



HAL
open science

POSSIBILITÉS OFFERTES PAR LA MODÉLISATION DES INTERACTIONS ENTRE MARCHEURS POUR LE DIAGNOSTIC DES INFRASTRUCTURES PÉDESTRES PROJET INFRAPED

Laura Catalina Echeverri, Jean-Paul Hubert, Jérôme Monnet, Jean-Michel
Auberlet

► **To cite this version:**

Laura Catalina Echeverri, Jean-Paul Hubert, Jérôme Monnet, Jean-Michel Auberlet. POSSIBILITÉS OFFERTES PAR LA MODÉLISATION DES INTERACTIONS ENTRE MARCHEURS POUR LE DIAGNOSTIC DES INFRASTRUCTURES PÉDESTRES PROJET INFRAPED. Université G. Eiffel. 2023, pp.35. hal-04119468

HAL Id: hal-04119468

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04119468>

Submitted on 6 Jun 2023

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

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

POSSIBILITÉS OFFERTES PAR LA MODÉLISATION DES INTERACTIONS ENTRE MARCHEURS POUR LE DIAGNOSTIC DES INFRASTRUCTURES PÉDESTRES

PROJET INFRAPED – GROUPE MUP / DEPARTEMENT DU VAL-DE-MARNE

RAPPORT DE RECHERCHE

Juin 2023

Laura Echeverri Guzman et Jean-Paul Hubert en collaboration avec Jérôme Monnet et Jean-Michel Auberlet, Université Gustave Eiffel / Labex Futurs urbains



Possibilités offertes par la modélisation des interactions entre marcheurs pour le diagnostic des infrastructures pédestres

Projet infraped – Labex Futurs Urbains Groupe MUP / Département du Val-de-Marne

Université Gustave Eiffel, Marne la Vallée, juin 2023

Rapport sur convention de partenariat du département du Val de Marne avec l'Université Paris Est Créteil pour la construction d'une capacité de diagnostic et d'analyse de la voirie pour favoriser la marche, du 7 septembre 2021

Auteurs :

Laura Echeverri Guzman, LVMT, Labex Futurs Urbains

Jean-Paul Hubert, Université Gustave Eiffel, AME-DEST

en collaboration avec :

Jérôme Monnet, Université Gustave Eiffel, LVMT

Jean-Michel Auberlet, Université Gustave Eiffel, COSYS-PICS-L

Relectrice :

Emmanuelle Petit, LVMT, Labex Futurs Urbains

Remerciements

Le groupe MUP du Labex Futurs Urbains remercie chaleureusement le Conseil départemental du Val de Marne pour son soutien financier et les services techniques pour leur participation active tout au long de ce partenariat. Merci en particulier à Valérie Tfibel, qui nous a accompagnés depuis le début, à Dorothee Inger, Michel Lhuilier, Gwenaëlle Touguet, Tiffany Vo Ngoc, Sandrine Lenir, Jordan Camozzi, Françoise Cortois, Claire Barrière-Cailleux, et aux autres que nous ne pouvons citer et que nous prions de nous excuser.

Les recherches ont été menées grâce au concours du Labex Futurs Urbains financé par l'Agence nationale de la recherche pour le Programme des investissements d'avenir lancé en 2010 et prolongé en 2018.

Possibilités offertes par la modélisation des interactions entre marcheurs pour le diagnostic des infrastructures pédestres

Projet Infraped – groupe MUP / Département du Val-de-Marne

Laura Echeverri Guzman et Jean-Paul Hubert en collaboration avec Jérôme Monnet et Jean-Michel Auberlet, Université Gustave Eiffel / Labex Futurs urbains

Juin 2023

Résumé

La phase précédente du projet, centrée sur l'observation des usages a montré que le confort recherché par les marcheurs sur une infrastructure pédestre, en particulier un trottoir, n'est pas uniquement corporel. Une part de confort répond à des critères d'ordre sociaux, notamment quant à la bonne distance entre son corps et celui des autres, qu'il s'agisse de la plus grande distance possible vis-à-vis d'inconnus ou au contraire de la plus petite distance avec les proches. En outre, si l'aménagement doit être accueillant pour les personnes en difficulté pour se déplacer, il peut intégrer des éléments hétérogènes exploitables par tout le monde pour faire une pause à l'écart des flux, ou par les plus valides pour contourner les obstacles. En effet, observer les marcheurs montre qu'ils sont ingénieux pour exploiter les interstices, les élargissements ponctuels, les décrochés. Du fait de l'importante plasticité des piétons, les interventions peuvent être pensées à des échelles diverses.

L'enjeu de cette phase du projet est de compléter l'analyse et la spécification de ces « espaces publics à vivre » en tant que systèmes. Nous faisons l'hypothèse qu'il est possible de les caractériser par un nombre limité d'indicateurs de commodité pour les piétons, complétant des mesures de comptage et des observations de terrain plus sommaires. La voie choisie a été de produire ces indicateurs à partir de simulations informatiques, afin qu'il soit possible de comparer des options d'aménagement différentes à l'état de projet. Les enseignements tirés de la phase précédente font ressortir quatre points qu'une modélisation des déplacements de piétons se doit de prendre en compte pour produire des indicateurs chiffrés, interprétables en termes de confort et de qualité de vie pour les usagers d'une rue.

- 1) Importance pour chaque piéton d'évaluer son espace disponible.** Le sentiment de gêne (plus aisé à définir que celui de confort) résulte de l'interaction avec les autres quand ils viennent empiéter sur l'espace que l'on veut contrôler.
- 2) Influence des obstacles physiques sur la trajectoire.** Même si cela est peu verbalisé car les obstacles fixes sont plus facilement anticipés, ils constituent des contraintes aisément observables. Les obstacles ne sont pas forcément infranchissables (exemples : grilles d'arbre, pluie qui goutte au droit des auvents, bande cyclable, bordure du trottoir). Il faut envisager que les obstacles ont des porosités variables. Les usagers eux-mêmes peuvent être plus ou moins sensibles aux obstacles et évaluer différemment cette porosité.
- 3) Diversité des comportements (individuels ou de groupe).** Le flux des marcheurs est la combinaison complexe résultant de la cohabitation de comportements différents en proportions variables. En outre, la composition des usagers change au cours de la journée.
- 4) Les piétons arbitrent entre plusieurs critères.** Ils ou elles peuvent avoir à choisir entre rester sur un trottoir encombré et traverser la chaussée pour marcher dans des conditions plus

confortables, mais cela occasionne une perte de temps et l'exposition éventuelle au risque de collision avec une voiture. Le déséquilibre observé entre les deux côtés de certaines rues (le côté accédant plus facilement à la gare étant clairement le plus chargé) montre qu'un certain niveau d'inconfort peut être toléré et préféré à d'autres comportements. Les piétons cherchent aussi probablement à minimiser leur temps de trajet, l'incertitude liée à une traversée, les changements de direction, entre autres pistes...

Les modèles utilisés ont été adaptés d'outils existant qui génèrent des piétons virtuels programmés individuellement pour suivre une certaine direction, garder une vitesse désirée tout en évitant les obstacles, fixes et mobiles qui surviennent sur leur chemin. La simulation d'un trajet permet de calculer la fréquence avec laquelle la personne simulée a changé de direction, piétiné ou été frôlée, autant de comportements qui dénoteraient une situation inconfortable. Les indicateurs instantanés sont agrégés de façon à représenter une grande quantité de trajets afin de produire une évaluation du niveau de commodité d'une infrastructure pédestre dans une configuration géométrique donnée et pour un certain niveau de fréquentation. Cette voie a été investiguée avec nos interlocuteurs du conseil départemental du Val de Marne, en imaginant des scénarios alternatifs pour un site déjà observé. Les modèles d'origine n'étaient pas prévus pour reproduire tous les comportements mis en évidence par la phase d'observation, comme, par exemple : marcher à plusieurs, s'arrêter devant une vitrine ou pour discuter avec une autre personne venant en sens inverse, franchir les limites du trottoir pour marcher sur la chaussée ou une bande cyclable... L'adaptation des modèles nécessite donc un fort investissement de programmation. Il n'a pu être réalisé que partiellement mais a permis d'insérer ces modèles dans un prototype d'outil de diagnostic composé de trois modules.

Module « Géométrie » pour représenter l'aménagement à diagnostiquer et construire l'espace dans lequel les piétons simulés vont se déplacer.

Module « Simulation de piétons » pour simuler les conditions de marche pour des types d'usage et d'usagers représentatifs des observations réalisées sur site

Module « indicateurs » pour produire un profil statistique de la géométrie selon des indicateurs de confort/gêne, à comparer à ceux d'autres options d'aménagement ou à une représentation de l'existant

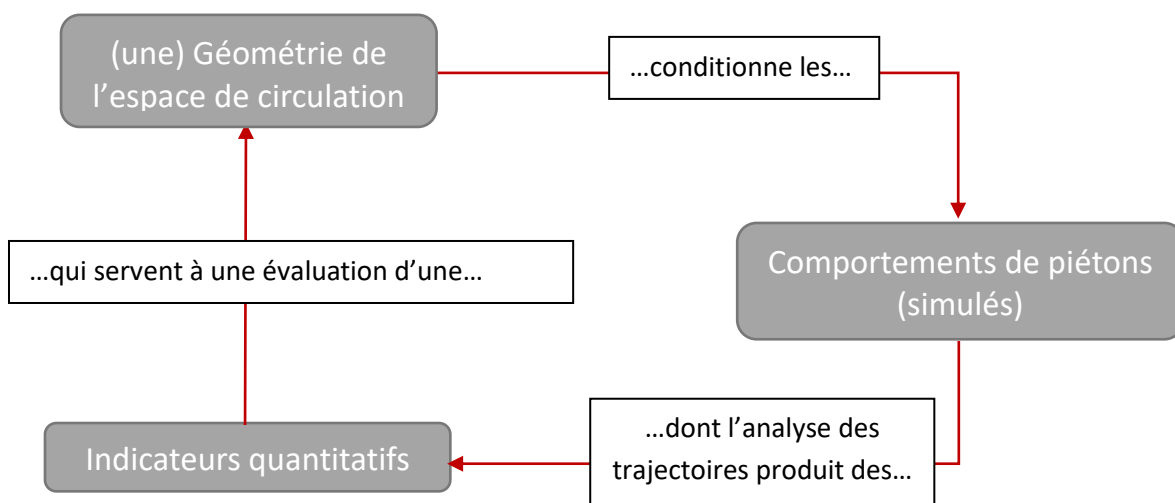


Schéma d'interaction entre les trois modules de l'outil de diagnostic

Le travail engagé a débouché sur la mise au point d'un prototype permettant de comparer par simulation trois configurations de trottoir plus ou moins dégagées. Ces trois configurations sont clairement discriminées par les indicateurs retenus, comme le montre le tableau de résultats ci-dessous.

Scénario	Somme inconfort (m ²)	Moyenne temps de promiscuité (s)	Somme variance de la vitesse
Base : avec stationnement et arbres, situation présente	590	16,0	7,83
Intermédiaire : suppression de la moitié des stationnements	305	12,4	5,33
Extrême : trottoir entièrement dégagé, 2,5 m de large	57	5,3	0,32

Explication des indicateurs :

Pour obtenir un indicateur se rapportant à un aménagement, il faut agréger les indicateurs instantanés fournis par le modèle à chaque pas de temps. Trois indicateurs sont ainsi calculés de manière relativement indépendante et se montrent remarquablement corrélés sur ces trois simulations.

- Somme de l'inconfort : c'est la réduction cumulée de la surface des espaces personnels à cause d'autre piéton, pour tous les piétons pendant leur parcours, exprimée en m²
- Moyenne des temps de promiscuité : c'est la moyenne par individu du nombre de pas de temps (0,1s) où la distance au plus proche voisin est inférieure à 1m, exprimée en secondes
- Somme des variances cumulées de la vitesse des individus pendant leur parcours : cet indicateur cumule les variations de vitesse – piétinements, accélérations éventuelles – induites par la présence des autres piétons ou d'obstacles fixes, sans unité.

