

Mémoire de recherche du Certificat Complémentaire en Géomatique

**Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone
urbaine du canton de Vaud**



(Ville de Lausanne, 2018)

Camila Demoneky

Superviseur : Prof. Nicolas Ray

Jury : Dr. Gregory Giuliani

Date : Juin 2022

Remerciements

Je remercie Prof. Nicolas Ray d'avoir accepté de diriger ce travail, pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Je remercie Dr. Gregory Giuliani d'avoir accepté d'être membre du jury de mémoire.

Je remercie ma collègue Lauranne Bauchot pour m'avoir partagé ses données.

Je remercie également ma collègue Sandra Miville pour avoir été l'éditrice principale de ce travail et François Pomel pour ses efforts de relecture.

Je remercie ma famille pour son soutien et son encouragement constants, même à distance.

Résumé

Les espaces verts urbains (EVU) jouent un rôle essentiel dans l'offre et le maintien des services écosystémiques, la qualité de vie et la santé de la population urbaine. L'une des conditions préalables pour bénéficier des avantages offerts par l'EVU est l'accessibilité. Plusieurs études ont analysé l'accessibilité aux EVU, mais très peu prennent en compte les capacités physiques des personnes à se déplacer et l'influence que les caractéristiques du terrain peuvent avoir sur l'accessibilité piétonne aux EVU. Par conséquent, ce travail se concentre sur l'accessibilité piétonne aux EVU, en termes de temps de marche, pour les personnes à mobilité « classique » et « réduite », en tenant compte de l'effet que la pente peut avoir sur leur vitesse de marche. De plus, nous utilisons deux méthodes d'analyse de l'accessibilité, l'une basée sur *raster* et l'autre sur réseau, pour observer les différences qui pourraient être générées dans le calcul de l'accessibilité. Enfin, une comparaison est faite avec des données de terrain. L'étude de cas menée dans la zone urbaine du canton de Vaud montre que 78,4% de la population à mobilité « classique » a accès à un EVU à moins de 5 minutes de marche selon l'analyse basée sur réseau, et 48,9% selon l'analyse basée sur *raster*. Pour la population à mobilité « réduite », ces proportions descendent à 51,8% et 14% respectivement. Cependant, les personnes ne se rendent pas toujours à l'EVU le plus proche en termes de temps, ce qui montre la complexité de la modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU. Ce travail souligne l'importance de prendre en compte la capacité de déplacement réduite de certains groupes de population et les facteurs qui peuvent influencer le temps de marche. Il démontre également qu'il est essentiel de bien comprendre les méthodes d'analyse appliquées et de s'appuyer sur des données de terrain pour valider et améliorer les modèles d'accessibilité piétonne aux EVU.

Mots clés : *Accessibilité piétonne, Espaces verts urbains, Population à mobilité réduite, Path Distance, Network Analyst*

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

Table des matières

1. Introduction	6
1.1 Importance des espaces verts urbains	6
1.2 Accessibilité aux espaces verts urbains	7
1.3 Application des SIG dans les analyses d'accessibilité aux EVU	9
2. Plan de Recherche	10
3. Méthodologie	12
3.1 Partie I : Modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU	12
3.1.1 Définition de la zone d'étude	12
3.1.2 Définition d'espaces verts urbains	14
3.1.3 Données pour la modélisation du déplacement à pied	17
3.1.4 Construction des modèles de déplacement à pied	22
3.1.5 Analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU par la méthode basée sur <i>raster</i>	24
3.2 Partie II : Statistiques de l'accessibilité piétonne aux EVU	32
3.3 Partie III : Comparaison des résultats des modèles théoriques avec les possibles parcours effectués par des usagers des EVU dans la région de Lausanne	34
4. Résultats	37
4.1 Modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU	37
4.1.1 Les espaces verts dans la zone urbaine vaudoise	37
4.1.2 Analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU par la méthode basée sur <i>raster</i>	38

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

4.1.3 Analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU par la méthode basée sur <i>réseau</i>	40
4.2 Statistiques d'accessibilité piétonne aux EVU	46
4.3 Comparaison des résultats des modèles théoriques avec les possibles parcours effectués par des usagers des EVU dans la zone urbaine du canton de Vaud.....	52
5. Discussion	56
5.1 Modèles de déplacement piéton.....	56
5.2 Accessibilité piétonne aux EVU de la zone urbaine du canton de Vaud.....	57
6. Conclusion.....	64
7. Bibliographie.....	64
8. Annexes	71

1. Introduction

1.1 Importance des espaces verts urbains

Actuellement, plus de la moitié de la population mondiale vit dans des zones urbaines et il est attendu que ce pourcentage augmente de 68 % à l'horizon 2050 (United Nations et al., 2019). Du fait du développement urbain croissant, les espaces verts urbains (EVU), comme les parcs, les jardins, les forêts et toute zone végétalisée ouverte au public (OMS, 2017) sont soumis à une forte pression ainsi que les services écosystémiques qu'ils fournissent.

Dans les villes européennes, les EVU sont généralement très appréciés pour les possibilités qu'ils offrent de réaliser des activités physiques récréatives, comme la marche ou le sport, ou des activités plus passives, telles que le repos et la détente (Ćwik et al., 2021; Krellenberg et al., 2021; Voigt et al., 2014; Zwierzchowska et al., 2018). Ils permettent à leurs usagers de se sentir proche de la nature (Bertram & Rehdanz, 2015; Krellenberg et al., 2021; Priess et al., 2021) et de sociabiliser à travers des interactions avec d'autres personnes comme lors de pique-niques ou barbecues, de faire de nouvelles rencontres et de participer à des événements sociaux (Bertram & Rehdanz, 2015; Zwierzchowska et al., 2018). De plus, les EVU sont considérés comme des espaces importants pour mitiger les nuisances du milieu urbain, par exemple, grâce à leurs contributions à la qualité de l'air et des eaux, à la promotion et préservation de la biodiversité, à la rétention d'eau et à la réduction de l'effet d'îlot de chaleur ou du bruit (Carmen et al., 2020; Farrugia et al., 2013; Jansson, 2014). Tous ces services écosystémiques fournis par les EVU sont étroitement liés aux constituants fondamentaux d'une « bonne qualité de vie » (Pascual et al., 2017), comme la santé physique, mentale et émotionnelle, la cohésion sociale, le sentiment d'appartenance, l'identité culturelle, l'équité et la sécurité (Markevych et al., 2017).

L'accessibilité aux EVU est un enjeu crucial pour maximiser les bénéfices offerts par les EVU à la population (La Rosa et al., 2018), en effet, les effets positifs et largement reconnus des EVU font d'eux des éléments indispensables pour promouvoir les Objectifs du Développement Durable no. 3 et 11 des Nations Unies (Giuliani et al., 2021; Priess et al., 2021; Zwierzchowska et al., 2018) afin « d'assurer une vie saine et promouvoir le bien-être

de tous à tout âges » (Objectif 3) et « rendre les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables » (Objectif 11) (Nations Unies, 2016).

1.2 Accessibilité aux espaces verts urbains

Les bénéfices générés par les services écosystémiques des EVU dépendent fondamentalement de son accessibilité, particulièrement ceux générés par des services culturels, du fait qu'ils se produisent lors du contact direct avec la nature (La Rosa et al., 2018). Dans le domaine de la planification urbaine, l'accessibilité peut être définie comme « (...) une caractéristique spatiale qui reflète la possibilité d'atteindre un lieu particulier dans la ville » [traduction libre] (La Rosa et al., 2018, p. 36). Il existe divers standards et recommandations qui définissent un niveau « adéquat » d'accessibilité physique aux EVU. L'OMS établit que tous les EVU devraient être physiquement accessibles à une courte distance des lieux de résidence, normalement définie comme 300 mètres ou 5 minutes de marche (OMS, 2017). Plusieurs gouvernements recommandent aussi des distances d'accès aux EVU différenciées selon la surface ou type d'EVU (Gong et al., 2016; Gupta et al., 2016; Herzele & Wiedemann, 2003; La Rosa et al., 2018).

Il est important de tenir compte non seulement du niveau général d'accès d'une population aux EVU, mais aussi et surtout de groupes sociaux minoritaires ou défavorisés afin d'aborder de questions de justice environnementale. Plusieurs études analysent l'accessibilité aux EVU des groupes ethniques et religieux (Comber et al., 2008), des groupes appartenant à des minorités sociales ou culturelles (Kabisch & Haase, 2014a) ou défavorisées économiquement (Guinaudeau et al., 2022) et de différentes classes d'âges de la population (Gong et al., 2016; Kabisch & Haase, 2014a; La Rosa et al., 2018; Victor, 2010; Wen et al., 2020). L'analyse de l'accessibilité aux EVU pour différentes classes d'âges est particulièrement intéressant car certains sous-groupes de la population comme les enfants ou les personnes âgées sont « (...) potentiellement plus vulnérables aux problèmes d'équité et de justice environnementale que d'autres classes d'âges, du fait de leur étendue spatiale plus limitée et de leur plus grande exposition aux conditions climatiques défavorables » [traduction libre] (La Rosa et al., 2018, p. 347). De plus, le niveau d'accès aux EVU peut bénéficier davantage aux jeunes enfants et aux personnes âgées grâce au rôle des EVU dans la promotion de l'activité physique et le développement du capital social (Braubach et al.,

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

2017; Enssle & Kabisch, 2020; Gong et al., 2016; Kabisch et al., 2016). L'analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU pour ces sous-groupes de la population permet ainsi de générer de l'information pour mieux répondre à la demande de l'ODD 11.7 « d'assurer l'accès universel à des espaces verts et publics sûrs, inclusifs et accessibles, en particulier pour les femmes et les enfants, les personnes âgées et les personnes handicapées d'ici 2030 » (Nations Unies, 2016).

L'accessibilité mesurée en unité de distance-temps permet d'analyser l'accessibilité aux EVU de manière plus diverse et inclusive (Victor, 2010), en intégrant des groupes sociaux avec des vitesses de déplacement différentes, comme les personnes âgées, les enfants de bas âge ou les personnes en situation de handicap. Cependant, peu d'analyses sur l'accessibilité piétonne aux EVU intègrent la notion de vitesse de déplacement différenciée en fonction des capacités physiques de mouvement des potentiels visiteurs des EVU. La Rosa et al. (2018) considèrent les caractéristiques des EVU et les préférences des enfants et des personnes âgées dans l'analyse d'accès aux EVU mais ne prennent pas en compte des vitesses de déplacement différenciées. De même, Wen et al. (2020) focalisent l'analyse de l'accessibilité physique aux EVU pour les personnes âgées, de 65 ans et plus, en classifiant les EVU par leur degré d'attractivité mais ne considèrent pas la vitesse de déplacement des personnes âgées. Fangying Gong et al. (2016) analysent l'accessibilité aux EVU particulièrement pour les personnes âgées en estimant une vitesse de marche constante de 0,88 m/s. Giuliani et al. (2021, p.13) prennent en considération des vitesses de déplacement différentes pour deux types de groupes de population, pour les personnes adultes seules sans contraintes physiques avec une vitesse de marche de 5 km/h et pour les personnes avec des enfants et les personnes âgées à mobilité « réduite » avec une vitesse de 3 km/h. Cependant, rares sont les études qui considèrent les facteurs du terrain et du paysage comme la pente, le niveau de verdure ou la beauté du paysage qui peuvent avoir des effets sur le déplacement à pied des personnes. Chênes et al. (2021) déterminent aussi des vitesses différentes de déplacement en fonction de la classe de couverture du sol et incluent l'effet de la pente du terrain sur la vitesse de marche sur la base de l'analyse *raster* anisotropique, mais uniquement pour une population adulte en bonne santé. Seulement Giuliani et al. (2020) considèrent l'effet de la couverture du sol et de la pente dans l'analyse d'accessibilité à pied aux EVU basé sur *raster* ainsi que Victor (2016) qui analyse l'effet de la pente et du

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

revêtement du chemin sur la vitesse de marche de différentes personnes selon leurs capacités physiques de déplacement dans son étude d'accessibilité piétonne basé sur réseau.

Par conséquent, un des objectifs de ce travail est de modéliser l'accessibilité piétonne en considérant différentes vitesses de déplacement en fonction de la capacité physique des personnes et de la pente du terrain afin de déterminer les différences que ces facteurs peuvent avoir sur le niveau d'accessibilité piétonne aux EVU.

1.3 Application des SIG dans les analyses d'accessibilité aux EVU

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) se révèlent indispensables pour analyser l'accessibilité aux EVU. Actuellement, les analyses de l'accessibilité piétonne aux EVU se basent sur des outils de proximité vectorielle de distance de réseau (comme Comber et al. 2008 ; Fangying Gong et al., 2016 ; La Rosa et al., 2018 ; Wen et al., 2020) et des outils de distance basés sur *raster* (comme Chênes et al., 2021 ; Giuliani et al., 2021).

L'outil basé sur réseau (*network distance tool* en anglais) permet de modéliser l'accessibilité aux EVU en fonction des possibilités de déplacements sur un réseau de chemins, représentant de façon plus réaliste le mouvement de piétons à travers les routes sur lesquels les personnes se déplacent normalement. Le principal inconvénient de cet outil est que, par rapport à la distance euclidienne, il est plus exigeant en termes de calcul et de maîtrise de la part de l'utilisateur (connaissances dans la préparation des données, saisie des données, etc.) (Sander et al., 2010). L'extension *Network Analyst* (dès maintenant, NA) de ArcGIS Pro fournit des outils de proximité de distance de réseau. La fonction *Service Areas* génère des *buffers* (zones de desserte ou de service) comprenant tous les chemins qui peuvent être parcourus le long d'un réseau à une certaine distance ou distance-temps depuis un point du réseau (Esri, 2022b). Celui-ci est utilisé pour estimer le nombre de personnes qui se trouvent à une certaine distance ou temps de déplacement d'un EVU.

Des analyses d'accessibilité aux EVU sont aussi effectuées avec des logiciels ou d'outils de proximité basés sur *raster*, comme *AccesMod* et *Path Distance* (Chênes et al., 2021; Giuliani et al., 2021). L'outil *Path Distance* (dès maintenant, PD) fournit par l'extension *Spatial Analyst* d'ArcGIS Pro permet de simuler les conditions expérimentées par un voyageur lors de son

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

mouvement dans le paysage (Esri, 2022d), représentées par le coût de se déplacer sur une surface en considérant la distance réelle sur le terrain. Le coût n'est pas mesuré en unités de mesure de distance mais est plutôt comme un coût de déplacement qui peut être exprimé en unité de temps, d'énergie, monétaire ou autres. Cet outil permet ainsi de calculer le coût minimum de déplacement cumulé depuis des EVU sur la base d'une couche *raster* de coût de surface.

Bien que, jusqu'à présent, très peu de recherches aient inclus les capacités de mobilité « réduite » des enfants et des personnes âgées dans les modèles d'analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU, les outils appliqués à cette analyse offrent cette possibilité. Ce travail propose donc une analyse d'accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité « réduite » et « classique », en considérant les effets que la pente peut avoir sur la vitesse de déplacement de ces populations, en utilisant des outils NA et PD afin d'identifier des différences dans les résultats obtenus.

2. Plan de Recherche

Objectif général :

1- Analyser l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud avec des méthodes basées sur *raster* (outil *Path Distance*) et sur réseau (extension *Network Analyst*).

Question de recherche :

i) Quelles différences génèrent les méthodes basées sur *raster* et sur réseau dans l'analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU ?

Hypothèse :

i) Les outils PD et NA calculent différemment le temps de marche nécessaire pour atteindre un EVU. Cela peut conduire à des estimations différentes du nombre de personnes qui se trouvent à des temps de marche spécifiques d'un EVU.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Objectifs spécifiques :

2- Modéliser l'accessibilité piétonne en considérant différentes vitesses de déplacement en fonction de la capacité physique des personnes et de la pente du terrain.

Question de recherche :

ii) Comment l'accès à pied aux EVU dans la zone urbaine du canton de Vaud varie-t-il selon la population adulte avec une capacité de déplacement dite « classique » et la population avec une capacité de déplacement considérée comme « réduite » ?

Hypothèse :

ii) L'accessibilité à pied aux EVU dépend des capacités physiques de déplacement des usagers et des caractéristiques du terrain, telles que la pente. La prise en compte de ces facteurs dans la modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU permet de créer un modèle plus inclusif et une estimation plus précise du nombre de personnes qui se trouvent à un certain temps de marche d'un EVU.

3- Comparer les estimations d'accessibilité piétonne aux EVU issues des modèles théoriques avec les possibles parcours effectués par des usagers des EVU dans la zone urbaine du canton de Vaud.

Question de recherche :

iii) Quelles différences existent entre les estimations théoriques de temps de marche nécessaire pour atteindre un EVU et les possibles temps de marche effectués par des usagers des EVU ?

Hypothèse :

iii) L'analyse d'accessibilité piétonne suppose que les usagers se rendent à l'EVU le plus proche, c'est qui n'est pas toujours vrai. La modélisation du possible temps de trajet effectué par les usagers des EVU peut être utile pour contraster les estimations du temps de marche issues de la modélisation théorique et pour mettre en évidence les améliorations possibles

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

des modèles de déplacement piéton. Pour ce faire, des données récoltées lors d'entretiens avec des usagers des EVU de la zone urbaine du canton de Vaud sont utilisées.

3. Méthodologie

3.1 Partie I : Modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU

3.1.1 Définition de la zone d'étude

En Suisse, la zone urbaine ou l'espace à caractère urbain est définie en fonction des critères de densité (notamment le nombre d'habitants par km²), par des valeurs de seuils absolues (le nombre d'habitants, le nombre d'emplois et le nombre de nuitées hôtelières converties en équivalents-habitants, abréviation HEN) ainsi que sur une base fonctionnelle (à l'aide de l'indicateur des flux pendulaires) (Goebel & Kohler, 2014). Pour le canton de Vaud, la zone urbaine est définie par l'agglomération de Lausanne, la 5^{ème} la plus importante de Suisse, comprenant 131 communes et 389 614 habitants (en 2012). Le centre de l'agglomération est constitué de 25 communes-centre d'agglomération. A raison de l'effort nécessaire pour récolter des données sur le terrain, nous avons choisi de restreindre la zone d'étude à certaines communes du noyau urbain à haute densité de HEN (au moins 5 000 HEN). Nous avons sélectionnés les communes les plus densément peuplées (entre 2 000 et plus de 5 000 habitants par km²) (Canton de Vaud, 2020; Office fédéral de la statistique, 2019) des districts de Lausanne, Ouest lausannoise et Lavaux-Oron. La zone d'étude définie est formée alors par Lausanne-centre (commune de Lausanne sans les zones foraines) (Ville de Lausanne, 2022) et les communes voisines d'Epalinges, Prilly, Renens, Chavannes-près-Renens, Ecublens, Saint-Sulpice, Pully et Paudex. La zone d'étude s'étend sur 43,5 km² et comprend 234 297 résidents (STATPOP) (Figure 1).

