Hôtel Weisshorn	46	0.42%	408	3.23%	459	3.20%	415	2.62%	2.37%
Zinal	81	0.49%	561	2.95%	629	2.93%	448	1.90%	2.07%
MOYENNE PAR BLOC	56	0.51%	434	3.50%	485	3.44%	419	2.86%	

ERREUR 3 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	35	0.53%	400	5.18%	461	5.26%	514	5.30%	4.07%
Hôtel Weisshorn	39	0.36%	478	3.78%	539	3.76%	526	3.33%	2.81%
Zinal	60	0.36%	630	3.32%	706	3.29%	529	2.24%	2.30%
MOYENNE PAR BLOC	44	0.42%	502	4.09%	568	4.10%	523	3.62%	

ERREUR 4 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	79	1.21%	450	5.84%	530	6.05%	630	6.49%	4.90%
Hôtel Weisshorn	113	1.04%	549	4.34%	618	4.31%	654	4.14%	3.46%
Zinal	165	1.00%	725	3.82%	778	3.62%	655	2.78%	2.81%
MOYENNE PAR BLOC	119	1.08%	574	4.66%	642	4.66%	646	4.47%	

ERREUR 5 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	59	0.90%	441	5.72%	556	6.34%	593	6.12%	4.77%
Hôtel Weisshorn	105	0.96%	540	4.27%	662	4.62%	593	3.75%	3.40%
Zinal	182	1.10%	734	3.86%	858	4.00%	580	2.46%	2.86%
MOYENNE PAR BLOC	115	0.99%	572	4.62%	692	4.99%	589	4.11%	

ERREUR 6 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	124	1.90%	483	6.27%	584	6.66%	601	6.19%	5.26%
Hôtel Weisshorn	198	1.82%	600	4.75%	707	4.93%	618	3.91%	3.85%
Zinal	316	1.92%	816	4.30%	921	4.29%	588	2.50%	3.25%
MOYENNE PAR BLOC	213	1.88%	633	5.11%	737	5.29%	602	4.20%	

ERREUR 7 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	157	2.41%	505	6.56%	570	6.50%	604	6.23%	5.42%
Hôtel Weisshorn	249	2.28%	641	5.07%	709	4.95%	607	3.84%	4.03%
Zinal	395	2.40%	873	4.60%	919	4.28%	613	2.60%	3.47%
MOYENNE PAR BLOC	267	2.36%	673	5.41%	733	5.24%	608	4.23%	

ERREUR 8 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	197	3.02%	541	7.01%	552	6.30%	619	6.38%	5.68%
Hôtel Weisshorn	290	2.66%	685	5.42%	687	4.80%	623	3.94%	4.20%
Zinal	424	2.57%	935	4.92%	903	4.21%	635	2.70%	3.60%
MOYENNE PAR BLOC	304	2.75%	720	5.79%	714	5.10%	626	4.34%	

ERREUR 9 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	205	3.14%	546	7.08%	626	7.15%	594	6.13%	5.87%
Hôtel Weisshorn	313	2.86%	697	5.51%	785	5.48%	592	3.75%	4.40%
Zinal	467	2.83%	957	5.04%	1032	4.80%	587	2.49%	3.79%
MOYENNE PAR BLOC	328	2.94%	733	5.88%	814	5.81%	591	4.12%	

ERREUR 10 MINUTES	Bloc1		Bloc2		Bloc3		Bloc4		MOYENNE %
Chandolin	202	3.09%	574	7.44%	673	7.68%	587	6.05%	6.07%
Hôtel Weisshorn	294	2.69%	732	5.79%	842	5.88%	577	3.65%	4.50%
Zinal	419	2.54%	997	5.25%	1124	5.23%	577	2.45%	3.87%
MOYENNE PAR BLOC	305	2.78%	768	6.16%	880	6.26%	580	4.05%	

10.3 Résultats des secondes perdues à Zinal par bloc de départ selon le « lost-time »

SIM DE REFERENCE	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	1333	2374	2706	1892	2076
Lost-time (m)	22	40	45	32	35
Lost-time (%)	8.09%	12.50%	12.60%	8.03%	10.30%

INTERVALLE 2 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	1327	1602	1948	1402	1570
Lost-time (m)	22	27	32	23	26
Lost-time (%)	8.05%	8.44%	9.07%	5.95%	7.88%

INTERVALLE 3 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	1357	1559	1806	1260	1496
Lost-time (m)	23	26	30	21	25
Lost-time (%)	8.23%	8.21%	8.41%	5.35%	7.55%

INTERVALLE 4 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	1245	1559	1680	1273	1439
Lost-time (m)	21	26	28	21	24
Lost-time (%)	7.55%	8.21%	7.82%	5.40%	7.25%

INTERVALLE 5 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	1271	1571	1737	1160	1435
Lost-time (m)	21	26	29	19	24
Lost-time (%)	7.71%	8.27%	8.09%	4.92%	7.25%

INTERVALLE 6 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	1139	1470	1642	1249	1375
Lost-time (m)	19	25	27	21	23
Lost-time (%)	6.91%	7.74%	7.65%	5.30%	6.90%

INTERVALLE 7 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	1029	1449	1594	1224	1324
Lost-time (m)	17	24	27	20	22
Lost-time (%)	6.24%	7.63%	7.42%	5.19%	6.62%

INTERVALLE 8 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	959	1340	1485	1274	1265
Lost-time (m)	16	22	25	21	21
Lost-time (%)	5.82%	7.06%	6.91%	5.41%	6.30%

INTERVALLE 9 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	992	1290	1468	1241	1248
Lost-time (m)	17	22	24	21	21
Lost-time (%)	6.02%	6.79%	6.84%	5.27%	6.23%

INTERVALLE 10 MIN	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Moyenne
Lost-time (s)	957	1230	1415	1309	1228
Lost-time (m)	16	21	24	22	20
Lost-time (%)	5.81%	6.48%	6.59%	5.56%	6.11%

10.4 Déclaration personnelle

Je sous-signé certifie avoir réalisé le présent travail de façon autonome, sans aide illicite quelconque. Tout élément emprunté littéralement ou mutatis à des publications ou à des sources inconnues, a été rendu reconnaissable comme tel.

Lieu, date : Miège, le 27 janvier 2016

Signature : Valentin Genoud

10.5 Droits d'auteur

Je sous-signé reconnais que le présent travail est une partie constituante de la formation en Sciences du Mouvement et du Sport à l'Université de Fribourg. Je m'engage donc à céder entièrement les droits d'auteur – y compris les droits de publication et autres droits liés à des fins commerciales ou bénévoles – à l'Université de Fribourg.

La cession à des tiers des droits d'auteur par l'Université est soumise à l'accord du (de la) sous-signé-e uniquement.

Cet accord ne peut faire l'objet d'aucune rétribution financière.

Date : 03 février 2016

Signature : Valentin Genoud