S'il se confirme qu'il donne des résultats robustes, l'outil de simulation paraît potentiellement intéressant pour un diagnostic piéton, mais ce dernier reste à peaufiner ce qui n'est pas à la portée de nos moyens de recherche à court terme. De nombreux tests et confrontations sont à faire, qui impliquent un perfectionnement des codes et des interfaces utilisateur. La simulation permettrait de tester l'effet de diverses options d'aménagement. Elle devra être complétée avec l'observation des comportements, les comptages de flux et une grille d'analyse de l'infrastructure pédestre. Elle est en outre centrée sur un objectif qui se révèle plus facile à définir en termes de gêne que de confort, et dont il faut aussi s'assurer de l'importance et de la valeur qu'il a pour les piétons. Ajoutons qu'il faut aussi mieux comprendre comment cette valeur varie selon des types de personnes. Améliorer cet indicateur permettra de transformer un aménagement en intégrant son coût financier dans un calcul des gains pour la marche et des pertes pour d'autres modes de transport.

Rapport

Introduction : les objectifs de la 2^{ème} convention CD94-Labex

Ce rapport est présenté au titre de la convention CD94-Labex Futurs Urbains-UPEC signée le 7 septembre 2021. Nous rappelons d'abord les objectifs fixés par cette convention – rappelés en annexe 1 – et expliquons comment nos travaux ont voulu répondre à ces objectifs.

Le CD94 est engagé depuis plusieurs années dans une politique dirigée vers les besoins des piétons et ce qu'on appelle leur confort. Son approche a été décrite dans le Plan des Déplacements du Val-de-Marne – PDVM – de janvier 2019. Elle met en avant l'idée que les espaces publics destinés aux piétons sont des espaces « à vivre » plutôt que des espaces de circulation de type « trottoir » ou « traversée de chaussée », le premier type étant privilégié ici¹.

Le diagnostic des besoins d'intervention sur ces espaces se trouve alors confronté à deux difficultés nouvelles. D'une part, il devient plus complexe à réaliser du fait des usages multiples et variables à prendre en compte. D'autre part, il déborde du mode d'évaluation général de la voirie qui repose sur un calcul d'optimisation globale de la mobilité en termes de fluidité et de sécurité. Les enjeux de la marche sont reconnus mais se trouvent décalés par rapport à ce système d'équivalence qui a permis de répartir l'espace public de voirie entre les différents modes de transport pendant plusieurs décennies.

Vouloir améliorer le confort des piétons, sans oublier leur sécurité, et éventuellement l'animation sociale et commerciale d'une rue, conduit à réclamer plus d'espace pour les piétons, donc à prendre une partie de la voirie à d'autres usagers qui l'utilisent pour leur mobilité. Or les rétrécissements de voirie ne peuvent pas être graduels : ils sont discontinus et se traduisent par la suppression de voies de circulation ou de places de stationnement, et par le report de cette circulation, des arrêts de bus ou des stationnements vers d'autres rues et d'autres quartiers. En outre, les automobilistes, cyclistes et usagers des transports en commun ont un poids politique plus important que les piétons, même si celui-ci augmente.

Les services opérationnels ont une longue expérience d'action sur les aménagements piétons. Leurs connaissances sont complétées par des normes et dires d'experts. L'intervention des chercheurs vise à s'appuyer sur ces connaissances en leur apportant une autre perspective. Nous proposons en particulier de parvenir à une définition plus technique, moins arbitraire sans être trop réductrice du confort des piétons. Après une première phase de recherche consacrée à l'observation des usages et des piétons menée en 2019-2020, nous proposons une phase plus exploratoire en 2021-2022 visant à concevoir un outil technique qui permettrait de mieux informer les décisions d'aménagement et les arbitrages entre les besoins des usagers, en tant que piétons ou en tant qu'utilisateurs d'autres modes de transport.

¹ Les traversées de chaussées sont un élément essentiel des aménagements piétons. Il était impossible de les aborder dans le cadre de cette étude, non pas à cause du type d'outil envisagé mais parce que le confort paraît moins important que les critères de sécurité habituels pour évaluer une traversée, contrairement à l'évaluation d'un trottoir.

Les normes communes et l'échelle de confort pour des choix d'aménagement

Commençons par un rapide état de l'art des bonnes pratiques pour concevoir des aménagements confortables pour les piétons, en nous appuyant sur les publications du Cerema et de l'autorité organisatrice des transports de Londres.

Ces bonnes pratiques insistent sur la largeur des trottoirs, en profil continu ou en surlargeur locale pour répondre à des usages particuliers. Selon le Cerema² :

« Pour être adaptés aux flux et aux usages, les cheminements pour piétons nécessitent donc souvent des dimensions allant bien au-delà du 1,40 m imposé par la réglementation sur l'accessibilité : **le Cerema préconise 2,50 m**. À ces largeurs, il convient d'ajouter des espaces supplémentaires répondant aux besoins des usagers : îlots-refuges, espaces d'attente, emplacements dédiés aux commerces, végétaux, signalétique, etc.

Le confort des espaces publics est jugé « utile et nécessaire » et « **les recommandations de confort des espaces se révèlent des éléments essentiels pour adapter les espaces aux usages** », notamment « pour des espaces devant gérer un afflux important de piétons, en particulier devant des établissements scolaires, dans des rues commerçantes, ou des villes touristiques. »

L'intérêt de donner plus d'espace aux piétons soulève donc énormément de questions opérationnelles. Les réponses sont variées, comme le reconnaît encore le Cerema.

« Il y a donc un intérêt à agir sur plusieurs leviers en même temps : étendre les zones à priorité piétonne, magnifier des magistrales piétonnes en reliant confortablement les quartiers et les équipements. Il faut aussi améliorer les rues banales : toutes les rues doivent-elles être à double sens motorisé ? Le stationnement peut-il être géré différemment ? Des marges de manœuvre existent dans de nombreuses rues afin de donner de l'espace au piéton et de donner envie de marcher. »

Transport for London (TfL)³ propose un guide de diagnostic du confort pédestre – *Pedestrian comfort assessment* – (2012 et 2019, voir Annexe 2). Il s'appuie sur une recherche montrant que « le manque de confort des voies piétonnes décourage l'utilisation d'une zone par les piétons ». TfL insiste aussi sur les enjeux d'une pratique accrue de la marche en ville : « soulag[er] la pression sur les transports publics et favoris[er] des déplacements plus durables et respectueux de l'environnement, avec des avantages supplémentaires pour la santé. »

Les diagnostics doivent donc être fondés sur une observations des usages et des usagers, dans leur grande variété, mais aussi envisager tous les leviers d'action possibles, et ils sont nombreux comme le rappelle le Cerema, avant de proposer un changement discontinu dans la répartition des voies sur la chaussée.

Le groupe MUP a proposé de mobiliser des outils informatiques de simulation de comportements piétons pour envisager une réponse à ce besoin d'outil. Cet outil est basé sur le calcul d'une variable de « confort » ou plutôt son inverse (une variable de « gêne ») qui se révèle plus facile à construire et à analyser. Cependant, créer un outil opérationnel et même un prototype complet et validé

² <https://www.cerema.fr/fr/actualites/ville-confortable-pietons>

³ <https://tfl.gov.uk/corporate/about-tfl/how-we-work/planning-for-the-future/encouraging-cycling-and-walking>

empiriquement n'était pas un objectif à la portée du groupe MUP dans le cadre de cette convention. Cette démarche de conception a été néanmoins une occasion d'animer un dialogue enrichissant avec les services opérationnels du CD94 en considérant les problèmes posés par des infrastructures pédestres concrètes dépendant du département. Ce dialogue a été marqué par six séminaires animés par Laura Echeverri : 29 janvier 2021, 29 avril 2021, 25 mai 2021, 1^{er} décembre 2021, 17 mai 2022 et 5 janvier 2023, ainsi que plusieurs réunions en visioconférence. Nous en résumons rapidement la teneur.

Déroulement des échanges CD94 – Labex groupe MUP

Le premier séminaire a permis de trancher la question centrale de l'utilisation de cette variable de « gêne » qu'un modèle permettrait de traiter. Une alternative existe en effet pour comparer deux configurations d'infrastructure pédestre représentant la réalité ou des scénarios d'aménagement :

- 1) comparer la gêne entre des classes d'utilisateurs fréquentant le même espace mais s'opposant par l'âge ou la modalité de marche - seule ou accompagnée, avec un objet encombrant,
- 2) cumuler les indicateurs de gêne pour l'ensemble des usagers d'une infrastructure pédestre dans une configuration géométrique donnée.

Les deux options ne sont pas *a priori* contradictoires mais elles impliquent des priorisations différentes dans la programmation informatique. Par son caractère exploratoire, le projet avait peu de chance de réaliser un modèle complet. La première option orientait le diagnostic sur l'inclusivité de l'infrastructure, ce qui est un des attendus d'une politique publique en faveur de la marche. La seconde l'orientait sur une évaluation globale de scénarios d'aménagement en concurrence. Elle fut retenue car plus proche du mode d'intervention des services opérationnels sur l'espace public (voir annexe 3). Le défi pour cette évaluation globale est alors d'intégrer la diversité des usages et des usagers à modéliser en explicitant les priorités. Les infrastructures pédestres sont des espaces à vivre à tous les moments d'une journée et pas des tuyaux où circulent des piétons et qu'il faudrait dimensionner pour répondre à la demande de pointe. L'expression « espace à vivre » interdit, comme on l'a vu, de transposer les schémas des modèles de trafic routier aux infrastructures pédestres.

Les séminaires suivants ont permis de présenter les avancements réalisés dans la construction informatique de la variable de gêne. Le projet mené par le groupe MUP a dû évoluer. L'état de l'art en matière de modélisation des déplacements de piétons ne permettait pas de développer rapidement un outil opérationnel et validé empiriquement. Parmi les problèmes techniques rencontrés et imprévus, l'un était le plantage des modèles disponibles lorsqu'on voulait simuler des arrêts de piéton sur le trottoir, soit devant un portail de lycée, soit par affinité avec un autre piéton venant d'en face. Ces arrêts provoquaient le blocage d'autres piétons non programmés pour s'arrêter. Or le travail d'observation mené en 2020 avait montré que l'arrêt programmé de piétons virtuels est une fonctionnalité indispensable à la représentation du trottoir comme « espace à vivre ». Celle-ci doit être plus riche que le simple trottoir-tuyau où l'on ne doit faire que marcher. Il fallait disposer d'une gamme de types de marche pratiquée pour les diverses heures de la journée. Cela a demandé un effort de programmation pour intervenir dans le cœur des modèles de simulation. Etant donné le statut de chercheur post-doctoral financé par le Labex, le travail méritait ensuite d'être valorisé sous la forme d'un article scientifique, qui fut rédigé principalement par L. Echeverri et J-M Auberlet. Celui-ci a été soumis à la revue *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* au début du mois de décembre 2022.

En parallèle de ces présentations, nous avons abordé en séminaire les éléments à prendre en compte dans un diagnostic. D'abord la façon de décrire un scénario d'aménagement, autrement dit : les obstacles ou contraintes par rapport au déplacement piédestre que le modèle doit pouvoir représenter. Le STEG a transmis des plans extrêmement détaillés qu'il fallait simplifier et schématiser pour les besoins du modèle de simulation. Mais le critère de simplification n'est pas aisé à déterminer car il dépend d'abord de la sensibilité des indicateurs aux détails de représentation des obstacles. Et connaître cette sensibilité demandait un degré d'avancement dans le développement informatique qui n'a été atteint qu'à la fin du projet.

Ensuite, la discussion a été portée sur la pertinence des indicateurs qui pourraient être calculés. Dans l'hypothèse où l'on aurait pu prouver qu'ils décrivent effectivement la réalité, quels sont les chiffres qui pourraient être utilisés et peser dans un arbitrage ? Cette discussion d'abord abstraite a débouché sur la mise au point de tableaux d'indicateurs.