La zone urbaine du canton de Vaud s'avère un endroit approprié pour analyser l'accessibilité piétonne aux EVU, particulièrement pour les personnes à mobilité réduite, du fait des caractéristiques de sa population et les particularités de son terrain. Elle est marquée par la croissance démographique et le vieillissement de la population. Dans l'ensemble du canton, la population totale est de 816 000 résidents (en 2020) et il est attendu qu'elle accroisse jusqu'à 1 045 000 résidents en 2050 (scénario moyen) (Statistique Vaud, 2021).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Au niveau cantonal, les personnes âgées de 65 ans et plus sont environ 135 000 et les seniors âgés (80 et plus) sont 38 500 (en 2020). Il est attendu d'ici à l'horizon 2040, le nombre de personnes de plus de 65 ans augmente de plus de 50% (205 000 effectifs) et que le nombre de personnes seniors âgés augmente de plus de 70% (environ 66 000 personnes) selon le scénario moyen (Canton de Vaud, 2021).

De plus, la zone d'étude est un territoire idéal pour observer l'importance de modéliser le déplacement piéton en tenant compte des effets de la topographie, car elle est caractérisée par une forte pente. Par exemple, la commune de Lausanne présente une altitude de 370 m au bord du lac et un point culminant à près de 900 m, ce qui implique la quasi-absence des grandes surfaces plates (Karakas&Français SA, 2006, p. 10).

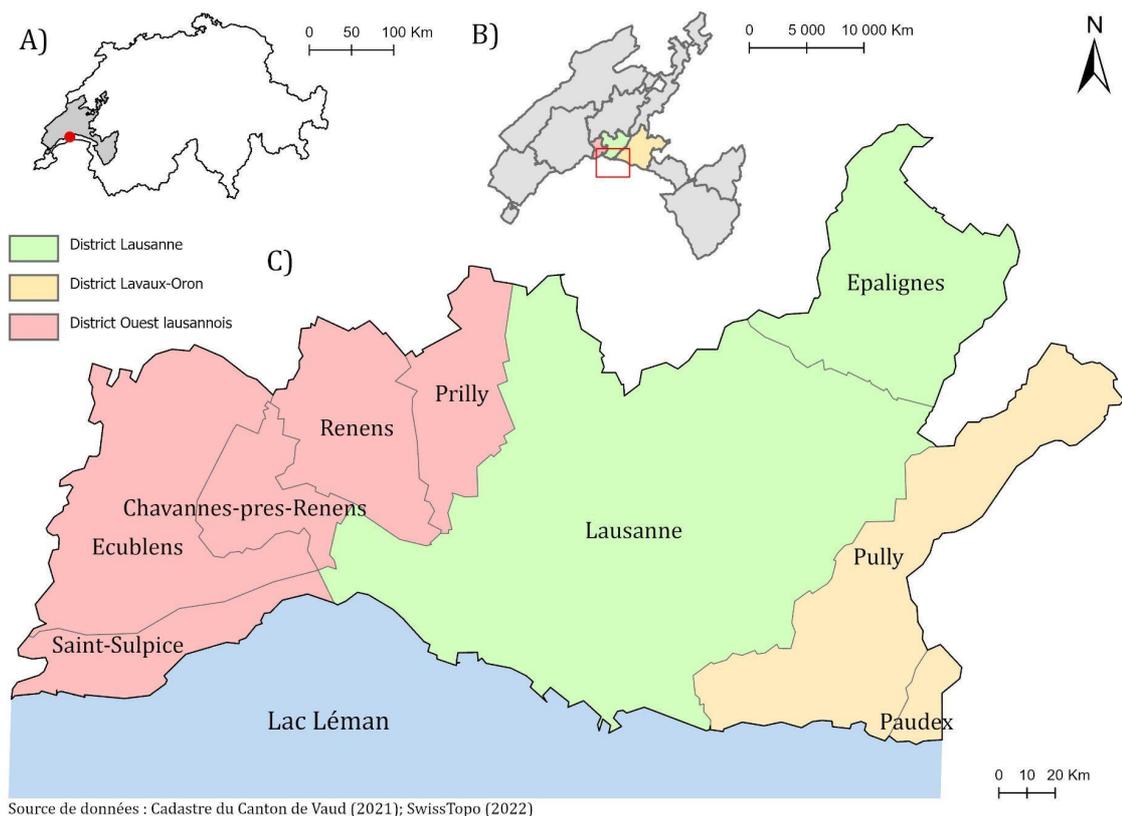


Figure 1. A) Limites de la Suisse, B) limites du canton de Vaud et ses districts et C) limites de la zone d'étude.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

3.1.2 Définition d'espaces verts urbains

Pour ce travail, les espaces verts urbains (EVU) comprennent tous les espaces majoritairement couverts par la végétation présentant un caractère anthropique ou plus naturel (Schipperijn et al., 2013), d'une surface minimale de 0.25 ha, réservés exclusivement à l'usage des piétons et des cyclistes et utilisés pour divers usages principalement pour la récréation (OMS, 2017), la détente ou la sociabilisation. Les EVU sont sélectionnés parmi ceux d'accès public et gratuit, dans lesquels il est possible d'accéder à pied, d'y rentrer et d'y rester (Schipperijn et al., 2013). Exceptionnellement les vignes sont prises en compte du fait de leur importance pour la récréation dans le canton de Vaud. Les terrains de sport ne seront pas considérés comme des EVU car ils sont destinés généralement à un seul type d'usage, par exemple les terrains de football sont destinés uniquement à la pratique de ce sport. Les terrains de sport seront exceptionnellement pris en compte lorsqu'ils sont un élément intégrant d'un EVU.

Acquisition et traitement de données spatiales

La plupart des traitements de données spatiales ont été réalisés sur ArcGIS Pro Desktop 10.7.1 et certains ont été effectués sur QGIS Desktop 3.4 10. Toutes les données sont dans la même projection CH1903+ / LV95 - EPSG :2056, la même résolution de 0,5 m et la même extension (zone d'étude) (Tableau 1 et Figure 2).

Tableau 1. Géodonnées utilisées pour définir la zone d'étude et les espaces verts urbains.

Couches d'entrée	Type de donnée	Source (ULR)/Clé ou tag d'OSM	Date
Parcs, Cimetières, Promenades, Places	Vecteur (Polygone)	Recensement architectural du canton de Vaud https://viageo.ch/md/70a94b91-c936-4b7c-b148-f69cf762f715	2021
	Vecteur (Polygone)	OSM : Leisure=park	2021
Forêts	Vecteur (Polygone)	Cadastre du canton de Vaud https://viageo.ch/catalogue/donnee/9719	2021

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

	Vecteur (Polygone)	OSM : Landuse=forest	2021
Vignes	Vecteur (Polygone)	Cadaastre du canton de Vaud https://viageo.ch/catalogue/donnee/9719	2021
	Vecteur (Polygone)	OSM : Landuse=vineyard	2021
Chemin de Fer	Vecteur (Polyligne)	swissTLM3D: Railway https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html	2021
	Vecteur (Polyligne)	swissTLM3D: Strasse https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html	2021
Aéroport	Vecteur (Polygone)	swissTLM3D: Aéroport https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html	2021
	Vecteur (Polyligne)	swissTLM3D: STRASSE=1m Weg; 2m Weg; 3m Strasse; Markierte Spur; Provisorium https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html	2021
Cours d'eau	Vecteur (Polyligne)	OSM : Landuse=vineyard	
	Vecteur (Polygone)	Limites administratives du canton de Vaud https://viageo.ch/catalogue/donnee/9519	2021
Orthophotos	Raster	SuisseImage (SwissTopo) https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/images/ortho/swissimage10.html	2020

Les jardins, parcs, promenades et cimetières ont été obtenus à partir de la couche vectorielle *Recensement architectural (Objets, Sites, Jardins historiques)* fournie par l'Administration du canton de Vaud. Seuls les polygones qualifiés comme « publics » ou « publics selon horaires » ont été sélectionnés (Figure 2, A). Les forêts et les vignes sont répertoriées sur la couche vectorielle du cadastre du canton de Vaud. Les données de l'Administration cantonale vaudoise ont été complétées par les données d'*OpenStreetMap* (OSM). Les polygones correspondant aux parcs (*leisure=parks*), aux forêts (*landuse=forest*)

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

et vignes (*landuse=vineyards*) ont été extraits en utilisant le plugin *QuickOSM* sur QGIS Desktop 3.4 10 (Figure 2, B et C). OSM est considéré comme « une source de données valide » pour identifier l'EVU (Giuliani et al., 2021; Le Texier et al., 2018) du fait qu'il maintient des bases de données géoréférencées très précises et détaillées sur la nature urbaine (Remme et al., 2021). Comme Giuliani et al. (2021), nous utilisons le tag « *access = yes/permissive/public* » pour sélectionner les EVU d'accès public, permissifs ou sans information (sous la supposition que ces deux derniers soient d'accès public) et le tag « *fee=no* » ou sans information pour identifier les EVU gratuits (WikiOSM, 2020). Concernant les forêts, tous les polygones dérivés de la couche du cadastre ou d'*OSM* ont été considérés comme publics du fait que le droit d'accès est généralement public en Suisse (Loi fédérale sur les forêts, 1991).

Pour définir l'accessibilité à pied aux EVU, nous avons utilisé les données de *swissTLM*^{3D} des chemins piétons, complété par les chemins piétons « informels » issue d'*OSM* (tags *highway=footway*, *highway= path*, *highway= track*) (Figure 2, D). L'outil *Spatial Join* d'*ArcGIS Pro Desktop 10.7.1* permet de sélectionner les EVU qui sont traversés par un chemin. Une distance de 20 m autour des chemins a été considérée pour réduire les possibles erreurs liées à la forme des polygones ou à la délimitation des chemins. Finalement, l'accessibilité physique pour certains EVU a été vérifiée à l'aide de *Google Street Maps* ou sur le terrain. Une vérification de l'ensemble de données a été réalisée par photo-interprétation d'orthophotos.

Ensuite, plusieurs étapes de traitement de données se sont succédées :

- Les polygones contenant des espaces fortement minéralisés ont été enlevés.
- La forme de polygones a été adaptée aux caractéristiques de la surface.
- Les polygones adjacents appartenant à un même type d'EVU (forêt, place, parc, promenade, cimetière, vigne) ont été fusionnés (outil *merge*).
- Les polygones traversés par une barrière physique au déplacement piéton (aéroport, chemin de fer, autoroutes et semi-autoroutes, rivières) ont été découpé en polygones individuels (outils d'édition de polygones) (Figure 2, E et F).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

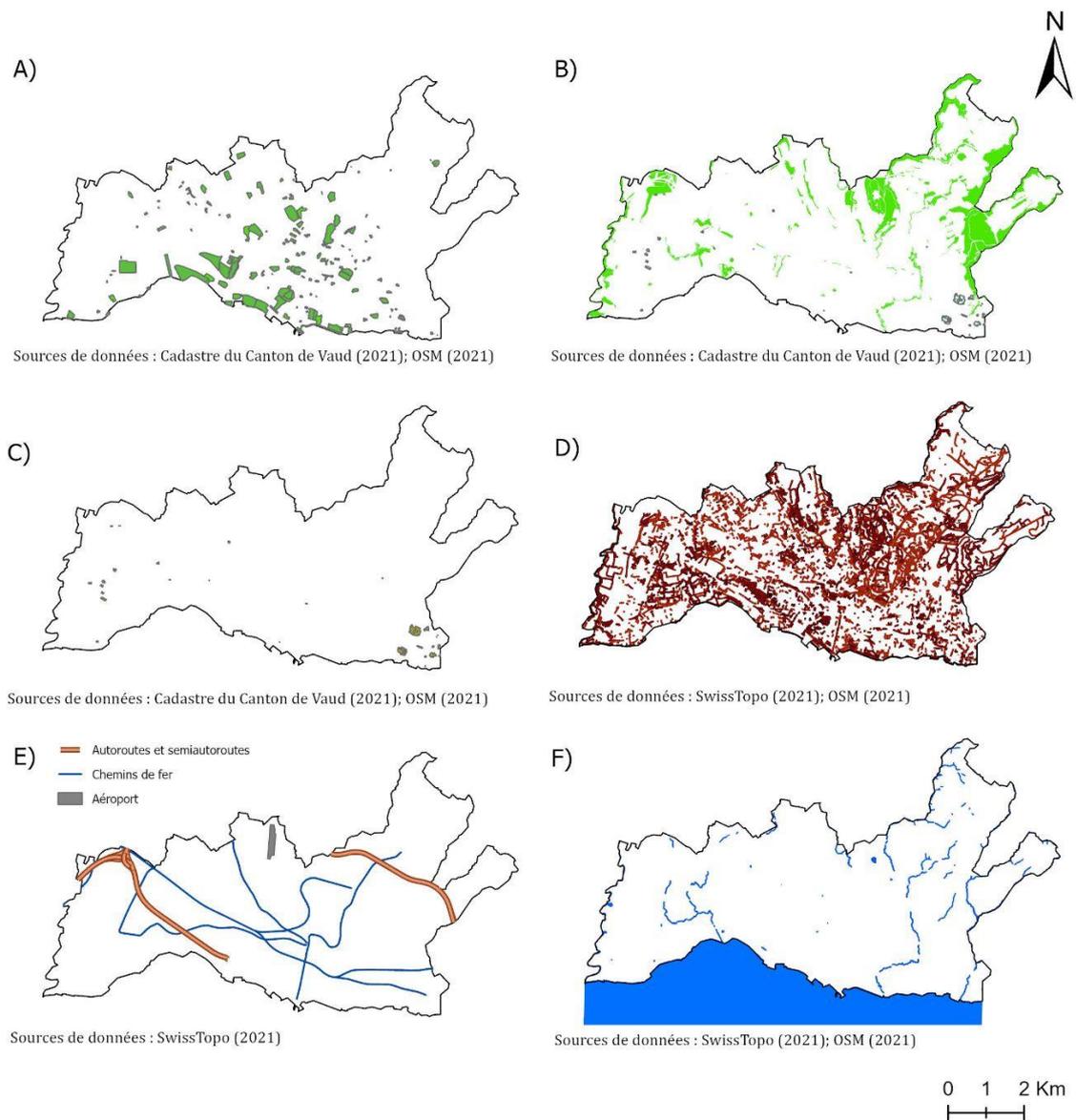


Figure 2. Couches d'entrée pour l'identification des espaces verts urbains. A) Jardins, parcs, promenades et cimetières, B) Forêts, C) Vignes, D) Chemins piétons, E) Autoroutes, semi-autoroutes, chemins de fer et aéroport, F) cours d'eau.

3.1.3 Données pour la modélisation du déplacement à pied

Les données d'entrée utilisées pour modéliser le déplacement piéton aux EVU sont détaillées dans le Tableau 2.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Couverture du sol

La couche de couverture du sol est utilisée pour modéliser le déplacement hors route dans *PD*. Cette couche est créée à partir de la rastérisation de la couche vectorielle des données cadastrales du canton de Vaud (résolution de 0,5 m) (Figure 3, A). À chaque classe de couverture du sol est associée une valeur d'impédance qui représente le niveau de difficulté de marche rencontré par un piéton lorsqu'il traverse la surface (voir section 3.1.5).

Réseau de chemins piétons

Des données utiles à la construction du réseau de déplacement piéton sont disponibles dans la couche TLM_STRASSEN de la base de données TLM^{3D} de Swisstopo qui répertorie les routes et les chemins de toute la Suisse (Figure 3, B). Nous supposons que les piétons se déplacent sur les chemins et les rues qui ont une largeur inférieure ou égale à 10 m (Guinaudeau et al., 2022). De plus, nous allons compléter cette couche (dite de « chemins formels ») avec des « chemins informels » d'OSM (Wen et al., 2020) (Figure 4). Les deux couches des chemins sont constituées par des polygones, représentant les axes de circulation par un ligne centrale (indépendamment du nombre de voies de circulation) et ne représentent pas les trottoirs (Figure 3, C).

Afin de mieux représenter le réseau piéton en *PD*, nous avons générés de *buffers* correspondant aux largeurs des chemins et des rues autour des lignes selon leur type de construction (Annexe I). Pour les chemins piétons issus d'OSM, nous allons considérer une largeur générale de 2 m (la largeur des chemins varie entre 0.6 et 5 m). Ensuite, nous avons représenté des trottoirs autour des rues et routes de plus de 4 m de largeur sur les deux côtés. La largeur d'un trottoir peut varier de 2.50 à 4 m dépendant du nombre de piétons, des constructions avoisinantes et de l'usage qui en est fait (OFROU & Mobilité piétonne Suisse, 2018,p. 32-33), cependant nous allons considérer une largeur standard de 3 m. Finalement, la couche vectorielle du réseau piéton est convertie à *raster* avec une résolution de 0,5 m.

Pour l'analyse basée sur réseau, nous supposons que les rues et les routes de plus de 4 m de largeur ont des trottoirs et donc nous considérons que les trottoirs sont représentés

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

par les mêmes lignes que les rues et les routes, à l'exception des autoroutes et les semi-autoroutes qui ont été enlevées de la couche originale.

Tableau 2. Géodonnées utilisées pour la modélisation du déplacement piéton. L'utilisation des données dans Network Analyst (colonne NA) ou Path Distance (colonne PD) est également indiquée.