Des observations des déplacements piétons à leur modélisation : esquisse d'un cahier des charges pour un outil de diagnostic

Le travail d'observation et d'entretien mené par J. Scapino⁴ en 2019-2020 permet de faire ressortir quatre points qu'une modélisation des déplacements de piétons se devrait de prendre en compte pour produire des indicateurs chiffrés interprétables en termes de confort et de qualité de vie pour les usagers d'une rue.

- 1) **Importance pour chaque piéton d'évaluer son espace disponible.** Le sentiment de gêne (plus aisé à définir que celui de confort) résulte de l'interaction avec les autres quand ils viennent empiéter sur l'espace que l'on veut contrôler.
- 2) **Influence des obstacles physiques sur la trajectoire.** Même si cela est peu verbalisé car les obstacles fixes sont plus facilement anticipés, ils constituent des contraintes aisément observables. Les obstacles ne sont pas forcément infranchissables (exemples : grilles d'arbre, pluie qui goutte au droit des auvents, bande cyclable, bordure du trottoir). Il faut envisager que les obstacles ont des porosités variables, les usagers eux-mêmes pouvant être plus ou moins sensibles aux obstacles et évaluer différemment cette porosité.
- 3) **Diversité des comportements (individuels ou de groupe).** Le flux est la combinaison complexe résultant de la cohabitation de comportements différents en proportions variables. La composition des usagers change au cours de la journée.
- 4) **Les piétons arbitrent entre plusieurs critères.** Ils peuvent avoir à choisir entre rester sur un trottoir encombré et traverser la chaussée pour marcher dans des conditions plus confortables, mais cela occasionne une perte de temps et l'exposition éventuelle au risque de collision avec une voiture. Le déséquilibre observé entre les deux côtés de la rue Paul Vaillant Couturier (RD155 - le côté accédant plus facilement à la gare étant clairement le plus chargé) montre qu'un certain niveau d'inconfort peut être toléré et préféré à d'autres comportements. Les piétons cherchent aussi probablement à minimiser leur temps de trajet, l'incertitude liée à une traversée, les changements de direction, entre autres pistes...

⁴ Voir CR du 6/11/2020, annexe 3, et Scapino 2020.

Nous avons décidé d'utiliser des modèles de simulation de trajectoires des piétons qui reposent sur des stratégies d'évitement d'obstacles par rapport à une direction souhaitée. Ces modèles génèrent des points mobiles représentant les piétons dans des quantités paramétrables pour s'ajuster à des comptages faits sur le terrain. Certains types de comportement ainsi que des lieux d'arrivée ou de passage des trajectoires peuvent être paramétrés. Par exemple, il est possible de définir une classe de « lycéens » marchant relativement vite et venant se grouper devant le portail du lycée jusqu'à l'heure d'ouverture, ou une classe de « riverains âgés » plus lents, susceptibles de s'arrêter lorsqu'ils croisent une personne de leur connaissance, de s'asseoir sur un banc, entrer dans un magasin, etc.

Les positions et les vitesses de chaque « piéton simulé » sont connues à chaque pas de temps du modèle. On peut en déduire les dimensions de l'espace libre à la disposition de chaque piéton par rapport à ses voisins. En paramétrant les vitesses, les points de destination ou les dimensions de l'espace personnel souhaité, on combine des types de piétons. En définissant des obstacles, on décrit l'aménagement d'une portion de trottoir. En emboîtant des portions de trottoirs, on peut reconstituer une rue. Enfin en modélisant chez les piétons une aptitude à profiter de la porosité des obstacles, comme par exemple descendre sur la chaussée pour ne pas s'arrêter ou marcher sur une bande cyclable, on pourrait aussi estimer le niveau de risque d'accident, pour un trafic donné. L'ampleur du programme de travail s'accroît très vite et on comprendra que les deux dernières étapes n'aient pas pu être abordées. On peut néanmoins préfigurer sur cette base un outil de diagnostic et d'analyse de la voirie et avancer dans sa définition grâce à ces séminaires.

Les recherches demanderaient à être poursuivies. Pour rendre l'utilisation de modèles pleinement opérationnelle dans un outil de diagnostic, il serait nécessaire de réaliser une troisième phase d'étude impliquant un retour vers le terrain. Ainsi on pourrait s'assurer que les différences estimées au moyen des indicateurs calculés par simulation correspondent bien à des différences réellement ressenties par de vrais piétons. On validerait ainsi (ou pas) la traduction en programme informatique des enseignements extraits des observations empiriques.

Plan de la présentation des travaux

Nous terminons cette introduction par le plan de présentation d'un outil de diagnostic.

- 1) Architecture de l'outil de diagnostic
- 2) Module 1 : simulation des piétons
 - a. Description du modèle
 - b. Espace personnel et interaction
 - c. Paramétrage du flux
 - d. Paramétrage des piétons
- 3) Module 2 : Description géométrique de l'espace de circulation
 - a. Mode de représentation des espaces de circulation
 - b. Représentation des obstacles dans un élément de trottoir
 - c. Construction de scénarios
- 4) Module 3 : exploitation des indicateurs et profils statistiques
 - a. Indicateurs instantanés
 - b. Tableaux individuels
 - c. Tableaux agrégés par scénario
- 5) Enseignements du prototype

Architecture de l'outil

Le principe du modèle est qu'une géométrie de l'espace de circulation conditionne le comportement simulé de piétons virtuels dont les trajectoires produisent des indicateurs calculés, qui produisent une évaluation de cette géométrie.

L'outil se conçoit en trois modules (dans l'ordre de présentation du rapport) :

- 1) Module « Simulation de piétons » pour simuler les conditions de marche pour des types d'usage et d'utilisateurs représentatifs des observations réalisées sur site
- 2) Module « indicateurs » pour produire un profil statistique de la géométrie à évaluer en fonction des usages simulés, à comparer à ceux d'autres options d'aménagement ou à une représentation de l'existant
- 3) Module « Géométrie » pour représenter l'aménagement à diagnostiquer en tant qu'espace dans lequel les piétons simulés vont se déplacer.

La figure 1 présente le schéma d'interaction entre les trois modules. Le modèle implante la proposition suivante : une **géométrie de l'espace de circulation** conditionne les **comportements de piétons** dont l'analyse des trajectoires produit des **indicateurs quantitatifs** de vitesse, débit, confort ou gêne, etc., qui servent à une évaluation de la géométrie. La présentation qui suit commence par le module simulation car c'est la partie la plus originale de la recherche et celle où l'investissement de recherche a été la plus importante. Elle se termine par celle du module d'indicateurs qui ouvre sur les perspectives les plus larges en terme d'exploitations, et les plus à même à faire continuer le débat entre recherche et services opérationnels.

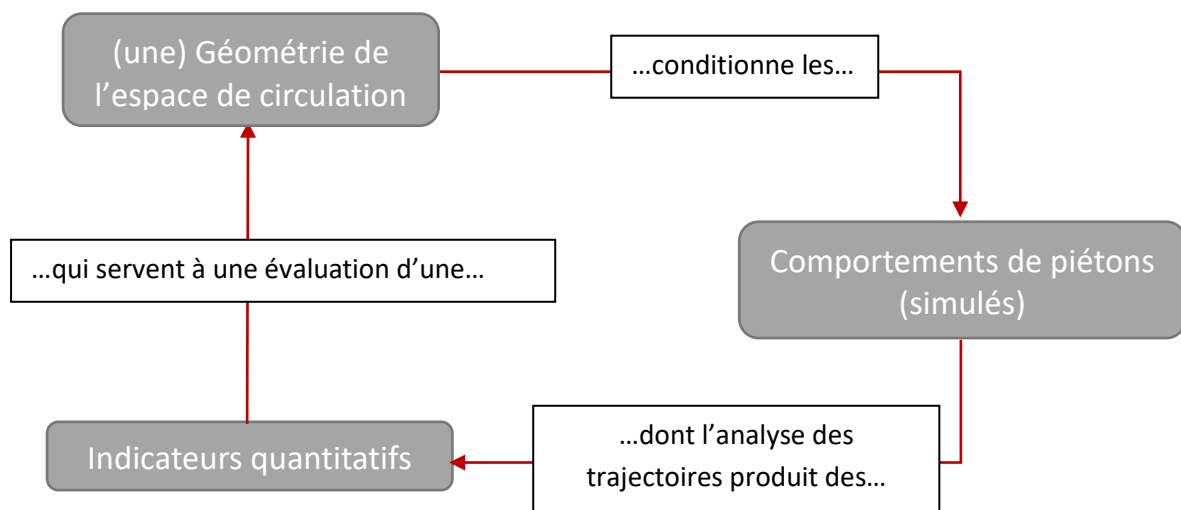


Figure 1. Schéma d'interaction entre les trois modules de l'outil de diagnostic

Comportements de piétons (simulés)

a. Description du modèle

Les algorithmes de simulation de foule peuvent être regroupés en deux grandes catégories : macroscopique et microscopique. Les modèles macroscopiques représentent la foule comme un fluide continu soumis aux lois de conservation de la dynamique des fluides. En considérant la foule comme une seule matière, ils masquent toute différence entre les piétons. Les modèles microscopiques traitent les piétons comme des agents individuels interagissant les uns avec les autres. De cette façon, l'interaction humaine peut être modélisée par l'influence que les agents voisins exercent les uns sur les autres. À cette fin, à chaque pas de temps (par exemple un dixième de seconde), une nouvelle vitesse est calculée pour chaque agent en fonction des agents voisins et des obstacles, et des règles prescrivant son comportement local (van Toll, 2021). En donnant à chaque agent son autonomie, les modèles microscopiques permettent de refléter la variété des façons dont les piétons affectent le comportement des autres.

Pour modéliser le comportement des piétons nous avons utilisé un modèle microscopique géométrique basé sur la vitesse. Dans ce type de modèle, chaque agent choisit sa prochaine vitesse parmi un ensemble de vitesses réalisables. Pour ce faire, il évalue ces vitesses possibles à l'aide de certains critères (comme le fait d'éviter les collisions avec les obstacles et avec les autres agents) et sélectionne la meilleure vitesse parmi celles-ci. De cette façon, les agents recherchent activement un chemin libre à travers la foule. Dans notre modèle, les piétons sont représentés par des cercles qui se déplacent dans une surface à deux dimensions. La figure 2 présente un exemple de configuration avec huit piétons. Sur la figure 2 (a) les flèches indiquent les vitesses instantanées des piétons. La figure 2 (b) présente la traduction de cette configuration dans l'espace de vitesses pour le piéton A : la région en pointillés contient les vitesses possibles de A, compte tenu de la répartition de tous les autres piétons. Si le piéton A décide de bouger dans le prochain pas de temps à une vitesse qui appartient à cette région, il n'entrera pas en collision avec un des piétons qui l'entourent.

Le paramétrage des agents et des obstacles peut être plus ou moins complet et dépend de la sophistication du modèle. Il est en particulier possible de définir plusieurs lieux de destination, ainsi que plusieurs positions d'origine pour modéliser des flux transversaux tels que des arrêts de bus, des traversées de chaussée, des entrées d'établissement scolaire. Le modèle peut ainsi s'adapter à des géométries bien plus compliquées que le trottoir « tuyau » bidirectionnel.

Des piétons sont injectés dans un espace de circulation. Le nombre de piétons dans chaque sens et depuis chaque point d'entrée est paramétrable pour s'ajuster aux nombres fournis par des comptages. Les piétons-agents peuvent aussi être paramétrés différemment pour représenter la diversité des usagers de l'infrastructure pédestre, notamment en âge ou motif de déplacement.

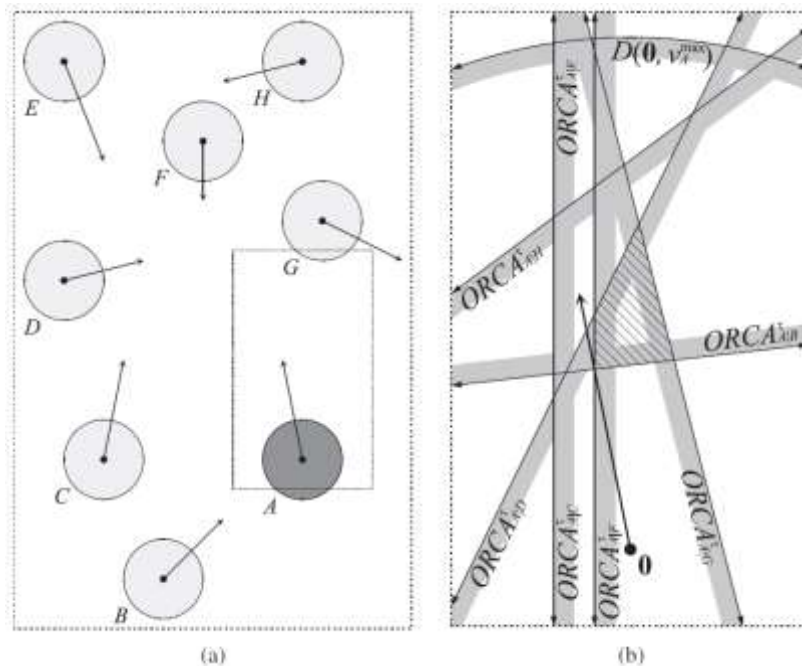


Figure 2. (a) Une configuration avec huit piétons. Leurs vitesses actuelles sont indiquées par des flèches. (b) Les demi-plans des vitesses autorisées pour le piéton A induites par chacun des autres piétons. La région en pointillés contient les vitesses d'A qui sont autorisées par rapport à tous les autres piétons. La flèche indique la vitesse actuelle d'A. Source : van den Berg et al. (2011)

b. Espace personnel et interaction

La modélisation d'une variable « confort/gêne » s'appuie sur le résultat des entretiens réalisés par J. Scapino dont il ressortait que ce sentiment dépendait des interactions avec les autres piétons et de leur intrusion dans un espace personnel où ils souhaitent être libres de leurs mouvements. Nous avons interprété ce résultat des entretiens dans le cadre de la théorie proxémique d'E.T. Hall (Hall, 1966). La distance qu'une personne met avec les autres personnes avec lesquelles elle interagit dépend, entre autres, de son degré d'intimité avec elles, et de ses habitudes culturelles. Ainsi, en fonction du contexte, la personne maintient une certaine distance avec les autres, y compris lorsqu'elle marche. Les gens construisent mentalement un espace personnel autour d'eux, qu'ils considèrent comme le leur. L'espace personnel a selon Hall une dimension de 45 cm à 125 cm autour des individus, dont les violations sont inconfortables et perçues comme des intrusions. Ces violations peuvent provoquer des réponses physiologiques telles que l'accélération du rythme cardiaque, la transpiration et l'augmentation de la pression artérielle (Engelniederhammer, 2019 ; Middlemist, 1976).

Ainsi, un piéton doit adapter son mouvement pour préserver son espace personnel, lorsqu'il rencontre un autre piéton ou un objet. Si le changement de trajectoire est insuffisant pour maintenir cet espace inviolé, le niveau de confort du piéton diminue (Evans, 2007 ; Duverné, 2020). Néanmoins, les interactions entre piétons peuvent être vécues de différentes manières. Selon le contexte, la proximité avec d'autres individus peut être désirée et même recherchée (par exemple, lorsqu'on marche avec un membre de la famille ou un ami), tandis que la proximité avec des individus non familiers peut être liée à des sentiments négatifs de promiscuité (Kaya, 1999).

Pour implanter une telle variable dans le modèle, il faut fixer 1) la géométrie de cet espace personnel, 2) l'objet géométrique qui est attaché à chaque autre piéton en interaction avec « ego » et vient intersecter son espace personnel. Nous nous appuyons sur ce qui a été fait par Cepolina et al. (2018). Selon la littérature, l'espace personnel peut avoir la forme d'une goutte située en avant du piéton « ego », car les personnes sont plus exigeantes quant au respect de leur espace frontal (voir figure 3). Comme le facteur critique de l'interaction entre piétons est la distance entre « ego » et les autres usagers, le modèle calcule à chaque instant un diagramme de Voronoï qui recouvre l'espace de circulation par des polygones centrés sur les piétons-agents dont les arêtes sont situées à égales distances des deux piétons les plus proches dans chaque direction (figure 4). De cette manière, le modèle calcule pour chaque piéton la région des points qui sont plus proches de ce piéton que des autres, c'est-à-dire, l'espace dont le piéton estime disposer actuellement (son espace disponible).

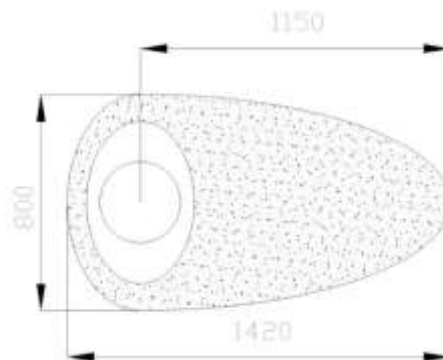


Figure 3. Forme de l'espace personnel pour un adulte qui marche de gauche à droite [mm]. Source : Cepolina et al. (2018)

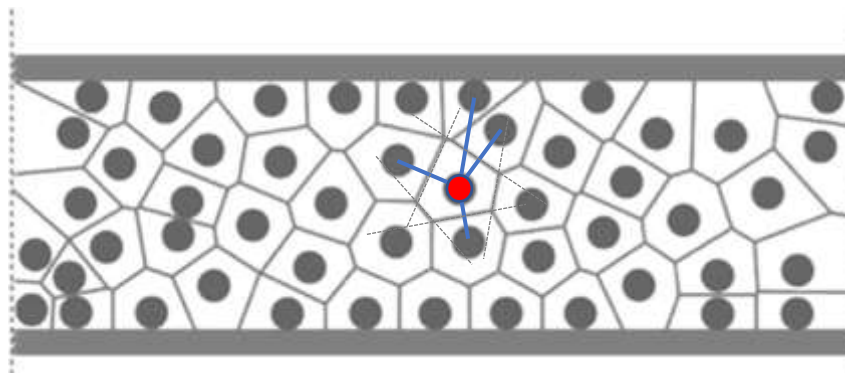


Figure 4. Un exemple de la construction du diagramme de Voronoï. Source : Cepolina et al. (2018)

L'expérience individuelle est ainsi caractérisée par un niveau de gêne, donc l'inverse d'un niveau de confort, lié à l'impossibilité de maintenir un espace libre adéquat autour de soi en raison des interactions avec les autres piétons. À chaque pas de temps, compte tenu des positions des piétons, chaque piéton perçoit un niveau de confort individuel. Le niveau de confort perçu dépend de l'espace dont le piéton estime disposer actuellement (espace disponible) et de l'espace dont il a besoin (espace personnel). Si l'espace requis est entièrement contenu dans l'espace disponible actuel, le confort individuel actuel est maximal, sinon le confort diminue. Le niveau de gêne est quantifié pour chaque piéton en fonction de l'extension (m^2) de son espace requis (espace personnel) qui se trouve en dehors de sa région de Voronoï (figure 5).

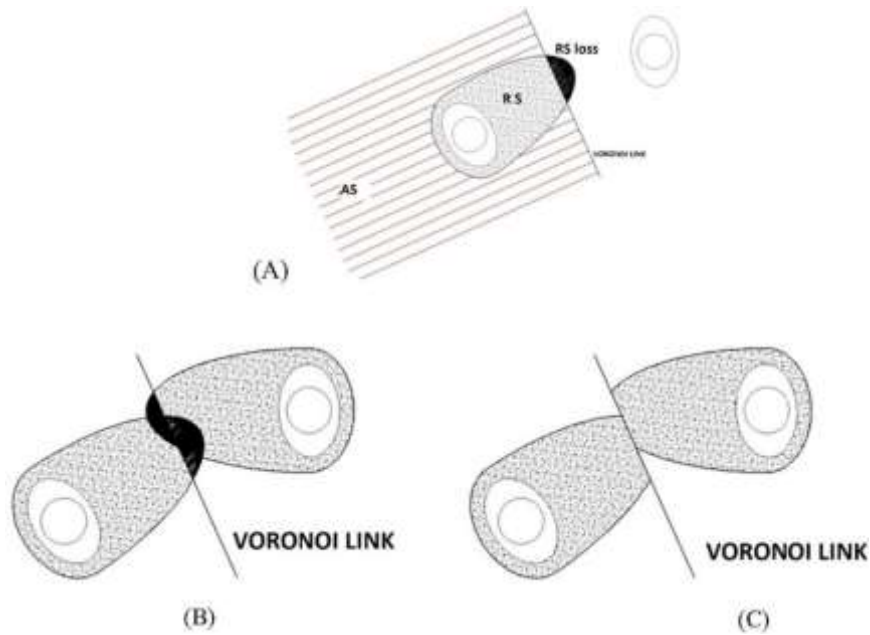


Figure 5. Espace disponible et espace personnel
 Les piétons sont représentés en blanc, l'arête (Voronoi link) définit la frontière entre deux espaces disponibles adjacents ; les espaces personnels sont marqués en gris et les pertes d'espace personnels sont marqués en noir. Source : Cepolina et al. (2018)

On dispose donc à chaque instant d'une variable quantitative de gêne individuelle. La somme pour tous les agents pendant une durée donnée est un indicateur de la gêne globale pour un flux de piétons donné dans un espace de circulation modélisé.

c. Paramétrage du flux

Les comptages sur trottoir faits par CDVia en mars 2020 ont permis de constater une différence des flux Nord-Sud et Sud-Nord, surtout en semaine aux heures de pointe du matin (07h30-09h30) et du soir (17h30-19h30). Pour reproduire ce phénomène dans la simulation, nous avons approximé avec une loi de Poisson le nombre de piétons qui arrivent sur les trottoirs de chaque côté (figure 6) ; son paramètre λ est égal à la moyenne du nombre de piétons comptés par pas de 3 minutes dans la plage horaire en considération. De cette manière, les différents flux entrants selon les horaires peuvent être pris en compte dans la simulation.

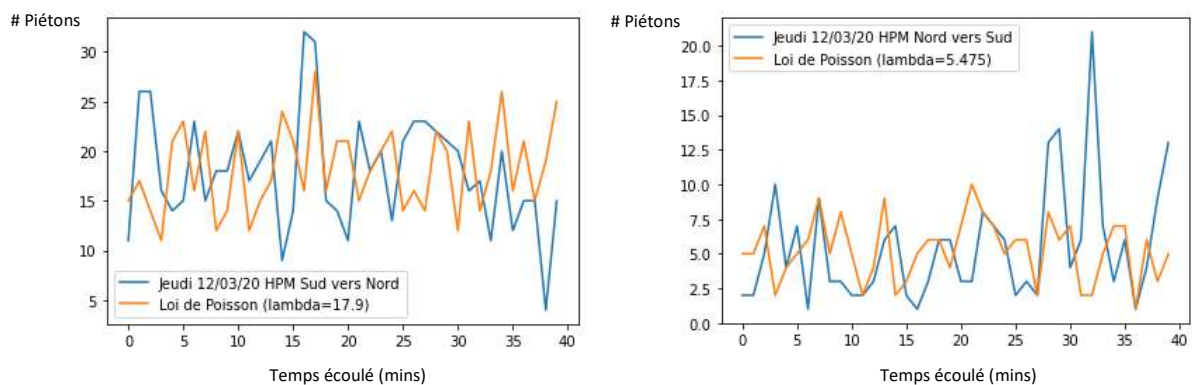


Figure 6. Paramétrage des flux de piétons simulés

d. Paramétrage des piétons

Dans l'état actuel du modèle, les caractéristiques des piétons qui peuvent être paramétrées sont les suivantes :

- Taille (diamètre du cercle)
- Vitesse préférentielle maximale
- Position initiale, destination finale et intermédiaire (s'arrêter devant l'école avant son ouverture)

La modélisation de différents comportements a également été testée, avec des résultats plus ou moins aboutis. Leur inclusion dans la simulation finale demande d'une part un effort supplémentaire en programmation et d'autre part, la définition de ceux qui sont plus pertinents pour le cas d'étude. Parmi les comportements on trouve :

- Propension à ralentir devant un obstacle
- Propension à s'arrêter
- Anticipation à éviter les groupes et les piétons arrêtés
- Marcher ensemble avec quelqu'un

Géométrie de l'espace de circulation

a. Mode de représentation des espaces de circulation

L'étude s'appuie sur l'analyse des conditions de marche dans la RD155 à Vitry-sur-Seine. L'infrastructure piétonne est un espace très encombré et de forme très variable (figure 7). Il existe des représentations à grande échelle, nécessaires notamment à la gestion des travaux qui s'y déroulent souvent, qu'ils concernent les réseaux souterrains, les stationnements ou l'entretien des végétaux, entre autres. La modélisation d'un espace de circulation réel ou projeté est donc une tâche lourde de programmation.