Couches d'entrée	Type de donnée	Source (URL)/Clé ou tag d'OSM	Date	NA	PD
Couverture du sol	Vecteur (polygone)	Cadastre du canton de Vaud https://viageo.ch/catalogue/donnee/9719	2020		✓
Rues, routes et chemins piétons « formels »	Vecteur (polylignes)	swissTLM3D: STRASSE = 1m Weg; 2m Weg; 3m, 4m, 6m, 8m 10m Strasse; Markierte Spur; Provisorium https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/landscape/tlm3d.html	2021	✓	✓
Chemins piétons « informels »	Vecteur (polylignes)	OSM : highway=footway ; path ; track	2021	✓	✓
Passages piétons	Vecteur (points)	OSM : crossing	2022	✓	
Modèle Numérique du Terrain (MNT)	Raster	swissALTI3D (SwissTopo) https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/height/alti3d.html#download	2021	✓	✓

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

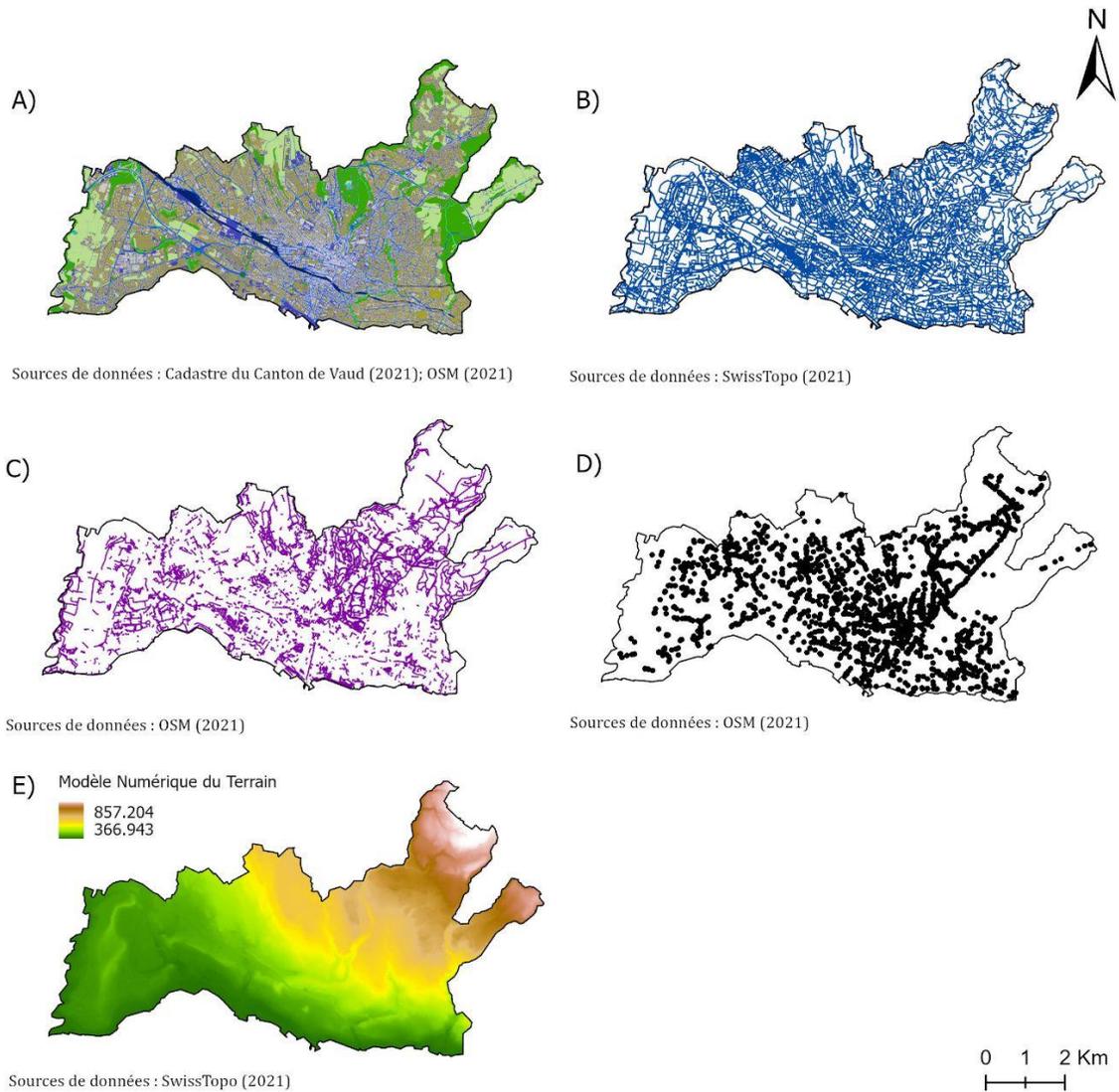


Figure 3. Données d'entrée utilisées pour la modélisation du déplacement piéton. A) Couverture du sol, B) Rues, routes et chemins piétons « formels », C) Chemins piétons « informels », D) Passages piétons, E) Modèle numérique du terrain.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud



Figure 4. Complémentarité entre la couche de chemins piétons « informels » issue d'OSM (en rouge) et « chemins piétons formels » (en bleu) de Swisstopo.

Passages piétons

Les passages piétons sont utilisés dans l'analyse d'accessibilité piétonne basée sur *raster* pour rendre possible la traversée des rues et des routes avec des hautes valeurs d'impédance. Les données sous forme de points sont obtenues d'OSM en utilisant l'attribut « *crossing* » (Figure 3, D). Des *buffers* ont été générées autour des points en fonction de la largeur des chemins, des rues ou des routes sur lesquels ils se trouvent puis rastérisés à une résolution de 0.5m. Les passages piétons sont compris dans plusieurs des lignes dans la couche de chemins piétons utilisée en NA, ainsi, la couche des points de passages piétons n'a pas été utilisée dans l'analyse d'accessibilité basée sur réseau.

Pente

La pente est considérée comme un attribut de coût de déplacement en PD et NA en fonction de la contrainte qui est générée lors du déplacement à pied selon le modèle de Victor et Klein (2011). La valeur de la pente sera utilisée comme un facteur vertical sur PD et comme un attribut de coût sur NA. La pente est calculée sur la base du modèle numérique du terrain (MNT) provenant de swissALTI^{3D} (Figure 3, E). Celui-ci est un modèle à haute résolution décrivant le relief suisse sans végétation ni constructions (Swisstopo, 2020). Nous utilisons le MNT à une résolution 0.5 m (Swisstopo, 2022).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

3.1.4 Construction des modèles de déplacement à pied

Nous allons reprendre deux des modèles piétons de Victor et Klein (2011) pour modéliser l'accessibilité à pied aux EVU : les Personnes à Mobilité Classique (PMC) et les Personnes à Mobilité Réduite (PMR). La catégorie PMC représente des personnes dont la vitesse moyenne de déplacement est régulière et dont l'impact des pentes est faible (Victor, 2010) (Figure 5). La catégorie PMR représente les piétons dont la mobilité est impactée par un coût physique important lors du déplacement et qui sont désavantagés par la présence de pentes raides (Victor, 2010) (Figure 6). Cette catégorie comprend les personnes âgées, les personnes munies de béquilles et les jeunes enfants. Dans les modèles de PMC et PMR, les vitesses de marche sont impactées par le degré de pente ainsi que le type de tronçons du chemin, particulièrement pour les PMR. Pour ce travail, nous ne considérerons que l'effet de la pente sur la vitesse de marche.

Les modèles d'accessibilité piétonne aux EVU se basent aussi sur d'autres assomptions :

- Les piétons peuvent aussi se déplacer hors des chemins et trottoirs, en traversant diverses surfaces et espaces, de préférence les surfaces dures comme les parkings, les places, etc. La couche de couverture du sol permet de modéliser ce mouvement en *PD*.
- Les piétons préfèrent se déplacer sur des chemins ou surfaces propices à la marche. Pour cette raison, dans l'analyse basée sur *raster*, nous considérons des valeurs d'impédance hautes pour toute surface hors des chemins. Sur NA, nous n'avons pas représenté d'autres types de surfaces que les chemins, rues et routes.
- Le piéton cherche « (...) toujours à marcher le moins possible, voire le moins longtemps possible » (Victor, 2010, p. 27). C'est pour cela que les modèles calculent le minimum temps de marche à l'EVU le plus proche des lieux de résidence. Cependant, les gens peuvent prendre plus de temps pour arriver à un EVU qui répond mieux à leurs préférences (Giuliani et al., 2021; Jalkanen et al., 2020).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

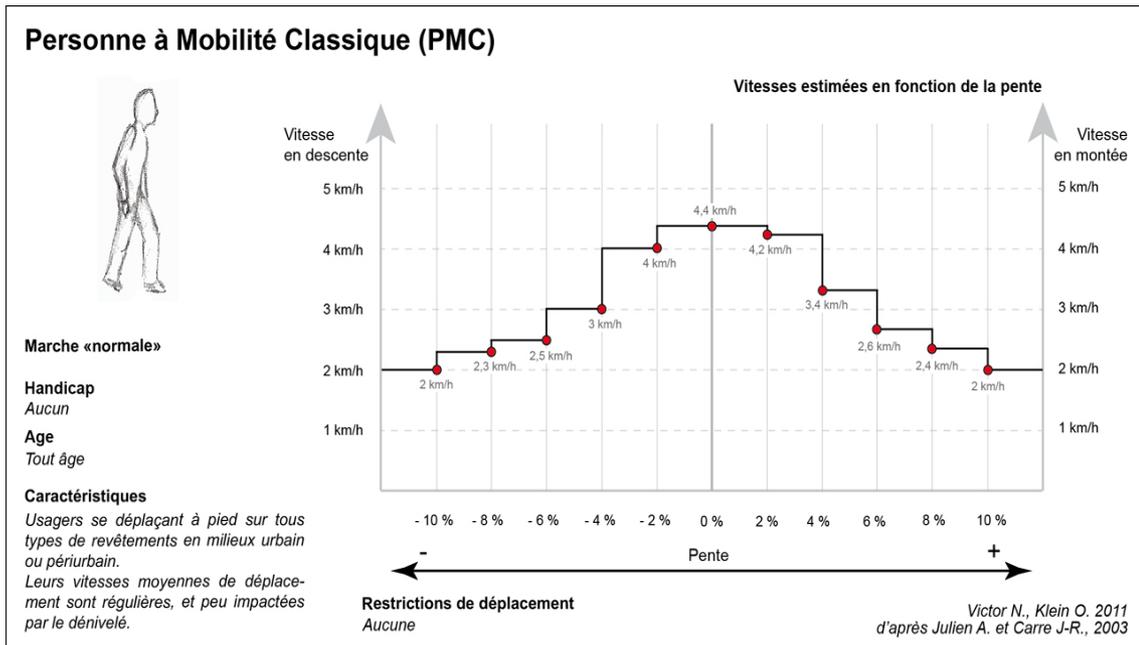


Figure 5. Modèle de vitesse de déplacement pour une personne à mobilité classique (PMC).
Source : Victor et Klein (2011).

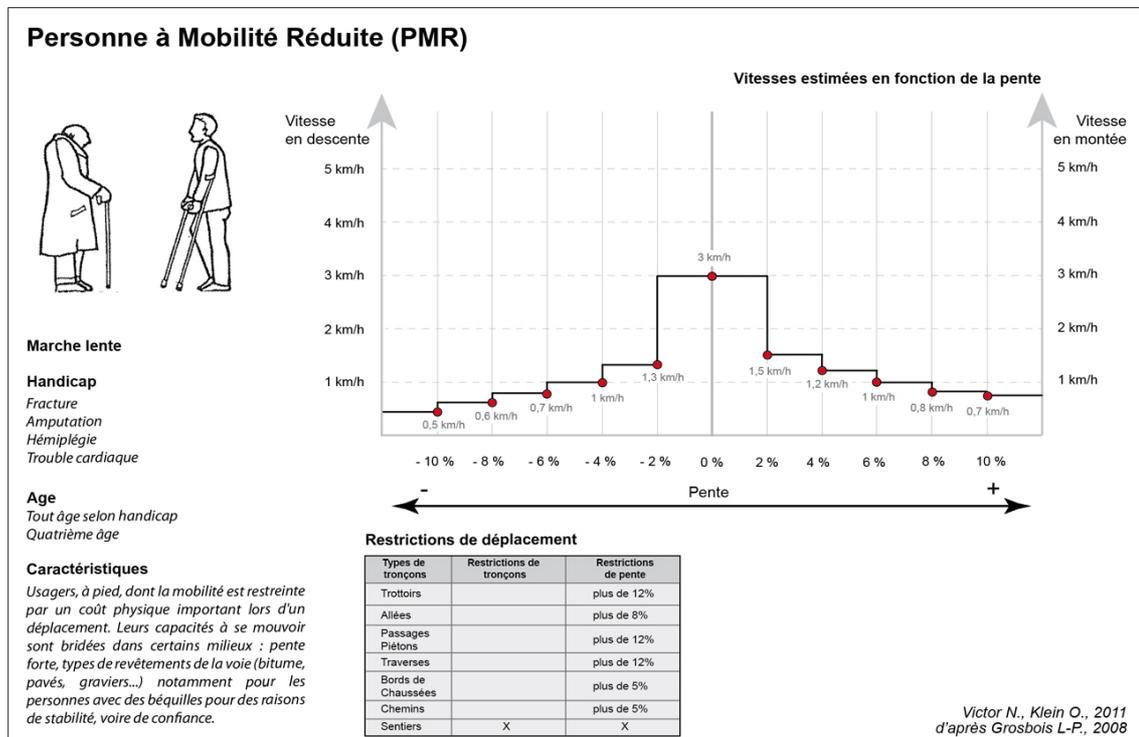


Figure 6. Modèle de vitesse de déplacement pour une personne à mobilité « réduite » (PMR).
Source: Victor et Klein (2011)

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

3.1.5 Analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU par la méthode basée sur *raster*

Dans les méthodes basées sur *raster*, les données utilisées sont composées par une série de cellules (ou pixels) de taille et d'espacement réguliers. Le déplacement se représente par le mouvement d'une cellule vers une autre et a 8 directions possibles, comme le montre la figure 7, A. Le mouvement est déterminé en fonction d'un coût de déplacement (le temps de trajet) attribué à chaque cellule (Delamater et al., 2012). Le temps de trajet est calculé à partir des dimensions de la cellule et de la vitesse ou temps de déplacement attribué à la cellule. L'équation 1 montre un exemple de calcul du temps de trajet (TD_{AD}) depuis la cellule A vers la cellule D en passant par la cellule E, illustré par la figure 7, B (Delamater et al., 2012, p. 4; Esri, 2022d):

$$TD_{AD} = \left(\frac{d}{S_A} + \frac{d}{S_E} \right) + \left(\frac{d}{S_E} + \frac{d}{S_D} \right) \quad (1)$$

Où d est la distance entre les centres des cellules, qui est égale à la résolution spatiale du *raster*, et la vitesse de déplacement (S_i) définie pour chaque cellule. La division par 2 se produit pour chaque étape du mouvement car la moitié de chaque cellule est traversée à chaque étape.

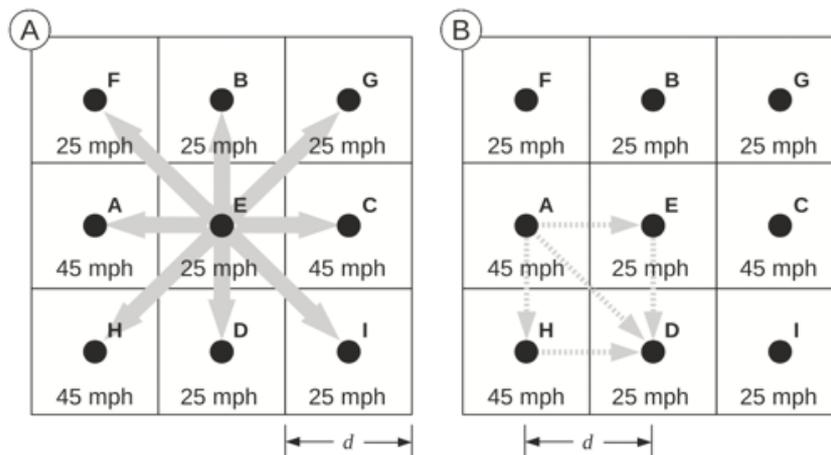


Figure 7. Représentation du mouvement dans la méthode basée sur raster. A chaque cellule est assignée une valeur de coût de déplacement (exprimée ici en miles par heure). La figure A) montre les directions possibles du déplacement depuis la cellule E. La figure B) indique les

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

mouvements possibles pour arriver à la cellule D depuis la cellule A. Source : Delamater et al. (2012, p. 4).

Pour mesurer le temps de marche à un EVU, nous définirons le coût de déplacement comme le temps (en secondes) nécessaire pour traverser une cellule à pied. *PD* calcule alors le temps de déplacement cumulé depuis des cellules de destination vers tout le reste des cellules. Les facteurs considérés dans le calcul du coût total cumulé sont les suivants (Esri, 2022c) :

$$\begin{array}{l} \text{Coût total} \\ \text{cumulé} = \end{array} \begin{array}{l} \text{Coût de} \\ \text{déplacement sur} \\ \text{la surface}^{(1)} \end{array} * \begin{array}{l} \text{Caractéristiques} \\ \text{de la personne} \\ \text{qui se déplace}^{(2)} \end{array} * \begin{array}{l} \text{Caractéristiques} \\ \text{du mouvement} \\ \text{sur la surface}^{(3)} \end{array}$$

(1) Le coût de déplacement sur la surface est déterminé par les caractéristiques de la surface qui pourraient exercer une influence sur le temps de marche. Dans ce travail, la couche de coût de surface (Figure 8) est générée à partir de l'union des couches de couverture du sol et du réseau piéton (outil *Cell Statistics*), préalablement reclassées en valeurs d'impédance définies selon la difficulté ou l'impossibilité de franchir à pied une classe de surface (Tableau 3).

Une valeur d'impédance égale à 1 a été attribuée au réseau de chemins piétons, aux surfaces vertes (jardins et autres surfaces vertes) et grises (places de parking, rues, trottoirs), car elles sont propices à la marche. Cette valeur n'aura donc pas d'impact dans le calcul du coût total. D'autres surfaces, comme les rues et les routes ont une valeur plus haute d'impédance, qui multiplie donc le coût total. Les rues de 3 et 4 m de largeur sont généralement des rues partagées par différents moyens de transport (vélo et véhicules motorisés) donc ils ont une valeur d'impédance plus élevée que les surfaces dédiées uniquement aux piétons. Les rues de 6 et 10 m de largeur ont la valeur d'impédance la plus élevée afin de décourager au maximum le mouvement à pied dans ces surfaces. Les zones infranchissables pour les piétons, correspondant aux aéroports, aux chemins de fer et aux cours d'eau ont une valeur égale à zéro et ne vont pas être prises en compte dans le calcul du déplacement piéton. De même, les zones agricoles (champs, prés, pâturages) sont aussi considérées comme des barrières, car les personnes ne les traversent généralement pas,

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

même si cela reste physiquement possible. Les autoroutes et les semi-autoroutes sont également considérées comme des obstacles aux déplacements piétons, tout comme les bâtiments.

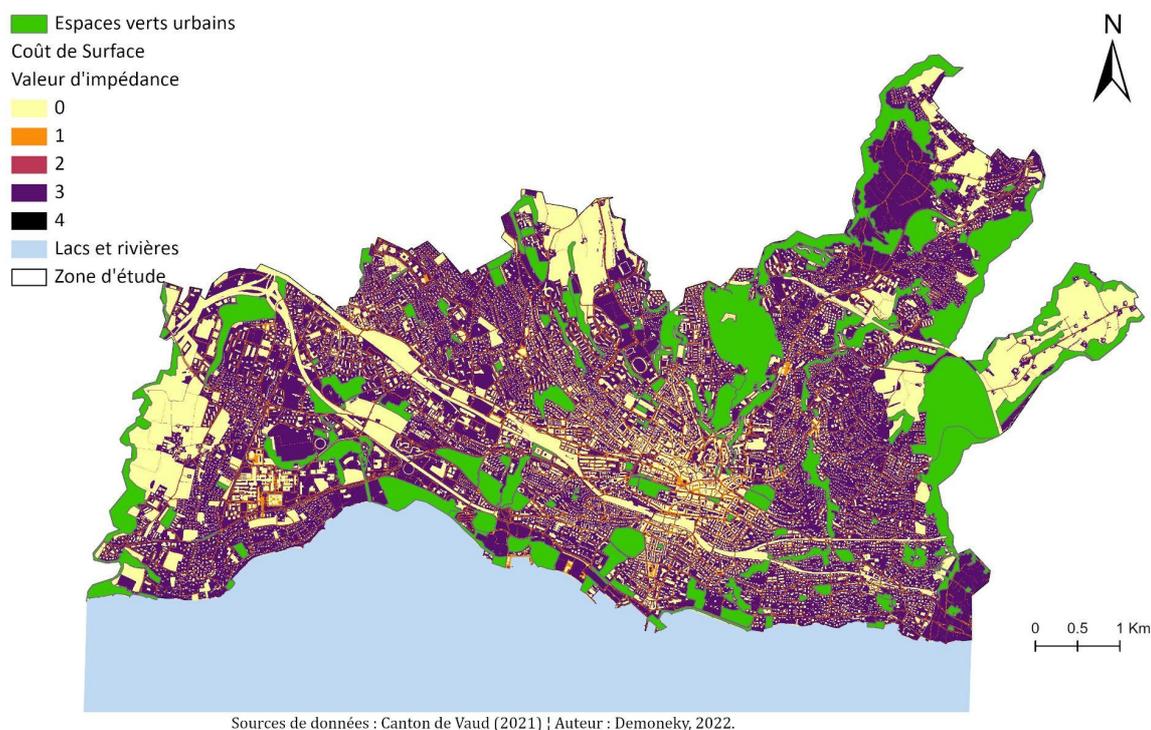


Figure 8. Couche de coût de surface.