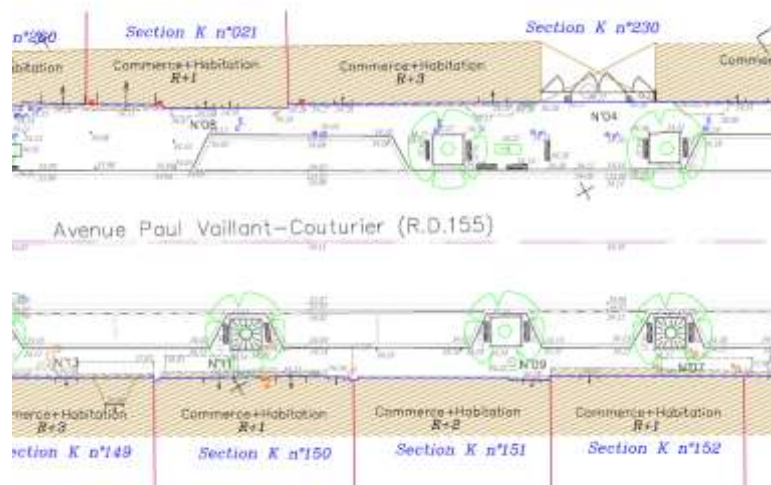


Figure 7. Extrait du plan topographique de l'avenue Paul Vaillant Couturier, Vitry-sur-Seine

Il est important de remarquer que dans l'esprit de cette modélisation, **les indicateurs que l'on cherche à calculer peuvent être additifs**, c'est-à-dire que la somme des valeurs de la variable de gêne de deux éléments d'espace de circulation (deux portions voisines de trottoir par exemple) est assimilable à celle de l'espace qui en est la réunion, pourvu que les flux d'entrée et de sortie soient compatibles. La modélisation de la géométrie de l'espace de circulation peut donc être réalisée par morceaux.

On pourrait donc avoir intérêt à isoler des morceaux de tronçons contenant une entrée d'établissement scolaire, un arrêt de bus, ou les tronçons jouxtant un carrefour, mais les coupures doivent obéir à des règles qu'il faudra déterminer.

b. Représentation des obstacles dans un élément de trottoir

L'espace de circulation est modélisé par un plan dans lequel des obstacles, représentés par des polygones, délimitent les surfaces sur lesquelles les piétons peuvent circuler. De cette manière, des murs, des arbres, des places de parking et même la chaussée sont schématisés par des polygones dont la forme reproduit approximativement la projection au sol. Les quadrilatères sont la forme la plus simple pour cette représentation.

Dans l'état actuel du modèle, les obstacles sont modélisés comme des positions interdites de façon permanente, c'est-à-dire de longue durée par rapport au flux de circulation piétonne. C'est ainsi qu'on représente des arbres ou des places de stationnement remplies selon un taux d'occupation moyen (figure 8).

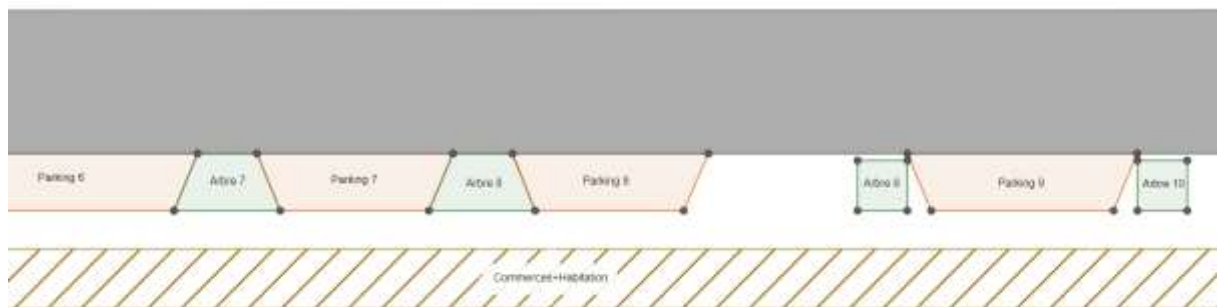


Figure 8 : Représentation des obstacles dus aux arbres et au stationnement

Cette interdiction pourrait être calculée aux différentes itérations du modèle. Par exemple : une bande cyclable jouxtant un trottoir pourrait être interdite dès qu'un cycliste se trouve à moins d'une distance seuil, et cette interdiction pourrait être adaptée en fonction de différents types de piétons. Il n'y a donc pas de limitation technique, seulement une limitation du temps nécessaire à la programmation informatique. Or cette programmation ne peut pas être prioritaire par rapport à la tâche de construction et d'évaluation des indicateurs de confort/gêne.

L'évaluation des indicateurs pose deux problèmes. D'une part, il faut savoir dans quelle mesure les variables calculées par simulation peuvent traduire des ressentis et des comportements réels observés grâce à des travaux de terrain. D'autre part, il faut savoir si le calcul des indicateurs réagit bien à des changements de détail de la géométrie, comme le déplacement du mobilier urbain (bancs, candélabres...). Si les indicateurs varient peu pour ces petits changements de géométrie, cela signifie que le modèle ne peut évaluer que des options assez radicales de réaménagement d'une infrastructure pédestre, comme par exemple : la suppression de toute la végétalisation ou le doublement de la largeur d'un trottoir par récupération de toutes les places de stationnement, etc.

c. Construction des scénarios

L'analyse des scénarios qui est proposée dans ce prototype vise à représenter quelques grandes options d'aménagement mais aussi à évaluer la sensibilité des indicateurs et leur capacité à réagir à des options d'aménagement plus ou moins radicales. Ne s'appliquant qu'à un tronçon de la RD155,

très schématiquement représentée, les résultats de cet exercice ne peuvent pas avoir d'application pratique pour l'aménagement de cette voie. Ces résultats sont d'ailleurs, comme on le verra, parfaitement prévisibles et ils nous servent d'abord à confirmer le potentiel d'utilisation des modèles.

Les discussions avec le STEG avaient fait émerger trois types de scénarios à partir de la description simple de la figure 9 réduite à une représentation des arbres et des places de stationnement. Ces images montrent des rectangles représentant des places de parking (mais dans la simulation, les objets ont bien une forme trapézoïdale) :

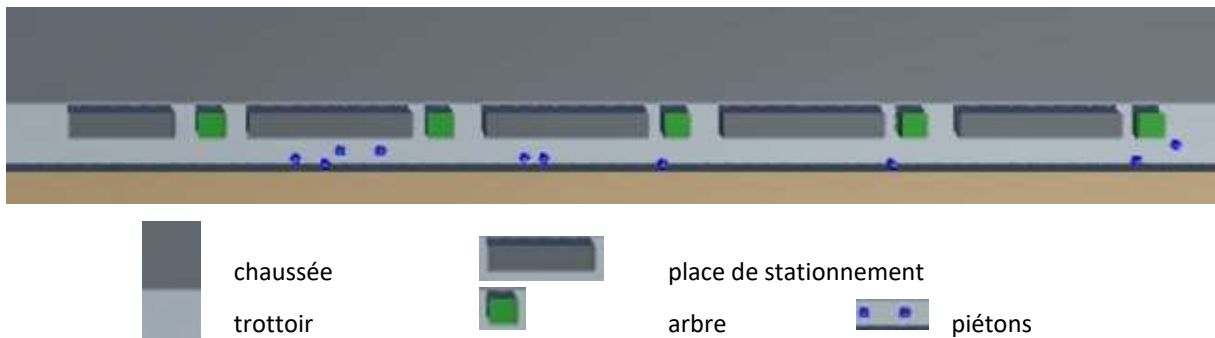


Figure 9 : **Scénario 1** : Conservation des arbres et des places de stationnement



Figure 10 : **Scénario 2 (intermédiaire)** : supprimer un nombre variable de places de stationnement (même légende que Fig. 9)



Figure 11 : **Scénario 3 (extrême)** : suppression de tous les stationnement, arbres et candélabres sur le trottoir sud, coté gare (même légende que Fig. 9)

Module d'exploitation du profil statistique tiré des indicateurs

Indicateurs quantitatifs

La construction des profils statistiques se fait par une agrégation à deux niveaux : la trajectoire d'un piéton et l'ensemble des piétons circulant pendant une même durée de simulation.

a) Indicateurs instantanés

A chaque pas de temps de 0,1 seconde et pour chaque piéton simulé, on dispose en particulier des quantités suivantes (pour la liste complète, voir annexe 4) :

- ▶ Position
- ▶ Vitesse scalaire
- ▶ Rapport entre la vitesse de parcours et la vitesse préférentielle
- ▶ Angle avec le cap souhaité
- ▶ Distance parcourue
- ▶ Distance avec le voisin le plus proche
- ▶ Inconfort : espace personnel disponible

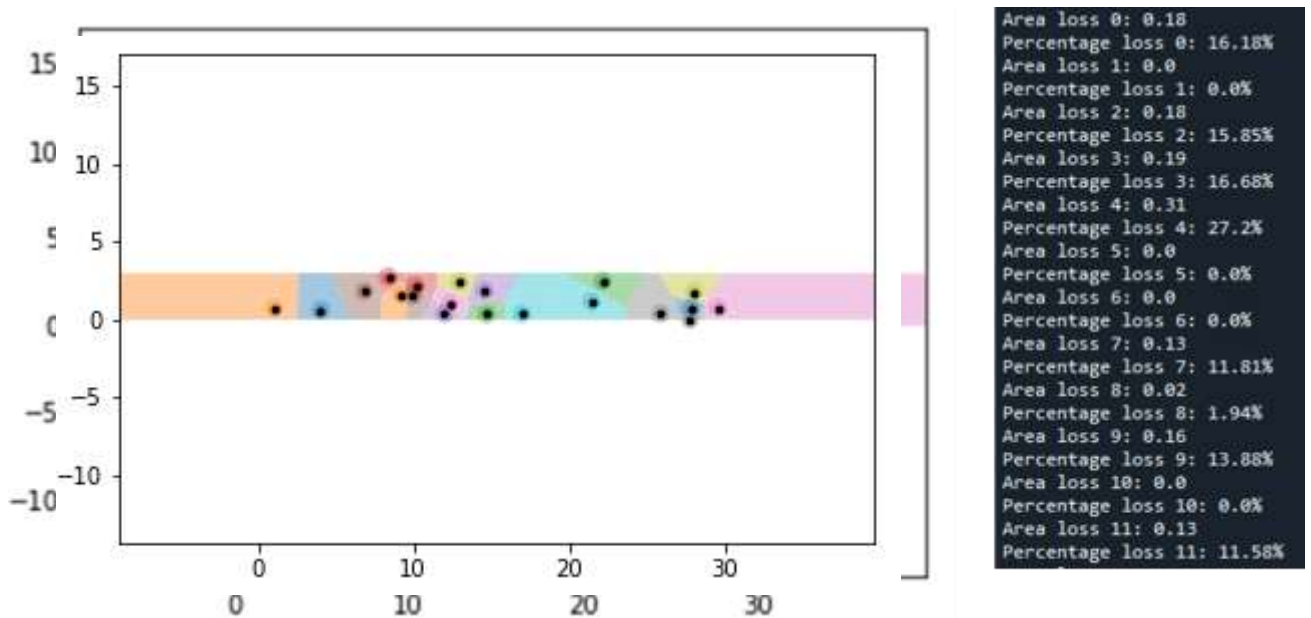


Figure 12 : Indicateurs instantanés pour une distribution spatiale des piétons à un instant t

Ces mesures sont les informations d'entrée du module de production des indicateurs.

b) Tableaux individuels

Les tableaux individuels sont constitués par les lignes des indicateurs instantanés calculés à chaque pas de temps. Sur l'exemple ci-dessous, les valeurs surlignées correspondent à des phases où un piéton se trouve en grande proximité avec d'autres piétons, qui parfois empiètent son espace personnel, ce qui conduit à des adaptations de trajectoire et des changements de direction (figure 13).