Tableau 3. Valeurs d'impédance assigné à chaque type de surface.

Couche d'entrée	Classes	Valeur d'impédance
Réseau de chemins piétons	- Trottoirs - Chemins Piétons « formels » - Chemins Piétons « informels » - Passages Piéton	1
Couverture du sol	- Trottoirs, places piétonnières	
Réseau de chemins piétons	- Rues secondaires (3 m)	2
Couverture du sol	- Forêts - Jardins - Îlots - Accès, places privées	3

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

	- Divers - Autres revêtements durs	
Réseau de chemins piétons	- Routes secondaires (4m) - Routes principales (6-10m)	4
Couverture du sol	- Cours d'eau - Eau stagnante - Bassins - Bâtiments - Chemins de fer - Places d'aviation - Gravières - Décharges - Rochers - Éboulis, sable - Champs, prés, pâturages	0
Réseau de chemins piétons	- Autoroutes et semi-autoroutes	

(2) Les caractéristiques de la personne qui se déplace définissent le mode de déplacement et la façon dont elles se déplacent. Dans ce travail, nous considérons que les personnes se déplacent à pied selon leurs capacités physiques, prenant en compte des vitesses de déplacement différentes pour les piétons à mobilité « classique » et « réduite » (voir section 3.1.4).

(3) Les caractéristiques du mouvement considèrent les effets que certains facteurs, comme la pente, le vent, la rugosité, entre autres, peuvent avoir sur le mouvement lors du déplacement d'une cellule vers une autre. Nous allons seulement considérer la pente comme facteur verticale (FV) qui impacte la vitesse de marche. Le FV est un multiplicateur qui permet d'ajuster le coût total à l'effort fait lors du déplacement le long des pentes rencontrées (Esri, 2022d). Le FV est défini en fonction de l'angle de déplacement relatif vertical (VRMA par ses sigles en anglais) représenté par la pente (en degrés). La relation entre le FV et la pente est déterminée par les modèles piétons de Victor et Klein (2011). Le FV est exprimé en unités de temps de marche, comme la couche de coût de surface. Les valeurs ont été calculées sur *excel* comme l'inverse de la vitesse en fonction du degré de pente en heures/mètre (Figure 9 et 10) et introduits sur *PD* à travers un tableau (Annexe II).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Enfin, les données représentant chaque facteur du calcul du coût totale cumulé ont été rassemblées dans l'environnement de l'outil *Path Distance* de ArcGIS Pro Desktop 10.7.1 pour calculer le temps de marche aux EVU pour chaque modèle de déplacement piéton (Figure 11). PD a l'avantage de représenter les EVU par les polygones d'origine à la différence de NA, où les EVU sont représentés par des points. Cependant, dans PD on suppose que les EVU sont accessibles de tous les côtés, c'est qui ne pas forcément vrai (Chênes et al. 2021).

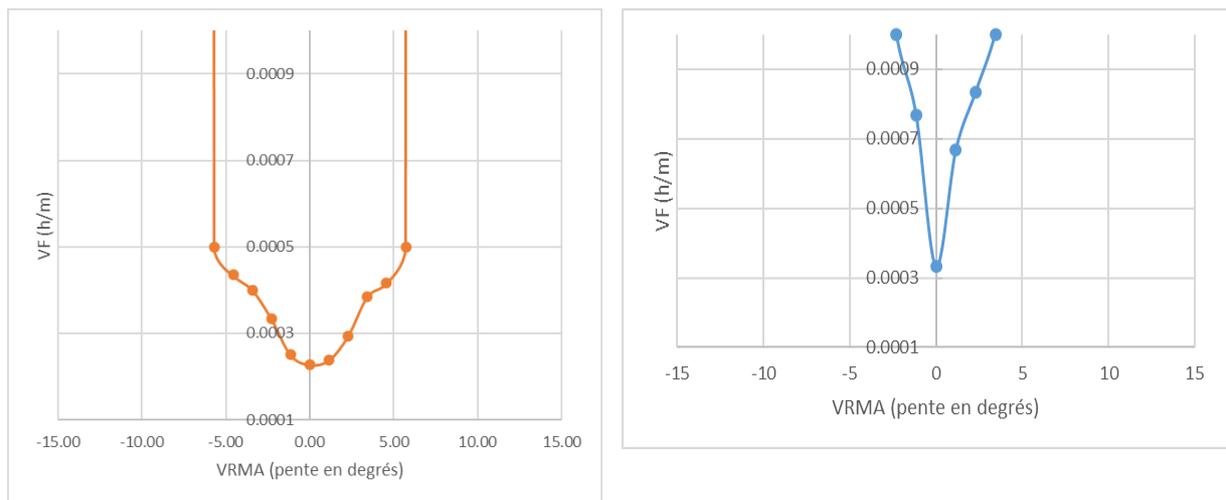


Figure 9 et 10. Diagrammes de facteur vertical pour le modèle PMC (à droite) et PMR (à gauche).

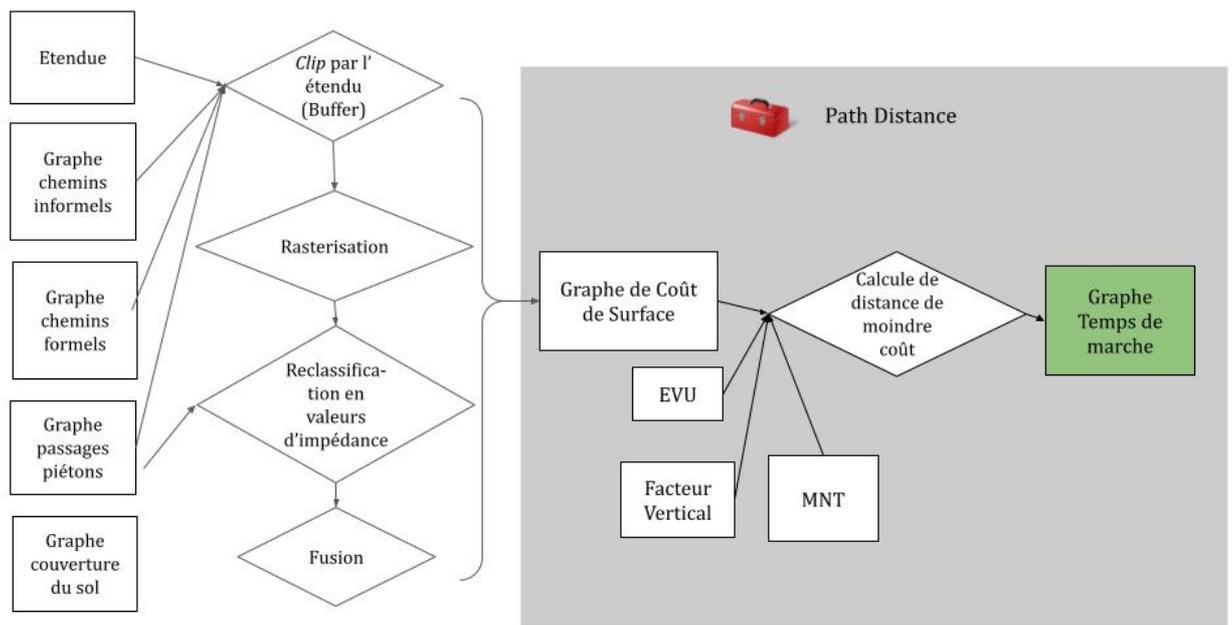


Figure 11. Workflow simplifié du modèle de déplacement piéton basé sur l'outil PD.

3.1.6 Analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU par la méthode basée sur réseau

La méthode de déplacement basée sur réseau considère le mouvement exclusivement entre les chemins ou les rues représentés par des segments (*edges*) et reliés par des intersections ou jointures (*nodes*) qui forment le réseau (figure 12, A). Cependant, « tout espace ne faisant pas partie du réseau est essentiellement *indéfini* ou vide » [traduction libre] (Delamater et al., 2012, p. 3). Le temps de marche est mesuré en fonction de la largeur du segment et de leur vitesse associée. Delamater et al. (2012, p. 3) montrent un exemple de calcul du temps de déplacement depuis le point A vers le point D, avec une valeur d'impédance définit pour le virage dans le nœud E, illustré par la figure 12, B :

$$TD_{AD} = \left(\frac{d_{AE}}{S_{AE}} + \frac{d_{ED}}{S_{ED}} + P_R \right) \quad (2)$$

Où d_{AE} est la distance du segment A-E, d_{ED} la distance du segment E-D, S_{AE} la vitesse de déplacement du segment A-E, S_{ED} la vitesse de déplacement du segment et P_R le délai pour effectuer un virage à droite de 90° au nœud E.

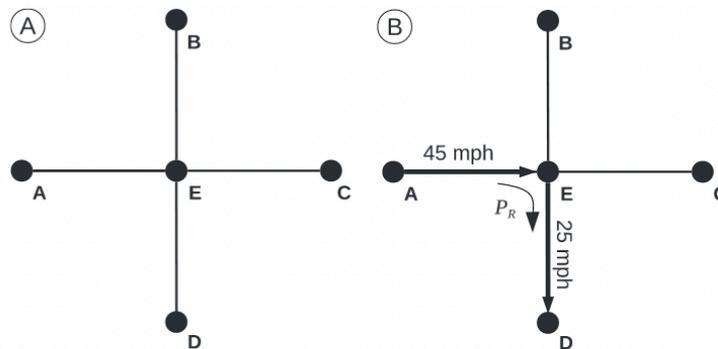


Figure 12. Représentation du mouvement dans la méthode basée sur réseau. A chaque segment est assignée une valeur de vitesse de déplacement (exprimée ici en mile par heure). La figure A) montre les segments (lignes) et les jointures (points) du réseau et la figure B) le mouvement depuis le point A vers le point D en passant par le point E. Source : Delamater et al. (2012, p. 4).

Dans ce travail, le réseau est constitué par la couche des chemins, des rues, des routes de Swisstopo et d'OSM. Nous supposons que les personnes se déplacent sur les polygones représentant des rues (secondaires, secondaires de quartier et principales) de la même façon qu'ils le feraient sur des trottoirs. Les grands axes routiers ne sont pas pris en compte du fait

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

Tableau 4. Calcul des pentes en pourcentage en ArcGIS Pro. Modifié de De Roulet (2012, p. 20)

From-To	$[pente_ft] = ([Z_end] - [Z_start]) / ([Shape_Length]) * 100$
To-From	$[pente_tf] = [pente_ft] * -1$

La connectivité du réseau est définie par l'intersection entre la couche de chemins piétons « formels » et la couche des chemins piétons « informels ». Des sommets ont été générés à chaque intersection entre les lignes correspondant à chaque couche avec l'outil *Integrate* sur *ArcGIS Pro Desktop 10.7.1* pour assurer leur connectivité (Esri, 2022a; Loreno, 2014). Aucune restriction ou coût supplémentaire n'a été défini pour les tournants. Le niveau d'élévation entre segment n'a pas été modélisé en concordance avec la représentation du réseau piéton sur PD. Ainsi, tout le réseau piéton est connecté même s'ils ont des positions verticales différentes. Finalement, nous n'avons pas considéré des attributs de hiérarchie du fait qu'on suppose que les personnes n'ont pas de préférences entre les trottoirs, les chemins piétons « formels » et « informels ».

Nous utilisons la fonction *Service Areas* pour générer les zones de desserte autour des EVU. Cet outil accepte uniquement des entités de points comme localisations depuis lesquelles vont se calculer les zones de services. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour transformer les polygones des EVU en points, présentant chacune des limites, comme la génération de centroïdes (La Rosa et al., 2018), la génération de points à l'intersection entre le périmètre des polygones et les chemins qui traversent les EVU (Chênes et al. 2021), la génération de points sur les périmètres des polygones des EVU à une équidistance de 250 m, car c'est la distance recommandée par certains auteurs pour placer des entrées aux EVU (Guinaudeau et al., 2022) et finalement la digitalisation manuelle des entrées de chaque EVU à l'aide des orthophotos (Comber et al., 2008 ; Gong et al., 2016). Dans ce travail, nous avons suivi la méthodologie appliquée par Guinaudeau et al. (2022) à l'aide de l'outil *Generate Points Along a Line* (Figure 14). Seulement 4 EVU de petite surface n'ont pas pu être représentés par cette méthode, donc un point a été généré de manière aléatoire. Ces points devaient être placés sur le réseau pour construire les zones de desserte, donc une distance de recherche de points de 200 m a été défini (*Snap to network*). Finalement, nous avons défini

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

des zones de desserte à des distances-temps de marche de 5, 5-10, 10-15, 15-20 et plus de 20 minutes de distance depuis les entrées des EVU (Figure 15).



Figure 14. Extrait de la couche de points générés à chaque 250 m sur le périmètre des EVU. Parc Louis-Bourget, situé à Lausanne-Centre dans le secteur de Vidy.

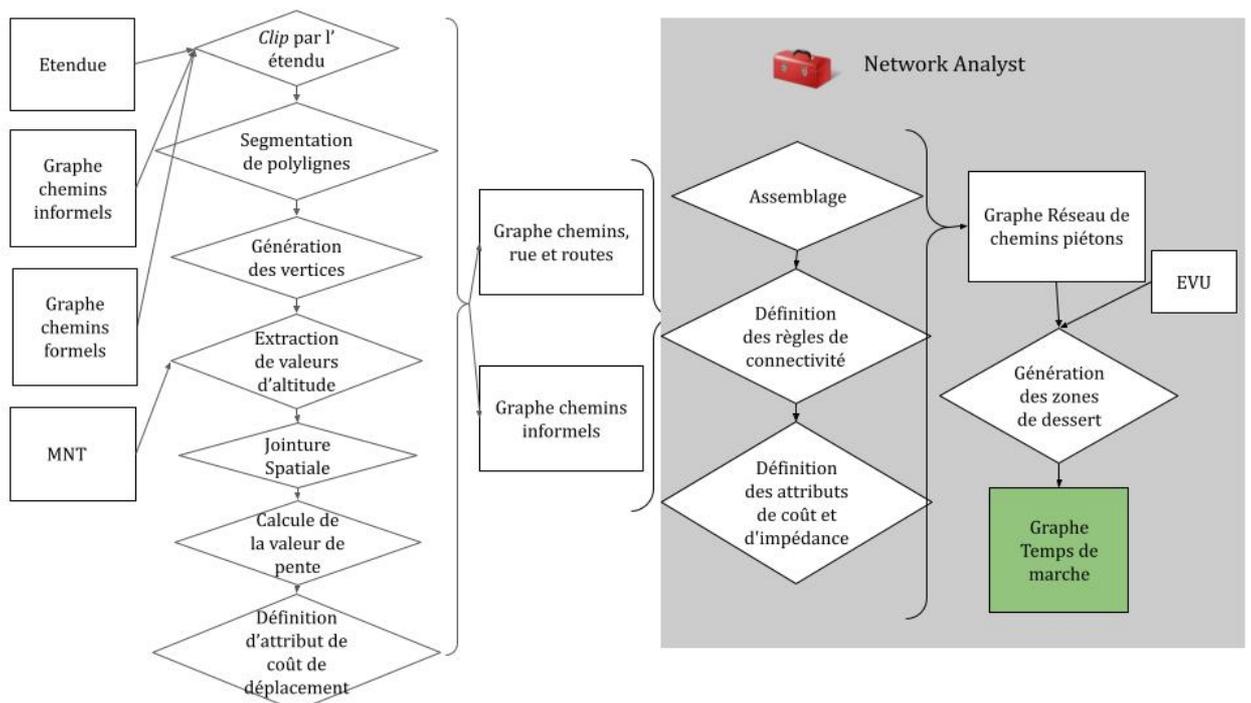


Figure 15. Workflow simplifié du modèle de déplacement piéton basé sur l'outil Network Analyst.

3.2 Partie II : Statistiques de l'accessibilité piétonne aux EVU

Le niveau d'accessibilité piétonne aux EVU est mesuré pour les personnes à mobilité dite « classique », sur l'assumption qu'ils ne disposent pas des contraintes physiques à la

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

marche, et pour les personnes à mobilité dite « réduite », qui comprend les enfants entre 0 et 7 ans et les personnes âgées de plus de 65 ans. Le seuil d'âge de 7 ans correspond à l'âge depuis lequel les enfants présentent une capacité de marche similaire aux adultes (Fédération Française de la Randonnée Pédestre, 2022). Pour les enfants en bas âge qui ne marchent pas encore, nous supposons que les trajets en poussette génèrent une diminution du temps de marche de la personne accompagnante. Pour les personnes âgées, le seuil d'âge de 65 ans correspond à l'âge de la retraite en Suisse¹. Il a aussi été appliqué par d'autres auteurs (Enssle & Kabisch, 2020; Gong et al., 2016; Kabisch & Haase, 2014b; Wen et al., 2020). Nous considérons que ces personnes présentent des contraintes physiques pour la marche et peuvent avoir besoin d'aide supplémentaire pour se déplacer (par exemple de canne, béquilles, etc.).

Les données sur les classes d'âge de la population font partie de la statistique de la population et des ménages (STATPOP) de l'Office fédéral de la statistique (Tableau 5). Chaque habitant est représenté par des coordonnées positionnées, en principe, au milieu de la surface au sol du bâtiment (ou sur une autre partie de la surface au sol des bâtiments dans des cas particuliers) (Office fédéral de la statistique, 2015, p. 23). Ces données spatiales sont converties en une classe d'entités de points (Figure 16). Du fait que les barrières au déplacement sont transformées en *NoData* dans la couche résultante du temps de marche sur *PD*, nous avons utilisé la fonction *Nibble* sur ArcGIS Pro Desktop 10.7.1 qui permet d'assigner une valeur aux cellules *NoData* à partir de la valeur de leur cellule voisine la plus proche (Esri, 2022c) afin de pouvoir calculer les statistiques d'accessibilité piétonne aux EVU (outil *Spatial Join*). Les résultats sont exprimés en proportion de personnes du total des populations cibles qui se trouvent à différents temps de marche des EVU.

¹ La retraite est fixée à 64 ans pour les femmes et à 65 ans pour les hommes en Suisse (Confédération Suisse, 2022).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Tableau 5. Données d'entrée pour les calculs d'accessibilité piétonne

Couches	Type de donnée	Source (URL)	Date
Population	Tabulaire	Office Fédéral de la Statistique (OFS) https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/population/enquetes/statpop.html	2020

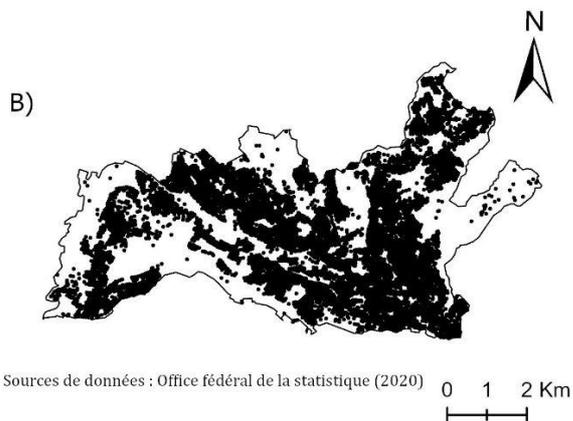


Figure 16. Emplacement de la population résidente sur la zone d'étude.

3.3 Partie III : Comparaison des résultats des modèles théoriques avec les possibles parcours effectués par des usagers des EVU dans la région de Lausanne

Pour comparer les résultats des modèles avec les possibles parcours effectués par des usagers des EVU, nous utilisons des données récoltées par Bauchot (2022) lors d'une série d'entretiens réalisées entre mai et juin de 2021 dans certains EVU de la zone urbaine du canton de Vaud (Annexe III). Les personnes ont été questionnées sur l'endroit, adresse ou intersection des rues, depuis lesquels elles étaient parties pour atteindre l'EVU et leur moyen

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

de transport². 132 répondants déclarent être arrivés à l'espace vert à pied mais seulement 18 adresses ont pu être géocodées³ de manière précise pour un total de 10 EVU (Figure 17 et Tableau 6). Aucune information supplémentaire sur le point de départ n'a été demandée ni donnée par les personnes interviewées. D'autres informations, comme le type d'EVU (parc ou forêt), l'âge et l'activité principale que les personnes interviewées pratiquent dans les EVU ont aussi été recensées.

Les outils des chemins de moindre coût, comme *Cost Distance* de l'extension *Spatial Analyst* et *Closest Facilities* de l'extension *Network Analyst* d'ArcGIS Pro, calculent le chemin qui minimise la somme des coûts pour relier deux localisations. Ces outils ont été utilisés pour estimer les possibles chemins effectués par les personnes interviewées depuis leurs points de départ vers l'EVU de destination. Cela permet d'estimer le temps de marche que les personnes ont possiblement fait pour arriver à l'EVU. De plus, des calculs des chemins de moindre coût ont aussi été effectués pour l'EVU le plus proche. Ce dernier permet de vérifier si les personnes se déplacent aux EVU le plus proche, comme il est supposé par les modèles d'accessibilité aux EVU. D'autres informations, comme l'âge ou le type d'EVU, permettront d'observer si ces caractéristiques exercent une influence sur le temps de marche.

L'un des points de départ pour atteindre le Parc Carl Sauter, le Parc Tour Grise et le Parc Hermitage ont dû être légèrement déplacés pour permettre l'analyse des chemins du moindre coût sur *Cost Distance* car ils étaient placés sur des cellules *NoData* représentant des bâtiments.

² Réponse à la question n° 7 : Nom de la rue (ou intersection de rues) depuis laquelle vous êtes venu-e. Source : Bauchot (2022).

³A l'aide d'un géocodeur (<https://geocode.localfocus.nl>)

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

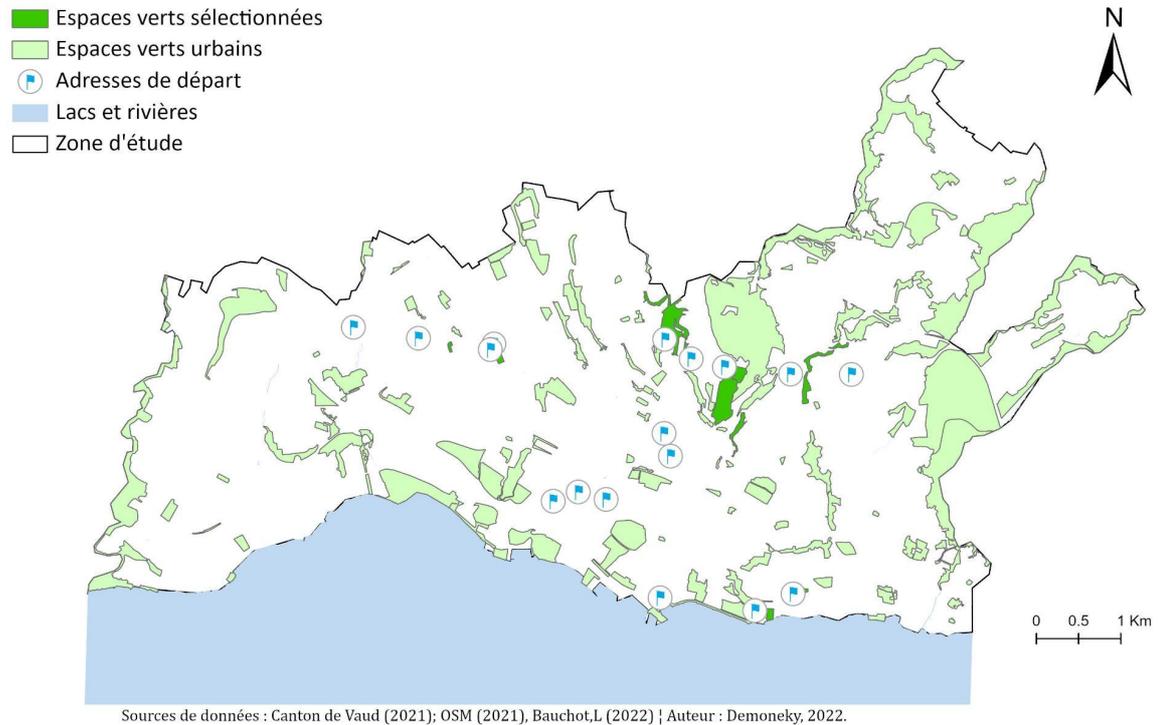


Figure 17. Emplacement des adresses de départ et les EVU de destination des personnes interviewées.

Tableau 6. Nombre d'adresses de départ des visiteurs par EVU de destination et nombre de points représentant des entrées des EVU pour l'analyse des chemins de moindre coût sur NA.

EVU de destination	Identifiant	Nombre de points d'entrée des EVU utilisés en NA	Nombre d'adresses
Forêt de Vallon	1	6	1
Parc de l'Hermitage	2	9	3
Forêt de Vauchère	3	10	2
Petit Parc du Prieuré	4	1	2
Parc Carl Sauter	5	1	2
Parc Montoie	6	1	2
Parc Tour Grise	7	1	2
Parc Grand-pré	8	1	2

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Parc Chamblandes	9	1	1
Forêt de Mermet	10	20	1

4. Résultats

4.1 Modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU

4.1.1 Les espaces verts dans la zone urbaine vaudoise

La surface totale de la zone d'étude est de 43,49 km², dont la surface des EVU représente environ 20% (7,87 km²). 72% de ces surfaces sont des forêts, 20% des parcs, 5% des cimetières, 2% des promenades et jardins d'immeubles et 1% des vignes (Figure 18). La plupart des zones de forêts se situent au nord de Lausanne-Centre et dans la commune d'Epalinges, au nord-est de la commune de Paudex et à l'ouest des communes d'Ecublens et Saint-Sulpice, formant des pénétrantes de verdure en passant du nord au sud du territoire. Les parcs se situent surtout dans le centre-ville de Lausanne, particulièrement à proximité du bord du Lac Léman, tandis que les communes de l'Ouest lausannois ainsi que les communes de Lavaux-Oron sont dépourvues de parcs publics. Néanmoins, les communes de Pully et Paudex présentent quelques zones de vignes. Les cimetières, même s'ils sont peu nombreux, forment de grands espaces de verdure situés pour la plupart à Lausanne-Centre.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

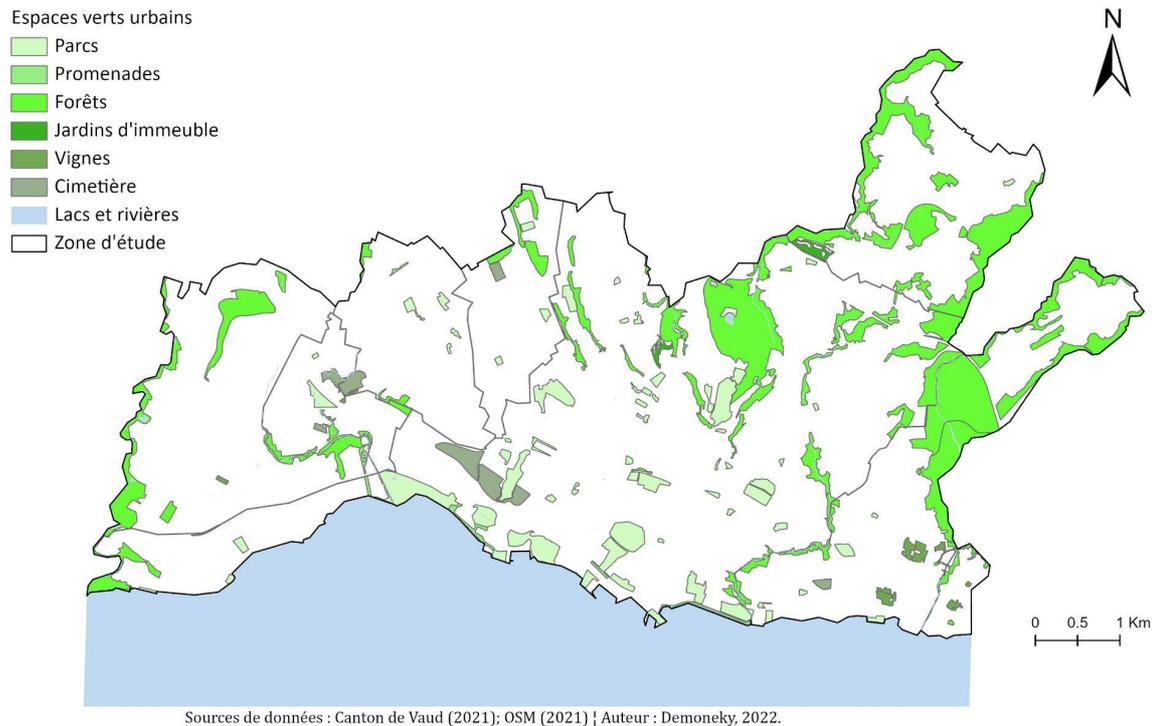


Figure 18. Espaces verts urbains identifiés dans la zone d'étude.

4.1.2 Analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU par la méthode basée sur *raster*

Dans le modèle PMC (Figure 19), les zones de moins de 5 min de marche relient plusieurs EVU du fait de leur proximité spatiale. Les zones correspondantes à plus de 20 min de marche d'un EVU se trouvent principalement au croisement de l'autoroute 17 à Ecublens, à proximité de la gare de Lausanne et au nord de l'aéroport Lausanne-Blécherette. Cela montre l'effet de l'inclusion des barrières physiques au déplacement piéton dans le modèle basé sur *raster*. Nous observons que le temps de marche augmente fortement dans le modèle PMR par rapport au modèle PMC (Figure 20). Les zones correspondant à plus de 5 min de marche dans le modèle PMC deviennent pratiquement des zones de plus de 20 min de marche dans le modèle PMR.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité classique (PMC)

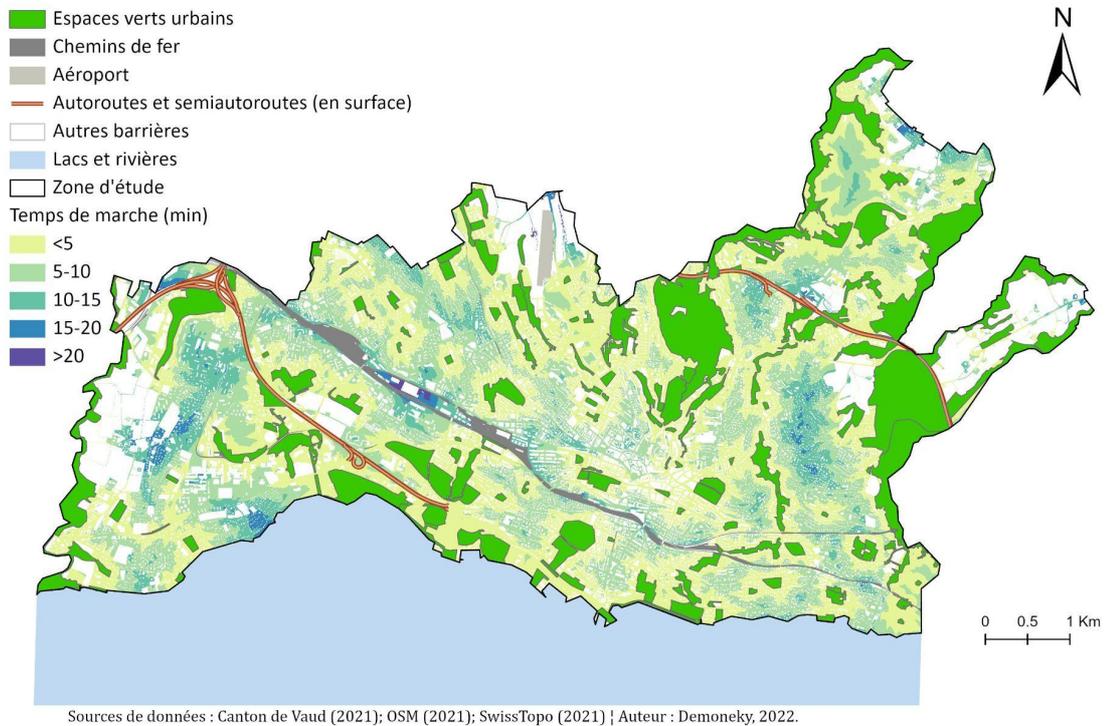


Figure 19. Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité classique (PMC) sur la base de l'outil Path Distance.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité réduite (PMR)

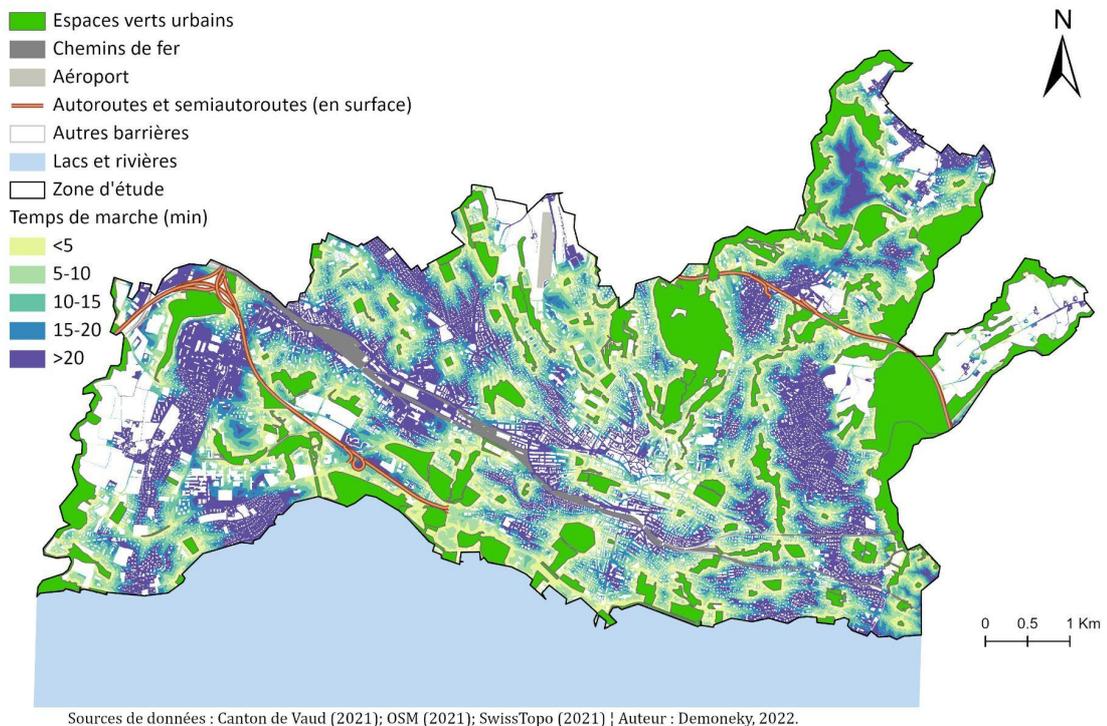


Figure 20. Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité « réduite » (PMR) sur la base de l'outil Path Distance.

4.1.3 Analyse de l'accessibilité piétonne aux EVU par la méthode basée sur réseau

Sur la carte d'accessibilité piétonne obtenue par le modèle PMC, réalisée avec NA (Figure 21), les zones de moins de 5 min à pied occupent la majeure partie de la zone d'étude, alors que les zones de plus de 20 min sont réduites et se situent au nord-ouest de l'aéroport Lausanne-Blécherette et au nord du croisement de l'autoroute 17 à Ecublens ainsi qu'au nord du Bois de la Chenaulaz.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité classique (PMC)

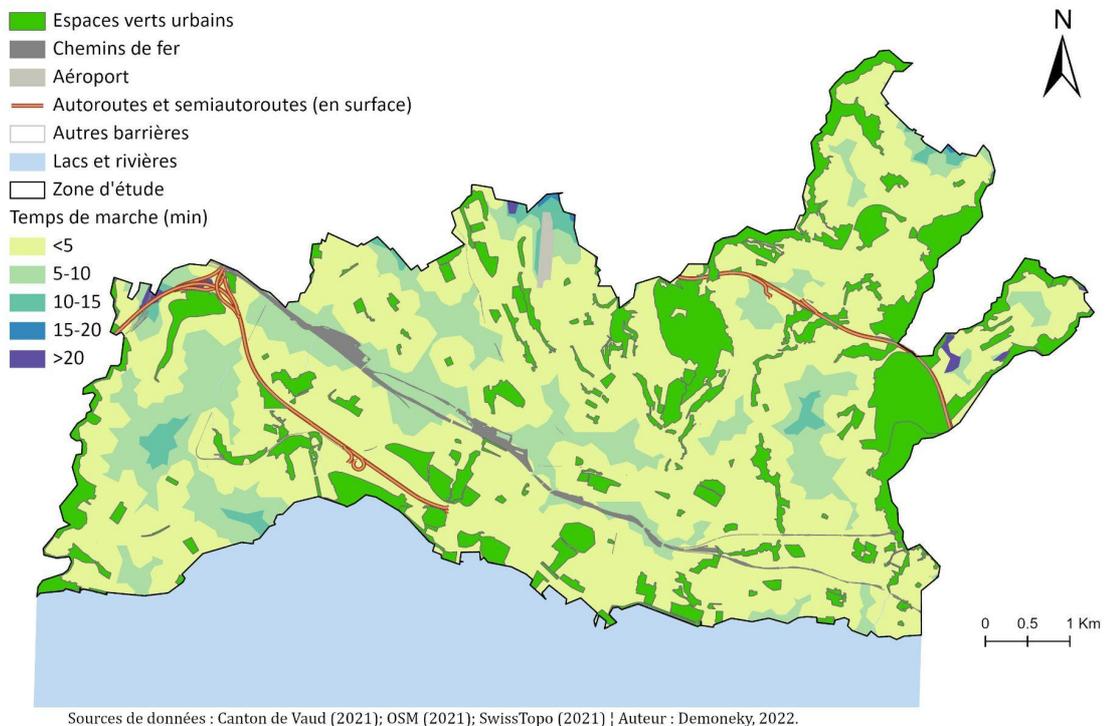


Figure 21. Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité classique (PMC) sur la base de l'outil Network Analyst.