Figure 13 : Tableau individuel : description de la trajectoire de piétons avec une ligne par pas de temps

Explications :

- la colonne E indique la vitesse de déplacement perpendiculairement au sens du trottoir, donc un changement de direction en cas de valeur non nulle : un écart par rapport à la ligne de désir
- la colonne H indique la distance au piéton le plus proche ; les phases de proximité correspondent à des faibles distances (moins d'un mètre)
- les colonnes H et G indiquent la part d'espace personnel rognée par d'autres piétons proches (en surface absolue ou en part relative de l'espace personnel souhaité).

Les tableaux individuels seront résumés en une ligne par piéton grâce à des opérations statistiques sur les colonnes.

c) Tableaux agrégés par scénario

Le tableau des indicateur par scénario d'aménagement est obtenu par agrégation des indicateurs résumant les trajectoires individuelles pour des simulations correspondant aux différents scénarios. Le point de départ est un tableau dont chaque ligne correspond à un piéton virtuel (figure 14).

Figure 14 : Tableau par scénario : une ligne par trajectoire piéton avec les indicateurs agrégés au niveau individuel

Explication :

- Les colonnes F et G indiquent la somme des colonnes H et G du tableau précédent individuel, soit les pertes d'espace personnel cumulées pendant tout le parcours du trottoir.
- La colonne H indique le nombre de lignes (pas de temps de 0,1 s) où la distance au plus proche voisin est inférieure à 1 m, donc la durée des phases d'interaction rapprochée
- La colonne M indique le premier quartile des distances au plus proche voisin. Elle signifie que pendant une durée cumulée équivalent au quart du parcours, un piéton se trouvait à moins de cette valeur de l'individu de la ligne
- La colonne G indique la vitesse moyenne pendant le parcours

Les piétons virtuels n'ont pas tous été gênés de la même façon. Il est donc important de calculer le profil agrégé de l'aménagement à partir d'un grand nombre de trajectoires simulées. Le profil en tirera la robustesse nécessaire. Voici cinq exemples d'indicateurs agrégés pour constituer le profil de l'aménagement (tableau 1) :

- Somme de l'inconfort : réduction cumulée de la surface des espaces personnels à cause d'autres piétons, pour tous les piétons pendant tout un parcours (somme des colonnes F du tableau individuel)
- Moyenne des temps de promiscuité : moyenne par individu du nombre de pas de temps (0,1s) où la distance au plus proche voisin est inférieure à 1m
- Moyenne des distances moyennes au plus proche voisin pendant tout un parcours
- Moyenne des vitesses moyennes individuelles

- Somme des variances cumulées de la vitesse des individus pendant leur parcours. Cet indicateur cumule les variations de vitesse – piétinements, accélérations éventuelles – induites par la présence des autres piétons ou d’obstacles fixes.

Scénario	Somme inconfort (m ²)	Moyenne temps de promiscuité (s)	Moyenne distance au plus proche voisin (m)	Moyenne vitesse (m/s)	Somme variance de la vitesse
Base	590,14	16,0	4,28	1,36	7,83
Intermédiaire	304,91	12,4	4,55	1,40	5,33
Extrême	56,51	5,3	5,08	1,43	0,32

Tableau 1 : Comparaison des indicateurs agrégés par scénario

On remarque dans le tableau 1 l’excellente cohérence entre les trois indicateurs d’inconfort, promiscuité et variance des vitesses, qui sont calculés de manière indépendante (figures 15 et 16).

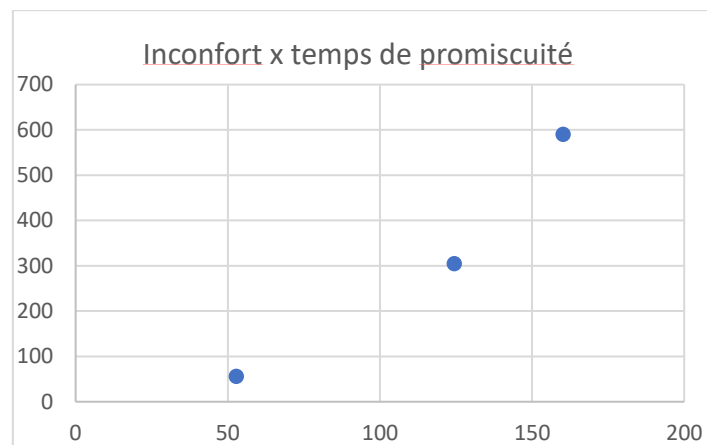


Figure 15 : Indicateurs agrégés d’inconfort et de temps de promiscuité pour trois scénarios

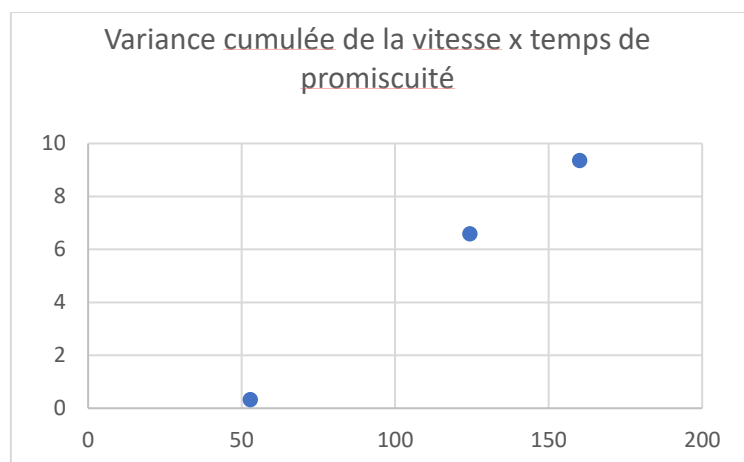


Figure 16 : Indicateurs agrégés de variance de la vitesse et de temps de promiscuité pour trois scénarios

Enseignements et perspectives apportés par le prototype

S'il se confirme qu'il donne des résultats robustes, l'outil de simulation paraît potentiellement intéressant pour un diagnostic piéton, mais ce dernier reste à peaufiner ce qui n'est pas à la portée de nos moyens de recherche à court terme. De nombreux tests et confrontations sont à faire, qui impliquent un perfectionnement des codes et des interfaces utilisateur. La simulation permettrait de tester l'effet de diverses options d'aménagement. Elle devra être complétée avec l'observation des comportements, les comptages de flux et une grille d'analyse de l'infrastructure pédestre. Elle est en outre centrée sur un objectif qui se révèle plus facile à définir en termes de gêne que de confort, et dont il faut aussi s'assurer de l'importance et de la valeur qu'il a pour les piétons. Ajoutons qu'il faut aussi mieux comprendre comment cette valeur varie selon des types de personnes. Améliorer cet indicateur permettra de transformer un aménagement en intégrant son coût financier dans un calcul des gains pour la marche et des pertes pour d'autres modes de transport.

Dans un premier temps, de nombreux tests de robustesse seraient à faire sur la sensibilité des indicateurs synthétiques au niveau du flux piéton, à la largeur d'un trottoir, au nombre et à la taille des obstacles. Un exemple a été évoqué à la réunion du 14/12/22 : lorsqu'on élargit un trottoir à flux constant, l'indicateur de gêne doit décroître rapidement puis tendre vers zéro ; pour chaque niveau de flux, on pourrait donc calculer par simulation la largeur de trottoir à partir de laquelle l'indicateur de gêne est stabilisé. Si la robustesse des indicateurs est avérée, les résultats des simulations doivent ensuite être confrontés au terrain. On peut vérifier par exemple que les interactions ne produisent effectivement pas de gêne pour les flux et les largeurs indiquées grâce aux simulations envisagées ci-dessus. Dans des situations où la gêne peut être observée et modélisée, il faudrait interroger les piétons sur leur ressenti, etc. Cette confrontation devrait faire l'objet d'un plan et utiliser plusieurs moyens d'observation.

Le travail réalisé dans cette collaboration entre MUP et le CD94 aura peut-être permis d'imaginer comment tirer plus de profit des méthodes traditionnelles (observation ethnographique, entretiens, comptages) en les combinant avec l'outil de simulation. Quatre points sont à garder en mémoire pour concevoir un aménagement minimisant l'impression de gêne produite par les interactions avec les autres usagers : i) sauvegarder l'espace personnel des piétons dans les interactions avec d'autres usagers à pied ou véhiculés (donc plus intrusifs), ii) évaluer l'impact variable des obstacles physiques, iii) observer les usages et leur temporalité car ils se combinent différemment selon les moments de la journée ; iv) enfin, replacer chaque élément de trottoir dans un réseau où les flux pédestres se répartissent en circulant.

Il faut aussi continuer à réfléchir aux valeurs mises en avant comme objectifs d'une politique en faveur de la marche. La notion de « confort » paraît un objectif consensuel mais ne connote-t-elle pas une vision idéalisée de l'espace public et de son usage pédestre ? Marcher sur un trottoir ne sera jamais aussi « confortable » qu'être assis sur un fauteuil chez soi ou dans sa voiture, et ce n'est sans doute pas à cela qu'il faut réduire la qualité de marche. Le confort n'est-il pas d'abord une valeur privée, peu adaptée à l'espace public dans une situation d'exposition directe aux autres usagers ? La notion de commodité semble plus pertinente pour rendre compte des différents services que rend la marche, y compris en donnant accès à des destinations recherchées. Cela nous semble être la raison pour laquelle la conceptualisation des objectifs et des indicateurs a vite inversé la perspective : du confort à améliorer vers la gêne à minimiser. Se déplacer, stationner dans l'espace public, surtout si c'est en compagnie d'autres personnes est une activité demandant de l'attention. Un aménagement commode devrait d'abord ne pas rendre les choses plus difficiles, contrairement à ce que on peut encore observer dans des interventions récentes sur la voirie.

Références

Fruin, J., Designing for Pedestrians: A Level-of-Service Concept. *Highway Research Record*, Vol. 355, No. 355, 1971, pp. 1–15.

Station planning standards and guidelines, Transport for London, 2012.

Pedestrian Comfort Guidance for London, Guidance Document, Transport for London, 2019.

van Toll, W. and J. Pettré, “Algorithms for microscopic crowd simulation: Advancements in the 2010s,” in *Computer Graphics Forum*, vol. 40, no. 2. Wiley Online Library, 2021, pp. 731–754.

van den Berg, J., S. J. Guy, M. Lin, and D. Manocha, *Reciprocal n-Body Collision Avoidance*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2011, vol. 70, ch. Chapter 1, pp. 3–19. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-19457-3_1.

Hall, E. T., *The hidden dimension*, Vol. 609. New York: Anchor Books; Doubleday & Company, Inc, 1966.

Engelniederhammer, A., G., Papastefanou, and L. Xiang, Crowding density in urban environment and its effects on emotional responding of pedestrians: Using wearable device technology with sensors capturing proximity and psychophysiological emotion responses while walking in the street. *Journal of Human Behavior in the Social Environment*, Vol. 29, No. 5, 2019, pp. 630–646.

Middlemist, R. D., E. S. Knowles, and C. F. Matter, Personal space invasions in the lavatory: suggestive evidence for arousal. *Journal of personality and social psychology*, Vol. 33, No. 5, 1976, p. 541.

Evans, G. W., and R. E. Wener, Crowding and personal space invasion on the train: Please don't make me sit in the middle. *Journal of Environmental Psychology*, Vol. 27, No. 1, 2007, pp. 90–94.