Sur la carte d'accessibilité piétonne effectuée pour le modèle PMR, les zones de plus de 10 min à pied sont prononcées et les zones de plus de 20 min prennent plus d'ampleur par rapport la carte du modèle PMC. Elle montre également des nouvelles zones de plus de 20 min de marche qui sont situées au nord-est de l'aéroport Lausanne-Blécherette, autour de la gare de Lausanne et à l'extrémité nord de la commune de Pully (Figure 22).

Les différences entre les zones de dessertes obtenues avec PD et NA pour le même modèle de déplacement sont notables. Pour le modèle PMC, les zones de moins de 5 min à pied avec PD se superposent presque dans leur totalité avec les zones de moins 5 min avec NA, qui sont beaucoup plus larges (Figure 23, A). Cependant, pour les zones de desserte de plus de 5 min à pied, les différences entre les résultats obtenus avec NA et PD s'accroissent et les zones de chevauchement diminuent (Figure 23, B et C). Nous observons dans les cartes obtenues avec PD que presque toutes les zones présentent des valeurs de temps de marche

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

plus élevées qu'avec NA. Par exemple, les zones de 15-20 min et de plus de 20 min de marche avec PD autour de la gare de Lausanne correspondent à des zones de temps de marche de 5-10 min de marche avec NA (Figure 23).

Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité réduite (PMR)

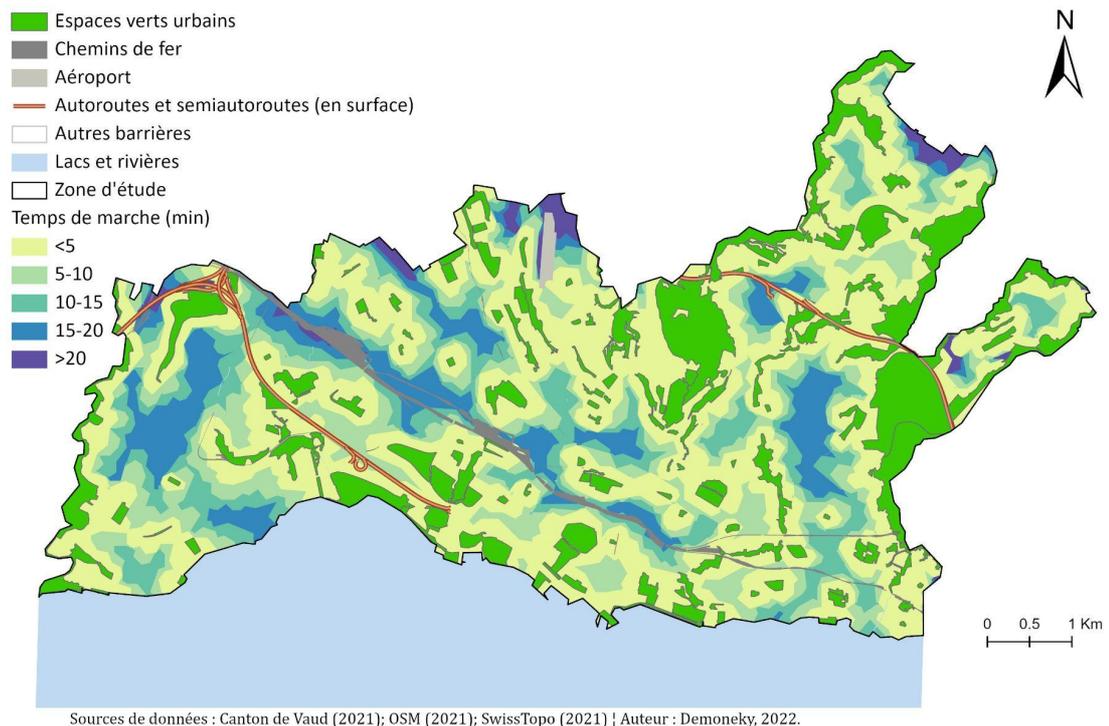


Figure 22. Accessibilité piétonne aux EVU pour les personnes à mobilité « réduite » (PMR) sur la base de l'outil Network Analyst.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

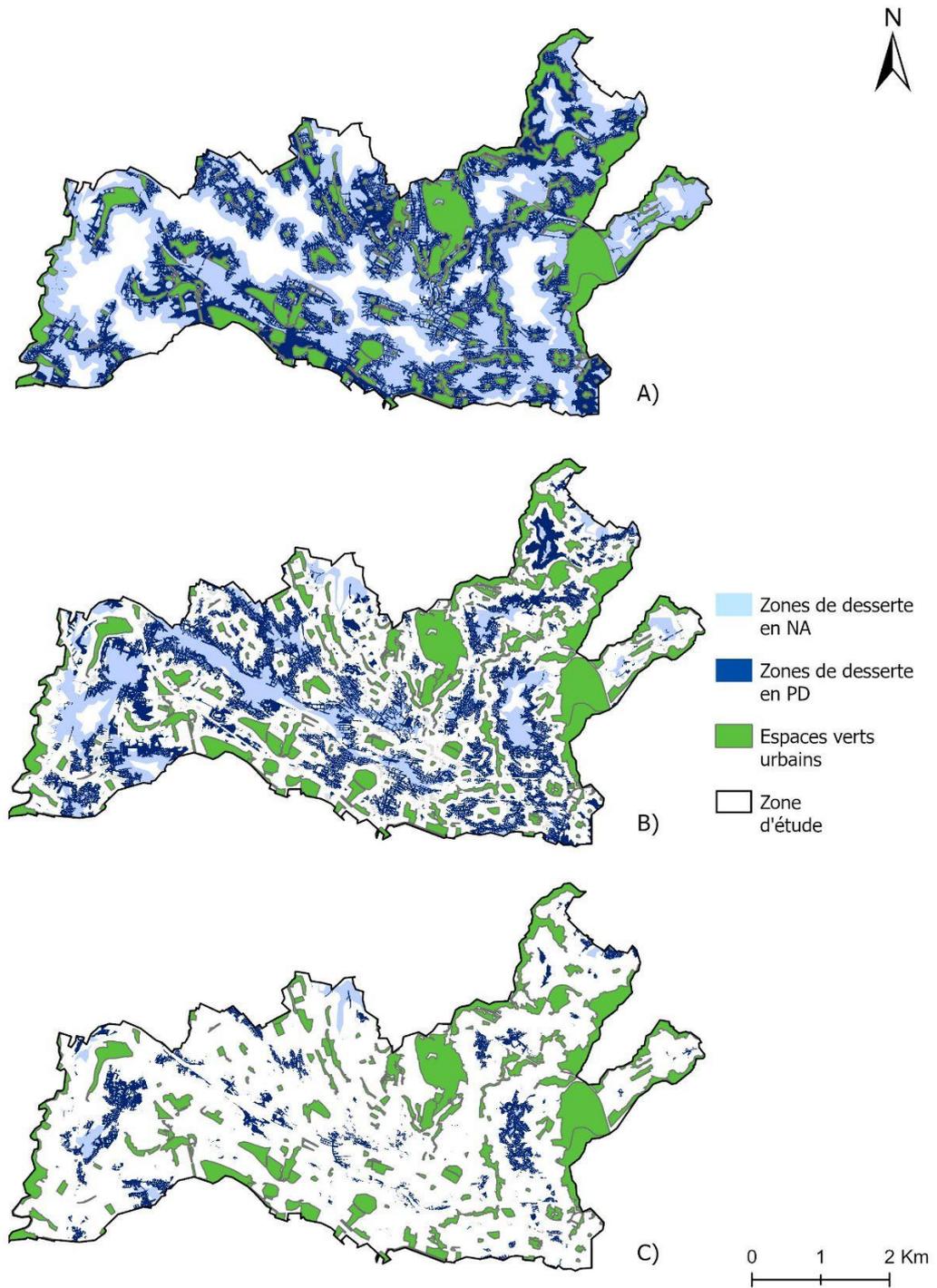


Figure 23. Cont.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

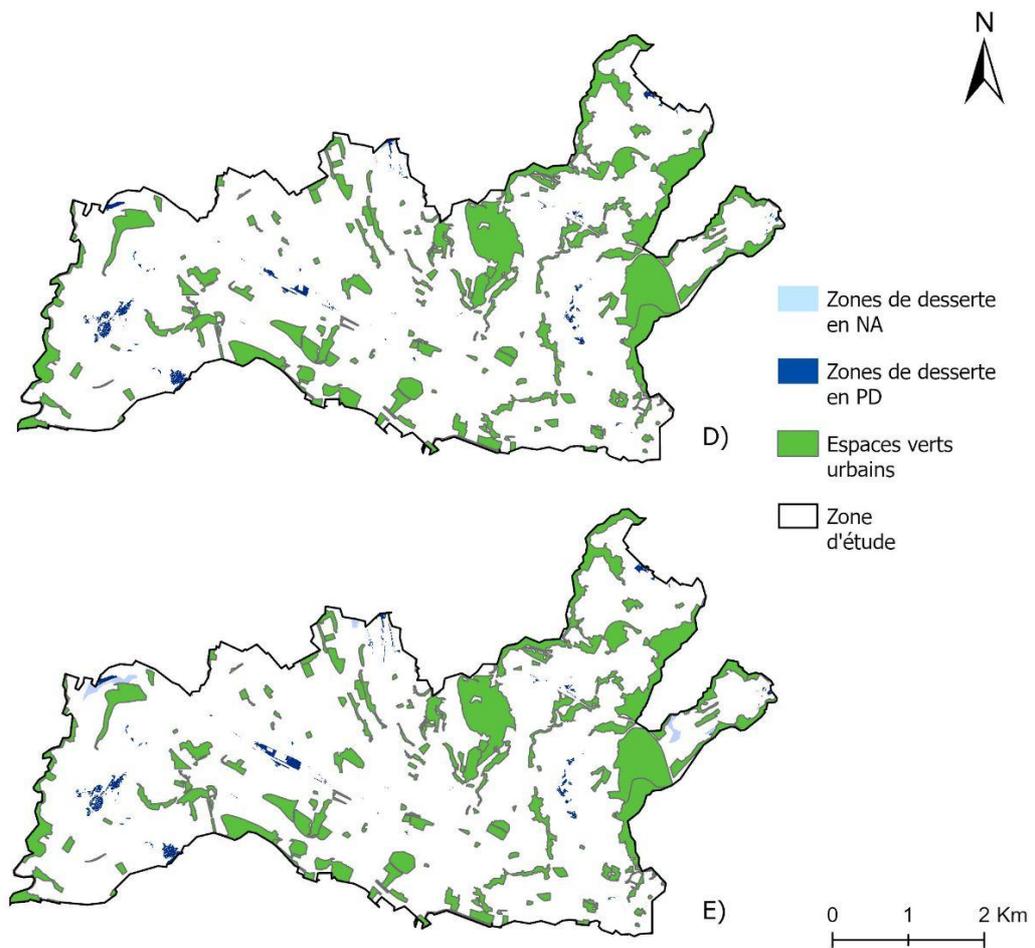


Figure 23. Différences entre les zones de dessertes obtenues avec PD et NA pour le modèle de déplacement PMC. A) zone de desserte de moins de 5 min à pied, B) zone de desserte de 5-10 min à pied, C) zone de desserte de 10-15 min à pied, D) zone de desserte de 15-20 min à pied, E) zone de desserte de plus de 20 min à pied.

Pour le modèle PMR, les différences sont encore plus marquées entre les résultats obtenus avec NA et PD. Les zones de plus de 20 min à pied d'un EVU obtenues avec NA sont beaucoup plus réduites que celles obtenues avec PD, qui se généralisent partout dans la zone d'étude. Les zones de dessertes de plus de 20 min obtenues avec PD sont similaires aux zones de 10-15 et 15-20 min de marche sur la carte obtenue avec NA (Figure 24, D, E).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

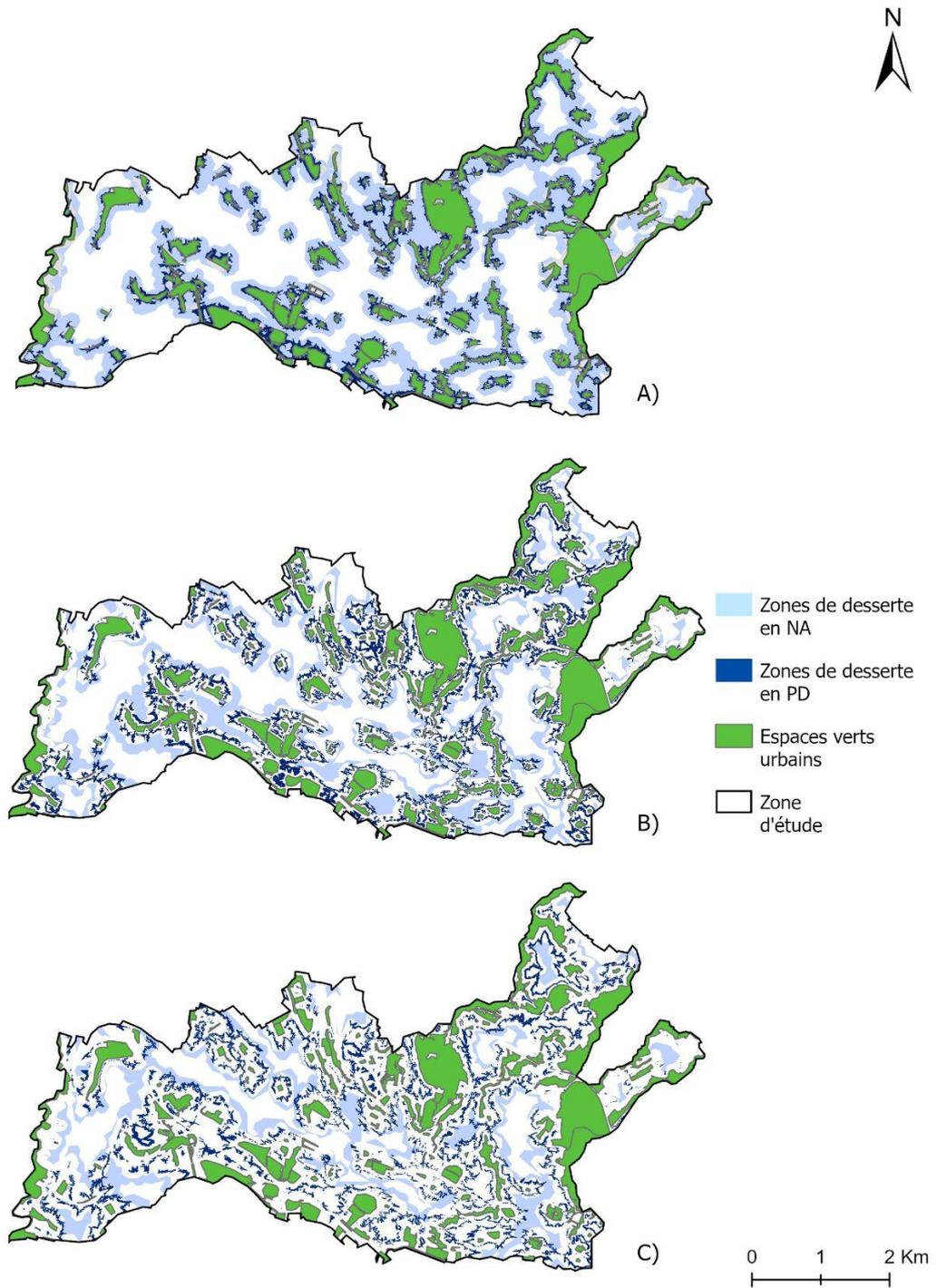


Figure 24. Cont.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

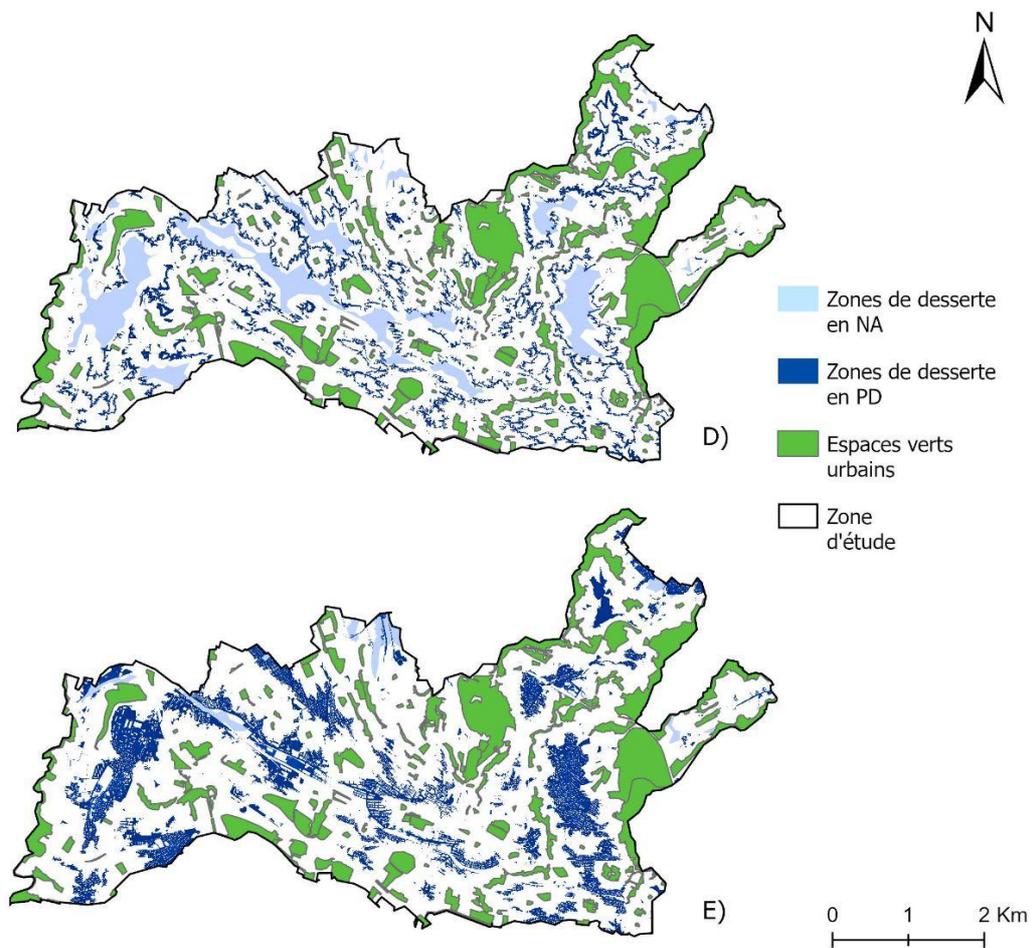


Figure 24. Différences entre les zones de dessertes obtenues avec PD et NA pour le modèle de déplacement PMR. A) zone de desserte de moins de 5 min à pied, B) zone de desserte de 5-10 min à pied, C) zone de desserte de 10-15 min à pied, D) zone de desserte de 15-20 min à pied, E) zone de desserte de plus de 20 min à pied.