Duverné, T., T. Rougnant, F. Le Yondre, F. Berton, J. Bruneau, K. Zibrek, J. Pettré, L. Hoyet, and A.-H. Olivier, Effect of Social Settings on Proxemics During Social Interactions in Real and Virtual Conditions. In *International Conference on Virtual Reality and Augmented Reality*, Springer, 2020, pp. 3–19.

Kaya, N. and F. Erkíp, Invasion of personal space under the condition of short-term crowding: A case study on an automatic teller machine. *Journal of Environmental Psychology*, Vol. 19, No. 2, 1999, pp. 183–189.

Cepolina, E. M., F. Menichini, and P. G. Rojas, Level of service of pedestrian facilities: Modelling human comfort perception in the evaluation of pedestrian behaviour patterns. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Vol. 58, 2018, pp. 365–381.

Scapino, J. Les interactions entre marcheurs et infrastructure pédestre sur deux voies départementales du Val-de-Marne. Projet Infraped – Groupe MUP / Département du Val-de-Marne. Rapport de recherche, 06/09/2020

Table des matières

Résumé.....	3
Introduction : les objectifs de la 2 ^{ème} convention CD94-Labex	6
Les normes communes et l'échelle de confort pour des choix d'aménagement	7
Déroulement des échanges CD94 – Labex groupe MUP.....	8
Des observations des déplacements piétons à leur modélisation : esquisse d'un cahier des charges pour un outil de diagnostic	9
Plan de la présentation des travaux.....	10
Architecture de l'outil.....	11
Module de simulation des comportements de piétons	12
Module de représentation géométrique de l'espace de circulation	17
Module d'exploitation du profil statistique tiré des indicateurs	20
Enseignements et perspectives apportés par le prototype	24
Références.....	25
Table des matières	26
Annexes	27
Annexe 1 : Extrait de la convention CD94-Labex	27
Annexe 2 : Les niveaux de service définis par Transport for London.....	28
Annexe 3 : Compte-rendu de la réunion du 6/11/2020.....	30
Annexe 4 : Liste des indicateurs produits par le modèle et agrégations	35

Annexes

Annexe 1 : Extrait de la convention CD94-Labex

PREAMBULE

[...]

Une première phase a permis de mieux cerner ce que peut être une infrastructure pédestre et les critères de la voirie (géométriques et fonctionnels) impactant la marche. Une seconde phase du projet a consisté à développer, une approche complémentaire, davantage sociologique, basée sur l'observation des piétons sur le terrain et sur la réalisation d'entretiens des usagers piétons. Des analyses quantitatives (comptages piétons sur trottoirs et traversées piétonnes) sont venues confirmer les analyses qualitatives. Ces méthodes quantitatives et qualitatives ont été testées et particulièrement approfondies sur deux sites.

Ce projet d'études a montré que la conception des espaces pour mieux accueillir le piéton dépend ainsi d'une combinaison de facteurs complexes, liés aux caractéristiques de la voirie, à l'environnement urbain, au volume global des piétons, à la diversité des comportements pédestres observés.

Afin de pouvoir mieux prendre en compte le piéton dans nos projets, il est nécessaire d'aller plus loin dans l'élaboration des méthodes de diagnostic de la voirie dans son environnement urbain.

[...]

ARTICLE 3. CONTENU DU PROJET D'ETUDE

Le projet d'étude doit aboutir à construire une capacité de diagnostic et d'analyse de la voirie. Il s'appuiera sur les travaux déjà réalisés, croisant les approches techniques et fonctionnelles de la voirie et les approches d'observation des pratiques pédestres, notamment mises en œuvre sur l'avenue Paul Vaillant Couturier à Vitry. Il doit ainsi compléter l'analyse et la caractérisation de nos routes départementales, ces « espaces publics à vivre », et proposer d'y associer :

- Des méthodes d'observations et de diagnostic à mettre en place,
- Des types d'intervention envisagés sur les trottoirs, la chaussée pour développer la marche.

L'outil de diagnostic fera appel à des techniques de modélisation des déplacements piétons et utilisera les mesures, données et résultats d'observation fournis par le conseil départemental.

La méthodologie, l'analyse des résultats seront exposés dans un rapport

Les éléments produits serviront d'aide à la décision pour les services opérationnels.

La méthode et les résultats seront présentés en groupe de travail « Labex » regroupant les chercheurs et les services opérationnels

Annexe 2 : Les niveaux de service définis par Transport for London

Transport for London (TfL) a édité un guide d'aménagement des trottoirs fondé sur une recherche résumée dans le guide. Les cinq points reproduits ci-dessous montrent comment le système « trottoir » est représenté à partir de variables externes (celles décrivant les flux de piétons entrant et sortant dans le trottoir) et de variables internes, décrivant la façon dont les piétons s'y déplacent, et dont deux variables peuvent être associées à la notion de confort ou un antonyme la « gêne » : celles qui comptent les entraves dans le mouvement et l'échelle de perception du confort au cours d'enquêtes.

« [...] une étude détaillée de plus de 75 sites à travers le réseau routier de Transport for London a été entreprise pour mesurer les aspects suivants du comportement des piétons :

Informations détaillées sur les flux de piétons. Cela a fourni des informations sur le niveau de mouvement des piétons tout au long de la journée, sur la façon dont la direction du mouvement a changé tout au long de la journée et sur les pics de fréquentation.

La vitesse des piétons a été mesurée aux heures de pointe et aux heures intermédiaires pour évaluer l'impact du nombre de personnes et de la direction dans laquelle elles se déplacent.

Le nombre de personnes ayant subi une restriction de mouvement a été enregistré. On parle de restriction de mouvement lorsque les personnes ont dû modifier leur vitesse ou leur itinéraire, qu'elles ont été bousculées ou qu'elles se sont heurtées à d'autres usagers.

La distance que les gens laissent entre eux et entre le mobilier urbain, la "distance de passage", a été mesurée avec précision grâce à la vidéosurveillance et à une étude topographique détaillée.

Une enquête par questionnaire a été menée sur un certain nombre de sites afin d'évaluer la perception des gens en matière de confort et la manière dont cela peut affecter leurs actions. » (p.24)

Le document de TfL comporte deux parties : une consacrée aux trottoirs ou voies piétonnes, une autre aux traversées de chaussées. Pour les voies piétonnes, il propose des largeurs minimales recommandées en fonction des usages et des densités pédestres qu'ils engendrent. Il demande de classer les types de rues ou de quartiers urbains selon le niveau de fréquentation piétonne et les variations quotidiennes de niveau. Une enquête de terrain sur la fréquentation, l'analyse du profil de largeur et des obstacles présents sur la voie piétonne sont ensuite nécessaires. La feuille de calcul fournie par TfL compare la fréquentation et la géométrie pour en déduire le « niveau de confort en période de pointe » selon une échelle en six niveaux. Il s'agit des « niveaux de service » (*Level of service*, en anglais), un concept qui a été développé par John J. Fruin (1971) et qui est devenue une norme mondiale pour les bureaux d'étude en matière de planification pour les piétons. Ils sont illustrés ci-dessous (Fig. 1). Le niveau de service A représente des conditions de libre circulation, tandis que le niveau de service F représente une rupture totale de la circulation. Malgré la reconnaissance des spécificités de la marche, on ne peut que constater l'influence d'une culture de l'ingénierie du trafic qui s'est constituée sur les problématiques de la circulation automobile. Le croisement du niveau de service diagnostiqué par la feuille de calcul et le type de rue est ensuite évalué en terme d'acceptabilité ou d'urgence à entreprendre un élargissement des voies piétonnes (voir Fig. 2).

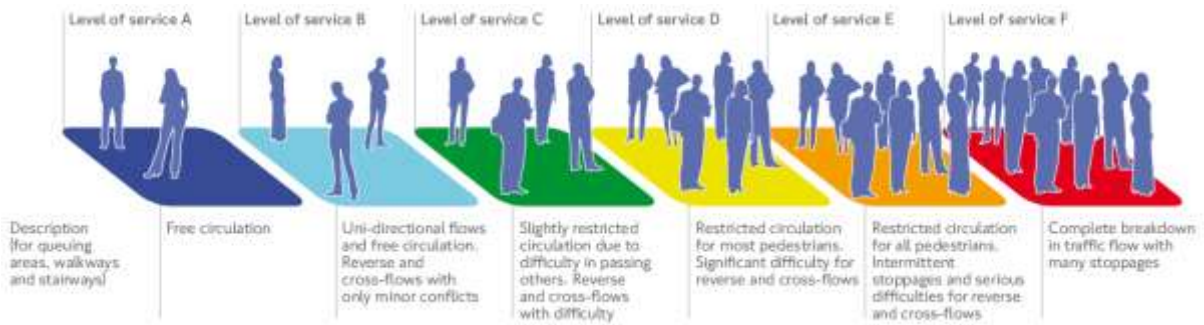


Figure A.1. Description des niveaux de service de Fruin. Source: Station planning standards and guidelines, Transport for London, 2012

	HIGH STREET		OFFICE AND RETAIL		RESIDENTIAL		TOURIST ATTRACTION		TRANSPORT INTERCHANGE	
	Peak	Ave of Max	Peak	Ave of Max	Peak	Ave of Max	Peak	Ave of Max	Peak	Ave of Max
A	COMFORTABLE		COMFORTABLE		COMFORTABLE		COMFORTABLE		COMFORTABLE	
B+	COMFORTABLE		COMFORTABLE		COMFORTABLE		COMFORTABLE		COMFORTABLE	
B	ACCEPTABLE		ACCEPTABLE		ACCEPTABLE		ACCEPTABLE		ACCEPTABLE	
B-	AT RISK		ACCEPTABLE		ACCEPTABLE		AT RISK		ACCEPTABLE	
C+	UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		ACCEPTABLE		AT RISK		UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		ACCEPTABLE	
C-	UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		AT RISK		UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		AT RISK	
D	UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		AT RISK		UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		AT RISK	
E	UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		AT RISK		UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		UNACCEPTABLE/ UNCOMFORTABLE		AT RISK	
	Peak and Average of Maximum Activity levels have similar guidance as people visiting retail areas stated they were particularly sensitive to crowding.		The "at risk" level is set at a lower PCL during the Average of Maximum Activity than peak flows. This is because of the greater number of single travellers and the short duration of maximum activity.		The "at risk" level is set at a lower PCL than peak flows in Residential Areas to reflect the short time this is likely to occur. A site visit to Residential sites is particularly important to check if there is school activity or a bus stand in the area.		Peak and Average of Maximum Activity levels have similar guidance as people visiting tourist areas are likely to be particularly sensitive to crowding		The "at risk" level is set at a lower PCL during the Average of Maximum Activity than peak flows. This is because of the greater number of single travellers and the short duration of maximum activity.	

Figure A.2. Conseils pour les différents types de zones : rue principale, zone commerciale, zone résidentielle, zone touristique, centre d'échange intermodal. Peak (hour flow) : débit moyen de tous les échantillons prélevés pendant les heures de pointe. Ave(rage) of Max (activity): basée sur une moyenne des échantillons de 10 secondes les plus actifs. Source: Pedestrian Comfort Guidance for London, Guidance Document, Transport for London, 2019

10ème Réunion Labex

Etude sur la définition d'une infrastructure pédestre

Date

Excusés

Jean-Claude[sic] Hubert
Labex Futurs urbains - GT MUP - Chercheur -
Université Eiffel

Nicolas Van-Eeckhout
Directeur des Transports, de la Voirie et des
Déplacements (DTVD), CD94

Chef du Service territorial ouest

Michel Laskowski

Participants

Universitaires

Julie Scapino
Labex Futurs urbains - GT Mobilités urbaines
pédestres (MUP) - Université Paris-Est -
Post-Doctorante - Chercheuse associée au
Laboratoire d'Eco-anthropologie

Jérôme Monnet
Labex Futurs urbains - GT MUP- Université
Paris-Est - Professeur, Université Paris-Est :
École d'Urbanisme Paris

Bureau d'études CD Via

Mathieu Philippot

CD94/DTVD

Chef de secteur Etudes et Travaux neufs -
Service territorial est

Enoal Vancoillie
Chef de secteur Qualité et Sécurité des
Déplacements - Service Coordination
Exploitation et Sécurité routière

Benoît Renault
Chef du Service Transport Etudes Générales
(STEG)

Adjointe au Chef de service STEG

Responsable Cellule données mobilité et

approche à nouveau quantitative avec le lancement d'une campagne de comptages piétons sur le même site (RD155).