4.2 Statistiques d'accessibilité piétonne aux EVU

La population totale comprise dans la zone d'étude est de 234 297, dont 8% (18 733 personnes) sont des jeunes enfants de 7 ans ou moins et 14,7 % (34 443 personnes) sont des personnes de 65 ans ou plus. Ces derniers sous-groupes de la population totale sont considérés ensemble comme la population à mobilité « réduite » (54 176 personnes) (Figure 25).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

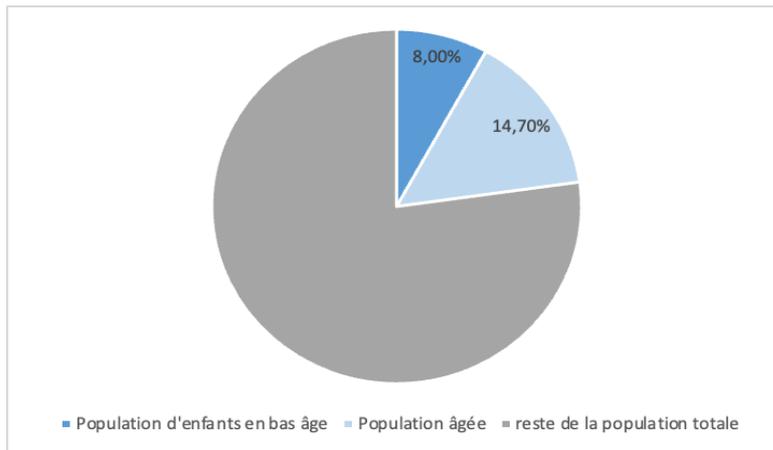


Figure 25. Population totale, à mobilité « classique » et proportion de personnes à mobilité « réduite ».

Pour un même modèle de déplacement piéton, la proportion de la population à mobilité « classique » et « réduite » qui se trouve dans chaque zone de service est similaire (Annexe IV et V), de sorte que les deux sous-groupes de la population semblent avoir le même patron de distribution spatiale. Cela confirme que les différences rencontrées entre le nombre de personnes qui se trouvent à différents temps-distance d'un EVU sont liées aux différences entre les modèles de déplacement et les méthodes utilisées.

Pour la zone urbaine du canton de Vaud, le niveau d'accès de la population totale aux EVU est élevé. Sous le modèle PMC, les mesures effectuées avec NA montrent que 78,4% de la population se trouve à moins de 5 min et 20,8 % à moins de 10 min à pied d'un EVU. Les statistiques obtenues avec PD montrent quant à elles que 48,9% de la population se trouve à moins de 5 min et 40,1% de la population à moins de 10 min de marche d'un EVU. Si nous considérons que toute la population présente une mobilité « réduite », la proportion de la population qui se trouve à moins de 5 min à pied d'un EVU descend à environ 51,3% avec NA (Figure 29) et à 13% avec PD (Figure 30). Le même constat est observé pour les jeunes enfants et les personnes âgées, pour lesquels la proportion qui se trouve à moins de 5 min d'un EVU descend d'environ 79,3% à 51,8% avec NA et de 49% à 14% avec PD si nous considérons les modèles PMC et PMR, respectivement.

Nous observons aussi dans les Figures 29 et 30 que le modèle PMR fait augmenter la proportion de la population totale qui se trouve à plus de 10 minutes de marche d'une EVU par rapport au modèle PMC. Avec NA, 16,7% de la population se trouve à 10-15 min, 11,8% à 15-20 min et 0,7% à plus de 20 min (tandis que sur le modèle PMC ces proportions sont

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

presque nulles). Avec PD, 20% de la population se trouve à 10-15 min, 17% à 15-20 min et la plupart de personnes (29%) se trouve à plus de 20 min de marche d'un EVU.

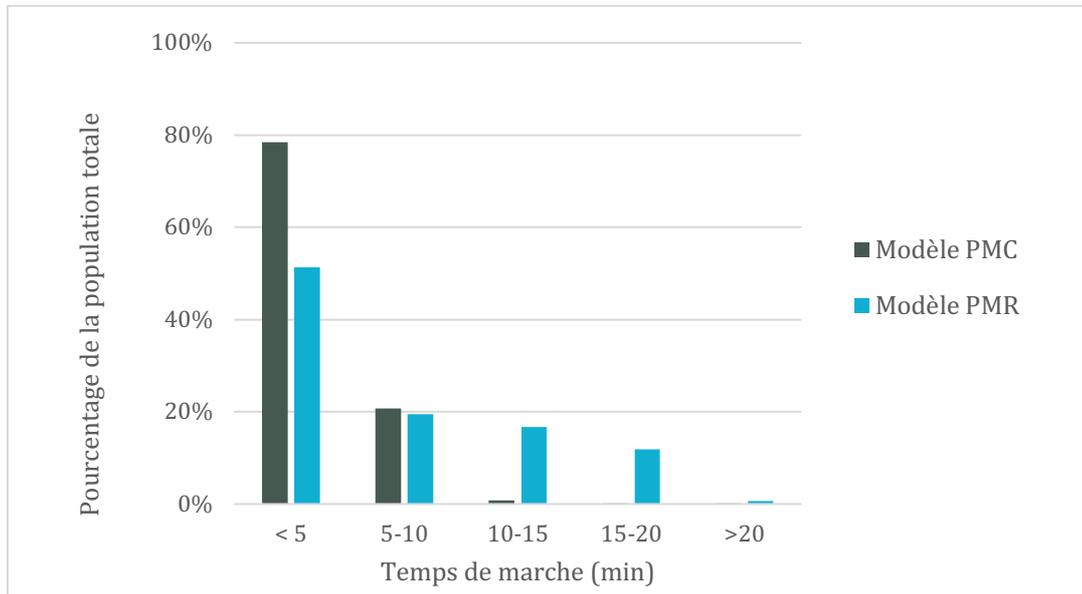


Figure 29. Comparaison des statistiques d'accessibilité piétonne aux EVU obtenues pour la population totale si on considère un déplacement « classique » (modèle PMC) ou « réduite » (modèle PMR) avec NA.

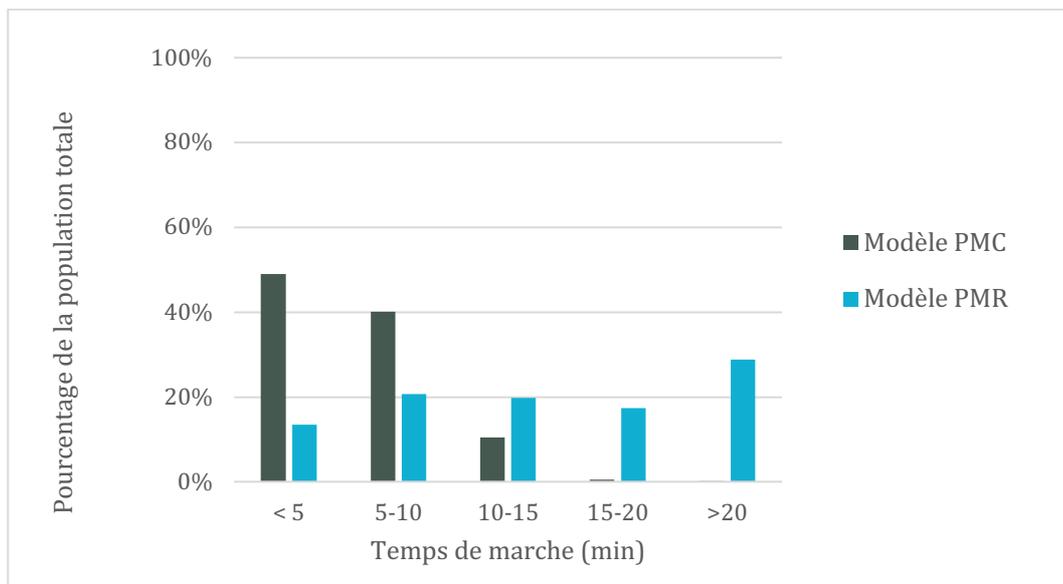


Figure 30. Comparaison des statistiques d'accessibilité piétonne aux EVU obtenues pour la population totale si on considère un déplacement « classique » (modèle PMC) ou « réduite » (modèle PMR) avec PD.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Les statistiques obtenues avec NA et PD montrent aussi des différences pour les mêmes modèles de déplacement piéton. Pour le modèle PMC (Figures 31), les deux outils estiment que la plupart de la population totale se trouve à 5 min ou moins de marche d'un EVU mais avec une différence de presque 30 points de pourcentage (78,4% avec NA et 48,9% avec PD). Les statistiques obtenues avec PD montrent un pourcentage plus haut de la population totale qui se trouve dans les zones de service de 5-10 min et de 10-15 min d'un EVU par rapport à celles obtenues avec NA (Figure 32).

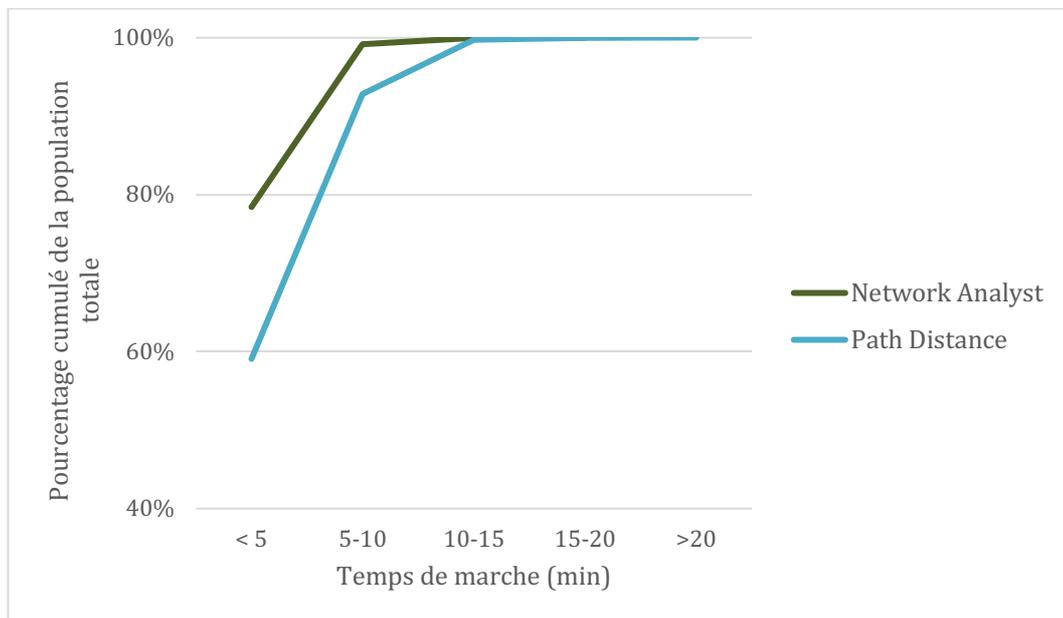


Figure 31. Pourcentages cumulés de la population totale sous le modèle de déplacement PMC qui se trouve à différents temps de marche d'un EVU, obtenus avec NA et PD.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

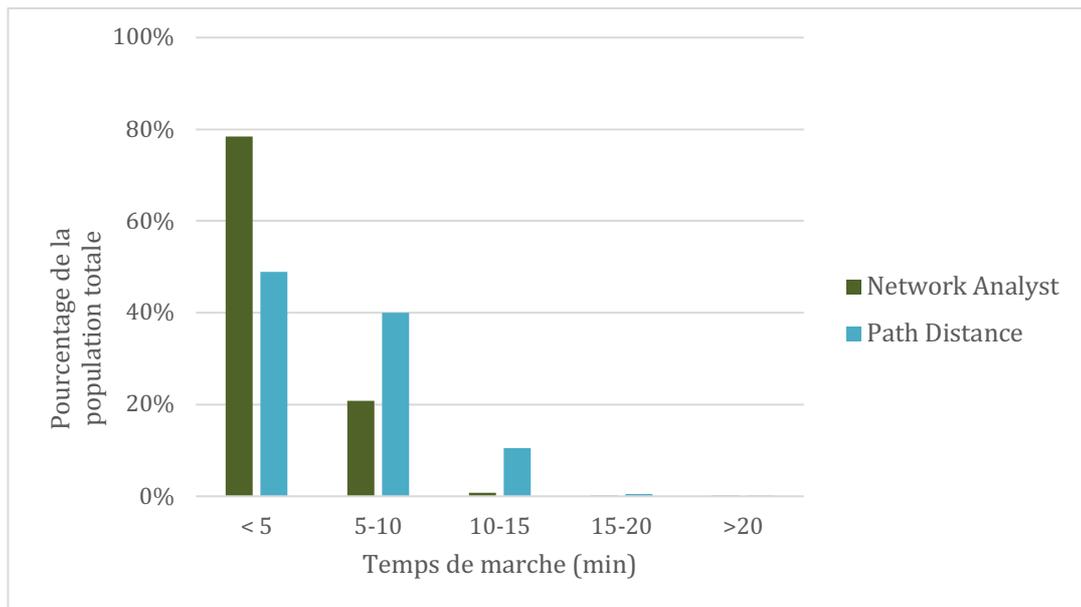


Figure 32. Comparaison entre les statistiques d'accessibilité piétonne aux EVU pour la population totale sous le modèle de déplacement PMC, obtenues avec NA et PD.

Pour le modèle PMR, les différences entre les estimations obtenues avec PD et NA sont plus notables, en particulier pour la population à mobilité « réduite » qui se trouve à moins de 5 min et à plus de 20 min de marche d'un EVU (Figure 33). Dans l'analyse basée sur réseau, la proportion de la population qui se trouve sur la zone de distance-temps de moins de 5 min est de 51,8%, tandis qu'avec la méthode basée sur *raster* cette estimation est de 14%. Pour les zones de desserte de plus de 20 min, l'estimation basée sur NA est de 0,6% contre 29% pour celle basée sur PD. Néanmoins, des pourcentages semblables se manifestent pour les personnes habitant entre 5-10, 10-15 et 15-20 min à pied d'un EVU (Figures 34).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

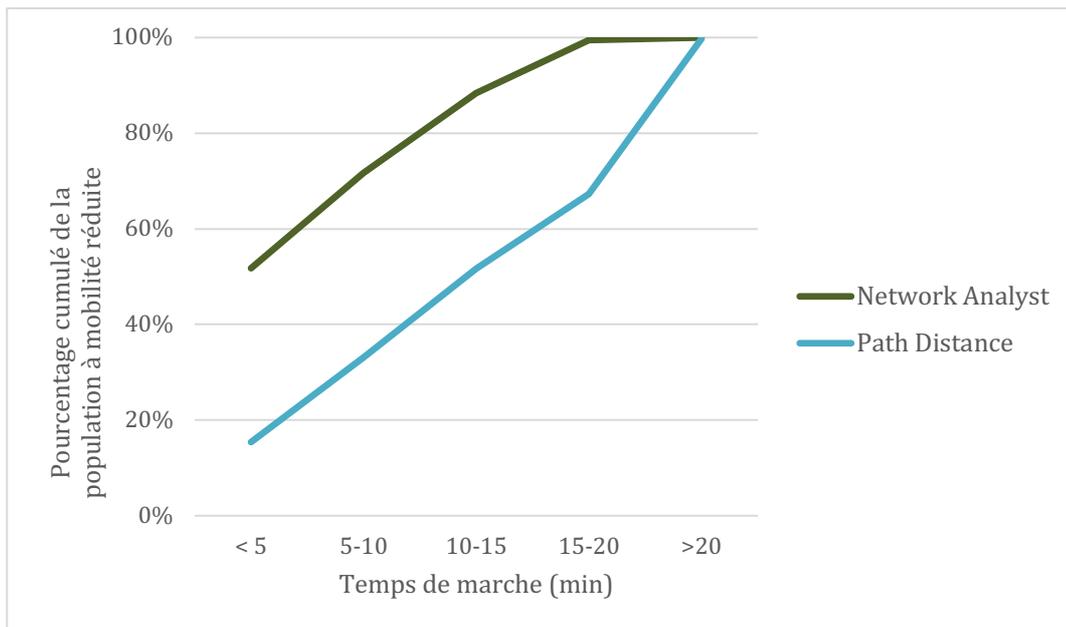


Figure 33. Pourcentages cumulés de la population à mobilité « réduite » sous le modèle de déplacement PMR qui se trouve à différents temps de marche d'un EVU, obtenus avec NA et PD.

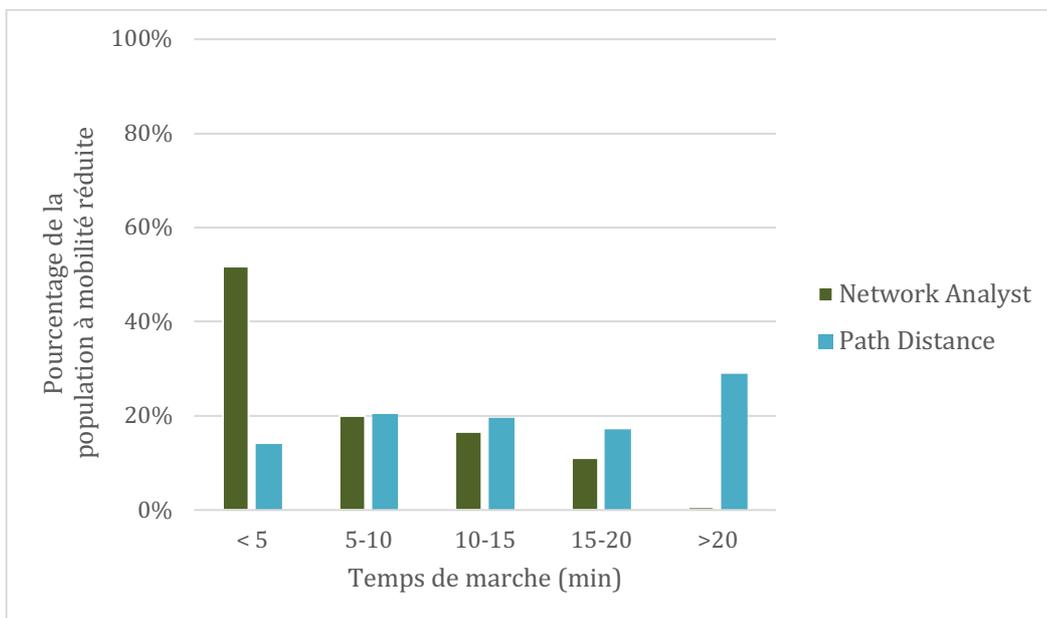


Figure 34. Comparaison entre les statistiques d'accessibilité piétonne aux EVU pour la population à mobilité « réduite » sous le modèle de déplacement PMR, obtenues avec NA et PD.

4.3 Comparaison des résultats des modèles théoriques avec les possibles parcours effectués par des usagers des EVU dans la zone urbaine du canton de Vaud.