INTRODUCTION

La précédente réunion du groupe de travail sur l'étude infrastructure pédestre date du 30 janvier dernier.

Pour mémoire, cette étude vise à définir ce qu'est une voirie départementale accueillante et confortable, une typologie de critères de confort comme levier pour mieux accompagner la pratique de la marche.

Les premières étapes de l'étude ont visé des critères essentiellement géométriques et de mesure de la voirie, qui n'ont pas permis, seuls, de conclure l'étude sous ce seul angle.

Dès lors, il a été privilégié une approche complémentaire, sociologique, basée sur l'observation in situ des comportements et sur l'enquête des piétons, pour faire émerger les critères auxquels les marcheurs sont le plus sensibles.

La précédente réunion du 30/01/2020 a permis :

- De clore la phase d'observation (phase 1) avec la restitution des comportements piétons observés sur le tronçon de voirie départementale (RD19) à Maisons Alfort, après l'observation fin novembre sur la RD155.

- D'enclencher la phase d'entretien sur site (RD155)

- En parallèle, d'enclencher une

L'objet de cette réunion est de :

- Présenter les résultats des entretiens,
- Présenter les résultats des comptages et leur complémentarité avec l'observation/ les entretiens.

Intervention de Julie Scapino sur l'analyse des enquêtes « interactions avec les marcheurs »

Il est rappelé les principaux résultats issus de l'observation de PVC (1^{ère} phase).

Concernant les entretiens, 20 ont pu être menés sur les 30 prévus. N'ont pas été faits les entretiens du groupe adolescents. Pour les personnes âgées, cela a été plus difficile que prévu. Il a fallu adapter la grille d'entretiens et la méthodologie, ces personnes ne répondant que sur le moment et n'étant pas disposées à prendre rdv plus tard car cela leur en coûte trop.

Résultats des entretiens :

1/ Fréquentation et appréciation générale

- Des déplacements quasi exclusivement utilitaires (rejoindre les commerces, transports très polarisateurs (gare, bus...), un seul exemple de promenade sociale « faire un tour »
- La majorité des personnes marchent sur la totalité du tronçon étudié

Un discours négatif sur la rue, mais aussi positif (sociabilité, commerces, mixité population), une différence du discours entre le segment côté nord et le segment côté sud.

2/ Expérience sociale et corporelle de la marche sur PVC

Les entretiens corroborent les observations des comportements.

Pas de difficulté majeure pour les déplacements à pieds, malgré les contraintes du site, mais beaucoup d'inconfort et de gêne pour une majorité. Plus on est contraint dans son déplacement, plus les contraintes de l'environnement de marche pèsent. On observe un civisme général les choses se passent bien globalement, mais aussi empressement, agacement.

- Même si la contrainte est liée au manque d'espace (étroit), la source de la gêne est « les autres ». Alléger la contrainte physique permettrait d'alléger le rapport aux autres

3/ Trajectoires et stratégies des adultes valides

- La trajectoire directe la plus efficace est anticipatoire, les personnes se positionnent très en amont du côté de leur destination.
- Les trajectoires sont construites à l'économie en terme de distance, de choix. Le choix est fait par habitude et peu remis en cause (habitude d'être toujours sur le même trottoir même si on a pas de

besoin de faire de courses sur le trottoir le plus chargé), par mimétisme (on fait comme tout le monde, même si rester sur le même trottoir est inconfortable).

- On va au plus vite, car traverser nécessite d'attendre qu'une voiture laisse passer les piétons.
- Pas d'évitement horaire en règle générale, sauf pour les personnes en difficultés.

La dissymétrie des flux entre les trottoirs s'explique par l'effet polarisateur de la gare côté est.

Dorothee Ingert : la restitution est très dense, mais très intéressante, remarquable. Le côté sociabilisation de l'espace public est mis en exergue et devrait être mieux pris en compte par le Département. Quand on est piéton, on pense aux autres, contrairement à quand on monte dans sa voiture.

La sensibilité importante chez tous les marcheurs à l'espace disponible autorise peu de liberté en terme de rythme de marche. On n'a pas forcément besoin de beaucoup plus de place. Il en faut certes mais pour quel usage ? pour pouvoir doubler... Le poids de l'habitude est impressionnant. Il existe de vrais freins pour traverser, soucis de temps pour traverser, soucis d'économie de temps et de distance.

Jérôme Monnet : il existe une opposition entre la vision stratégique et la vision plus tactique des usagers. Le poids de l'habitude illustre bien la vision stratégique et le rôle de nos aménagements serait d'offrir plus de place au tactique pour retourner sur l'autre trottoir en face si le besoin s'en fait sentir (encombrement du trottoir...).

Enoal Vancoillie : est-ce qu'on va retrouver ces constats sur toutes les voies ? La question des rythmes diffère entre divers groupes d'individus et au sein d'un même groupe d'individus. Un rythme rapide près de la gare versus la sociabilité. En terme d'analyse, c'est un critère à développer. La rue PVC nécessite beaucoup d'effort et de concentration. Le banc constitue aussi un support de déplacement.

Julie Scapino : possibilité de l'inattention sur la RD 19 contrairement à cette RD 155 fatigante. Il y a un « droit à l'inattention ».

Jérôme Monnet : Nous sommes à l'orée d'une transformation de la relation entre les flux piétons et les commerces. Les commerçants sont souvent contre les projets de piétonisation, ce qui nécessite un travail argumentaire fort à développer pour les convaincre. Quand on a beaucoup de piétons, les commerçants déjà installés y gagnent puis les baux deviennent plus chers, les commerces traditionnels doivent partir au profit de franchises qui ont les moyens de payer des loyers plus élevés.

Il s'agit également de sortir d'une vision d'une infrastructure la plus homogène possible.

Enoal Vancoillie : la dissymétrie est liée à la plus ou moins grande étanchéité d'un côté à l'autre de la rue.

Intervention de Mathieu Philippot, CD Via sur le traitement des comptages piétons

Des caméras ont été posées le 11 mars pour un enregistrement de 3 jours les 12,13 et 14 mars, soit avant le confinement. L'annonce de la fermeture des établissements d'enseignement a eu lieu le jeudi 12 mars, mais ne semble pas avoir affecté les 2 jours suivants les déplacements des usagers sur la RD155. Les caméras ont été relevées le lundi 16 mars.

- Le flux de circulation Véhicules légers est à peu près le même sur cette voie, quel que soit le jour et le moment de la journée.

Usage dissymétrique des trottoirs : les comptages réalisés corroborent les observations terrain. En sommant les flux moyens horaires sur chaque point sur chaque trottoir (est d'une part, ouest d'autre part), on s'aperçoit, en comparant les pourcentages d'usage de chaque trottoir, d'un usage très marqué du trottoir côté est et ceci quel que soit le jour et le moment de la journée.

- Régularité des flux piétons : il est compté un même nombre de personnes quel que soit le jour (jeudi ou vendredi), même habitude de prendre le même trottoir. Le piéton s'adapte aux contraintes. On aurait pu penser que le piéton était plus libre qu'un flux automobile, alors qu'il a toujours les mêmes habitudes. Les traversées de l'axe sont égales de chaque côté. On ne retrouve pas la dissymétrie. Ce sont sans doute des gens qui vont dans des voies sécantes.
- Sur la traversée principale de la gare 56% des piétons ont traversé au rouge pour les piétons, et il n'y a que 18 % de vert, sur 1' 12 "

Dorothee Ingert : les résultats sont très intéressants en comparaison avec le travail de Julie. L'utilisation de la rue est moindre au sud, sauf le samedi. En effet, ce jour, la dissymétrie entre trottoirs s'inverse et penche plus vers l'ouest de fait du marché. En terme de traversées, au bout de PVC, il est plus facile de traverser à l'ouest pour aller vers le marché.

Mathieu Philippot : les flux de traversées sont noyés dans les flux des autres axes, ceci est un biais des comptages car on n'a pas les origines destinations.

Dorothee Ingert : Il est intéressant d'avoir pu quantifier la dissymétrie d'usage des trottoirs (70% versus 30%).

Mathieu Philippot : il serait intéressant de voir sur d'autres axes une éventuelle dissymétrie et de quantifier le phénomène de dissymétrie (ou l'absence de dissymétrie) sur une zone 30 ou un plateau surélevé.

Jérôme Monnet: propose de reprogrammer une autre réunion pour discuter de la suite et quand on aura tous les éléments de CD Via. Il saura quelles seront les forces de MUP, car le Labex a fait la demande d'un nouveau post doc d'un an. On pourrait définir le profil en fonction de l'orientation qu'on veut donner à l'activité. Réponse la semaine prochaine.

Dorothee Inger : il va falloir organiser une réunion pour définir la suite, mais aussi une réunion de restitution à nos élus, pour présenter les éléments, partager les avancées et faire valider la poursuite du travail.

CD Via va consolider les éléments, faire une note de synthèse et envoyer les éléments qui n'ont pas pu être montrés à cette réunion.

Il ressort déjà certains questionnements issus de l'observation de la RD155 pour favoriser la prise en compte des piétons sur un site : observer selon les types de public, réaliser des comptages quantitatifs, en écho de l'observation. L'utilisateur a le droit à l'inattention. La rue est un espace de sociabilisation, identifié comme tel par les usagers, ainsi qu'un espace de mixité des populations.

Face à ces questions sociologiques et pour accueillir cette sociabilité, des réponses techniques seront à rechercher (surlargeurs régulières ? suppression de stationnements ?...).

Annexe 4 : Liste des indicateurs produits par le modèle et agrégations

Definition des variables

- ▶ timeSimu: temps de simulation
- ▶ A0_agent_position_x, A0_agent_position_y: position de l'agent (x,y)
- ▶ A0_agent_velocity_x, A0_agent_velocity_y: vitesse de l'agent (x,y)
- ▶ A0_agent_speed: vitesse scalaire
- ▶ A0_closerAgent: ID de l'agent le plus proche
- ▶ A0_distanceCloserAgent: distance de l'agent le plus proche (m)
- ▶ A0_closerAgentInVF: l'agent le plus proche dans le champ de vision: semicercle vers la direction de l'agent (VF: vision field)
- ▶ A0_distanceCloserAgentInVF: distance (m) de l'agent le plus proche dans le champ de vision: semicercle vers la direction de l'agent (VF: vision field)
- ▶ A0_angleToPrefVelocity: angle (en degré) avec la ligne de désir
- ▶ A0_magnitudeVelToPrefVelocity: magnitude de la difference entre la vitesse préférentielle et la vitesse choisie
- ▶ A0_agent_discomfort_abs: inconfort absolue (m²) (réduction de la surface de l'espace personnel à cause d'autre agent)
- ▶ A0_agent_discomfort_rel: inconfort relatif (%)

Opérations d'agrégation au niveau individuel (syntaxe Proc Summary SAS)

- ▶ $\max(\text{timeSimu } A0_agent_position_x) = \text{timeSimu } X_{\max}$
- ▶ $\min(A0_agent_position_x) = X_{\min}$
- ▶ $\text{sum}(A0_discomfort_abs \ A0_discomfort_rel \ A0_distcloserinf1m) = S_A0_discomfort_abs$
 $S_A0_discomfort_rel \ S_A0_distcloserinf1m$
- ▶ $\text{var}(A0_agent_velocity_x \ A0_agent_velocity_y \ A0_agent_speed) = V_agent_velocity_x$
 $V_agent_velocity_y \ V_agent_speed$
- ▶ $\text{mean}(A0_distanceCloserAgent) = \text{Moy_distanceCloserAgent}$
- ▶ $P25(A0_distanceCloserAgent) = P25_distanceCloserAgent$
- ▶ $P50(A0_distanceCloserAgent) = P50_distanceCloserAgent$
- ▶ $P75(A0_distanceCloserAgent) = P75_distanceCloserAgent;;$