Les personnes interviewées marchent entre moins d'une minute et jusqu'à 1h40 pour atteindre l'EVU de destination (Figure 35). En raison du faible nombre d'observations, il n'est pas possible de déterminer si l'activité principale (Annexe VI), le type d'EVU (Annexe VII) ou l'âge (Annexe VIII) exercent une influence sur le temps de marche. Néanmoins, parmi les 18 personnes interviewées, 7 ont visité l'EVU le plus proche en termes de temps, et entre eux, 5 personnes ont marché moins de 5 min depuis leur lieu de départ (Figure 36, A et B). Parmi ces 7 personnes, 4 ont visité l'EVU pour se promener, 1 pour prendre l'air, 1 pour rencontrer des amis et une autre pour que ses enfants puissent jouer. Les chemins de moindre coût calculés avec PD et NA sont égaux ou très semblables pour ces personnes. Cependant, dans certains cas, les chemins de moindre coût calculés avec PD et NA ne se correspondent pas. Il y a trois sortes de cause de ces différences liées notamment au fonctionnement de chaque méthode :

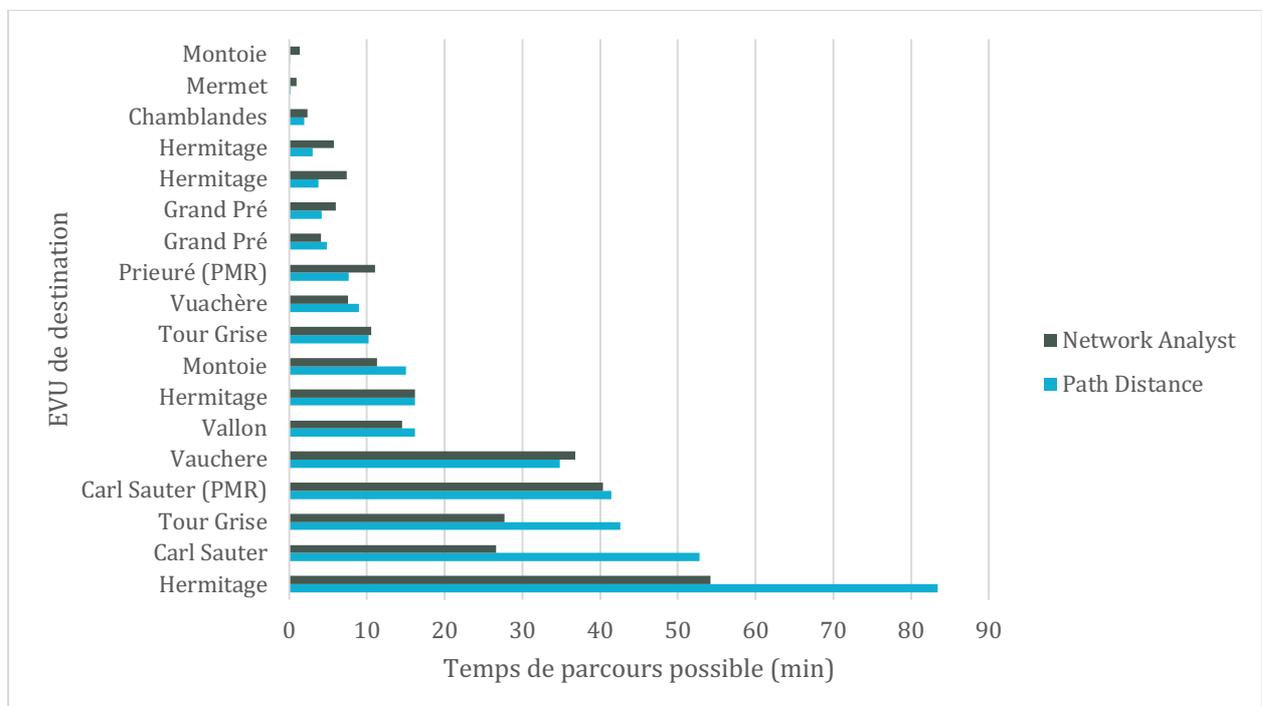


Figure 35. Temps de marche (en min) estimé depuis les points de départ vers l'EVU de destination pour les personnes interviewées, calculé avec NA et PD.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

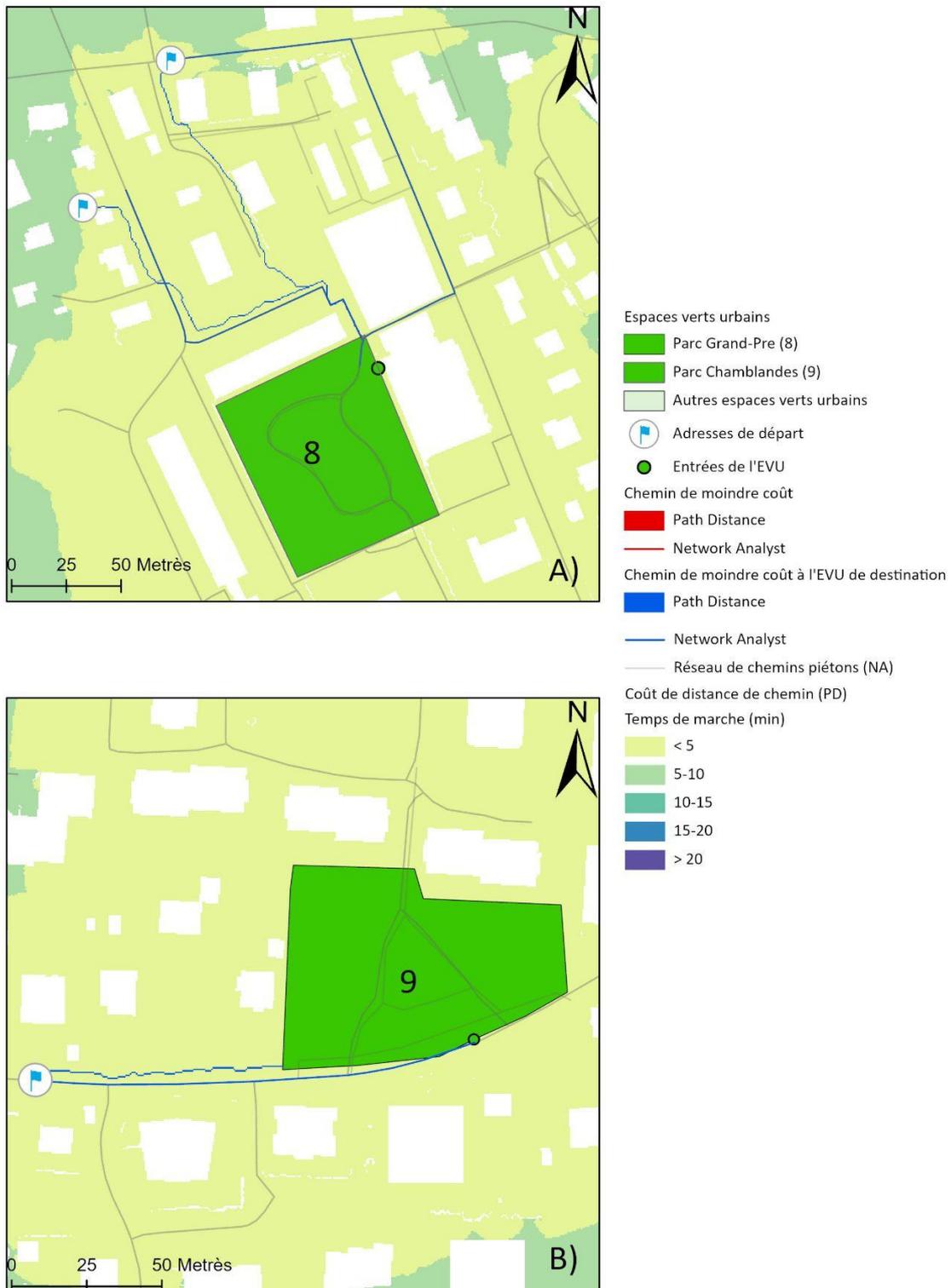


Figure 36. Exemple de coïncidence entre le chemin de moindre coût possiblement emprunté par les personnes interviewées à leur EVU de destination et le chemin de moindre coût à l'EVU le plus proche depuis le même point de départ. Il est aussi possible d'observer dans cette figure que les estimations réalisées avec NA et PD sont similaires.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

1. La génération des cellules *NoData* en PD : La génération des cellules *NoData* comme résultat du calcul de coût total cumulé de PD peut entraîner des problèmes dans la définition des chemins de moindre coût. Les cellules sans valeur ne permettent pas de dessiner le chemin de moindre coût (Figure 37, A). Cela fait dévier le chemin et donne lieu à un chemin plus long ou plus coûteux que celui qui pourrait être réellement emprunté. Les cellules *NoData* produisent donc une surestimation du coût de distance et des chemins de moindre coût.

2. L'effet de l'absence de segments sur le réseau en NA : L'absence de polygones représentant les chemins pour accéder à un EVU pose également des problèmes dans le calcul du chemin de moindre coût. La figure 37 B illustre la génération d'un chemin de moindre coût différent et plus long avec NA que celui généré avec PD en raison du manque de chemins. Cela provoque ainsi une surestimation du temps de marche nécessaire pour atteindre un EVU.

3. L'effet de la représentation des EVU par des points en NA : La Figure 37 C montre que la représentation des EVU par des points génère des chemins de moindre coût plus ou moins coûteux qu'en réalité. Si les points ne sont pas situés sur le réseau, le chemin de moindre coût est sous-estimé, tandis que s'il n'y a pas de chemin, le chemin de moindre coût est surestimé car d'autres chemins plus longs sont générés comme alternative.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud



Figure 37. Cont.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

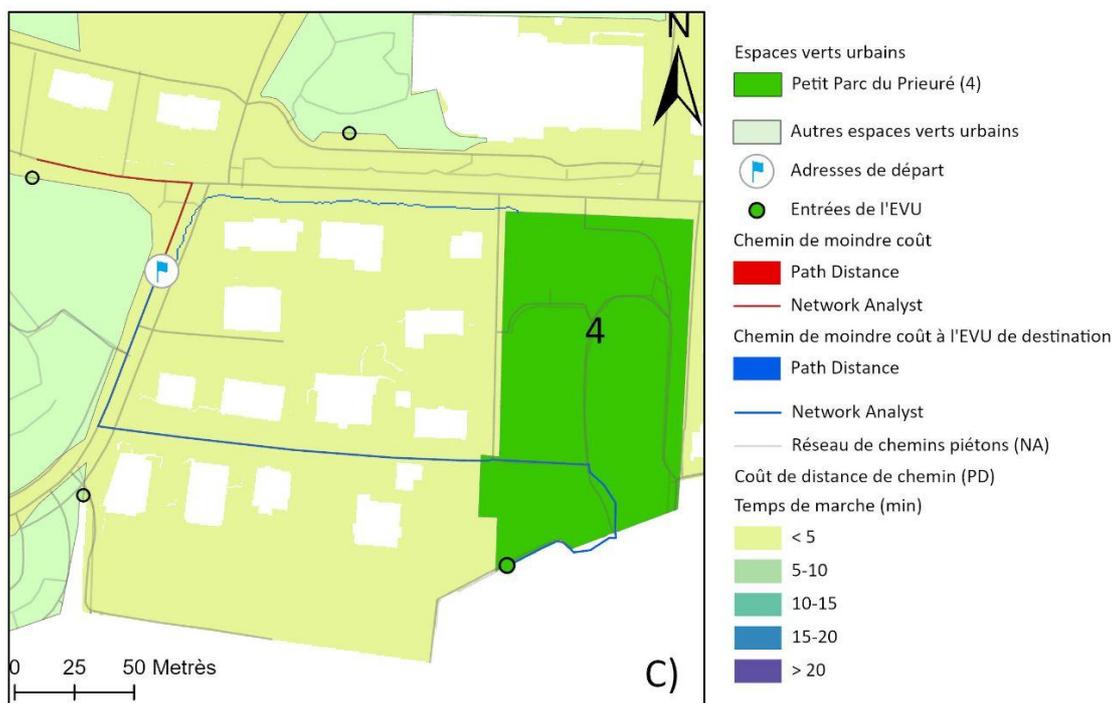


Figure 37. Exemples des erreurs rencontrées lors de la génération des chemins de moindre coût. A) Génération des cellules NoData en PD ; B) Effet de la représentation des polygones des EVU par des points en NA ; C) Effet du manque de chemins piétons en NA

5. Discussion

5.1 Modèles de déplacement piéton

Les piétons ne peuvent pas être traités comme un groupe homogène, car ils existent de nombreux profils de piétons (Victor, 2016). Dans ce travail nous considérons que deux types de piétons, PMR et PMC. Nous supposons que la population totale se déplace sans contrainte physique et que les personnes entre 0 et 7 ans et de 65 ans ou plus ont une condition physique limitée pour marcher, c'est qui ne pas toujours le cas. Par exemple, toutes les personnes âgées n'ont pas une mobilité « réduite », puisqu'environ 70% des personnes âgées vaudoises se considèrent en bonne (ou très bonne) santé (Canton de Vaud, 2021). Néanmoins, ce découpage de la population reste valide du fait qu'ils n'existent pas de données exhaustives permettant d'estimer la « santé objective » de la population ni de

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

données détaillées relatives aux autres sous-groupes de la population comme les personnes en situation de handicap (Canton de Vaud, 2021).

Les modèles de déplacement utilisent aussi des généralisations sur les préférences des piétons et usagers des EVU. Le choix du chemin à parcourir peut être influencé par le temps de trajet et la pente mais aussi par d'autres facteurs, comme le confort (propreté, rugosité, absence d'obstacles), la sécurité (type de revêtement des chemins, évacuation d'eau) et l'attractivité (absence de bruit, présence d'ombre ou verdure) (Centre de recherches routières, 2012) qui n'ont pas été pris en compte dans ce travail. De même, la proximité des EVU joue clairement un rôle dans le choix des EVU par les usagers (7 de 18 personnes ont choisi l'EVU le plus proche) mais, comme nous l'avons observé dans la partie 4.3, il semblerait que cela ne soit pas l'unique critère qui influence le choix d'EVU des personnes. Bien que les données récoltées ne soient pas suffisantes pour identifier une influence du type d'EVU, du type d'activité ou de l'âge sur le temps de marche, il a été observé par d'autres auteurs que la qualité et l'attractivité des EVU (la diversité d'activités possibles, la propreté, la surface, sécurité) (Wen et al. 2020), du type d'activité à réaliser (Jalkanen et al., 2020), des infrastructures ou des caractéristiques des EVU (La Rosa et al., 2018) déterminent aussi le temps qu'une personne est prête à marcher pour atteindre un EVU. Par exemple, les familles peuvent avoir une préférence pour des EVU avec des infrastructures adaptées aux enfants et des aires de jeux tandis que les personnes âgées cherchent plus des espaces calmes fournis des bancs et des espaces de repos (Giuliani et al., 2021; La Rosa et al., 2018; Wen et al., 2020). Il est donc recommandable d'approfondir l'observation et la récolte de données sur le terrain afin de préciser le temps de marche que les personnes sont prêtes à parcourir pour visiter un EVU ainsi que les raisons du choix du trajet et de l'EVU. De plus, mieux connaître les préférences des sous-groupes de la population, comme les personnes âgées et les jeunes enfants, permettra de préciser le niveau d'accessibilité aux EVU qui correspondent le mieux à leurs attentes et préférences, car ces sous-groupes de la population pourraient avoir un choix limité d'espaces verts auxquels accéder (Giuliani et al., 2021).

5.2 Accessibilité piétonne aux EVU de la zone urbaine du canton de Vaud

La population totale de la zone urbaine du canton de Vaud a un niveau élevé d'accès à pied aux EVU, sous l'assomption qu'elle n'a pas de limitations physiques à la marche. Sous le

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

modèle PMC, les résultats obtenus avec NA montrent que 78,4% de la population totale à accès à un EVU à moins de 5 min à pied et la quasi-totalité de la population à moins de 10 min. Le résultat obtenu avec PD est également élevé avec près de 49% de la population ayant accès à un EVU à moins de 5 min et 70% à moins de 10 min de marche, mais il reste inférieur à celui obtenu avec NA. Ces chiffres sont comparables aux niveaux d'accessibilité observés à Genève où 89% de la population se trouve à 300 m d'un EVU selon l'analyse basée sur réseau de Guinaudeau et al. (2022) et à ceux obtenus par l'analyse basée sur *raster* de Giuliani et al. (2021) où 83,46% de la population se trouve à moins de 5 min et 88,57% à moins de 10 min à pied d'un EVU. L'accès à pied aux EVU à moins de 5 min à pied pour les personnes à mobilité « réduite » reste élevé selon les résultats obtenus pour le modèle PMR avec NA (51,8%) mais il descend drastiquement avec la méthode de calcul basé sur *raster* (14%), faisant que le niveau d'accès aux EVU pour ce sous-groupe de la population est minimal. Il existe donc une différence d'entre 27,6 (pour NA) et 35 (pour PD) points de pourcentage entre la proportion de la population à mobilité « classique » et « réduite » qui a accès à une EVU à moins de 5 minutes de marche d'un EVU. Les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus par Giuliani et al. (2021) pour les villes de Barcelone et Bristol, où 41% et 52% de leurs résidents, respectivement, se trouvent à moins de 5 minutes de marche d'un EVU selon le modèle « rapide » et 21% et 26%, respectivement, selon le modèle « lent ». Giuliani et al. (2019, p.19) soulignent que ces villes ont un terrain accidenté, comme c'est le cas aussi de la zone urbaine du canton de Vaud, et que, par conséquent la pente agit comme un obstacle aux déplacements, ce qui entraîne une augmentation du temps d'accès aux EVU. Enfin, la prise en compte d'une vitesse de marche « réduite » pour modéliser le mouvement des personnes âgées et des jeunes enfants génère des différences importantes dans le nombre de personnes qui se trouvent à différentes distance-temps de marche d'un EVU, en particulier pour les faibles distances-temps de marche comme 5 min.

La méthode basée sur *raster* génère dans l'ensemble plus de zones à des distance-temps de plus de 5 min de marche d'un EVU que NA, et donc plus de personnes éloignées, en termes de temps de marche, d'un EVU. La différence la plus notable entre les méthodes concerne la population à mobilité « réduite » qui se trouve à moins de 5 min et à plus de 20 min à pied d'un EVU. Par exemple, les estimations avec PD montrent que 14% (7 633 personnes) de la population à mobilité « réduite » se trouve à moins de 5 min à pied d'un

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

EVU, tandis que NA identifie 51,8% (28 038 personnes), soit une différence de 20 405 personnes. De même, selon les résultats obtenus avec PD, 29% de la population à mobilité « réduite » (15 704 personnes) vit dans des zones à plus de 20 min à pied d'un EVU, tandis que la méthode basée sur réseau n'en a identifié que 0,6% (308 personnes), une différence de 15 396 personnes. Delamater et al. (2012) ont aussi constaté que PD identifie plus des zones et des personnes pauvrement desservis par rapport NA, mais sans prendre un compte des facteurs verticaux ni des données de couverture du sol autres que le réseau de chemins, rues et routes. Cependant, il n'était pas attendu d'obtenir des estimations si distinctes entre PD et NA car en général, les résultats obtenus avec les deux méthodes ne présentent pas de différences importantes si des *rasters* à haute résolution spatiale (comme 5-10m) sont utilisés (Loreno, 2014; Mulrooney et al., 2017), comme c'est le cas dans ce travail.

Les zones de desserte générées en PD et NA sont différentes pour le modèle PMC et le modèle PMR, particulièrement pour les zones de desserte de moins de 5 min et de plus de 20 min à pied, cette dernière étant encore plus marquée surtout dans le modèle PMR. Bien que la distribution spatiale des zones de desserte soit similaire, on observe qu'elles présentent une valeur de distance-temps plus élevée en PD qu'en NA. Cela a aussi été observé par Delamater et al. (2012), où les zones mal desservies sont toujours plus importantes en PD qu'en NA.

Le fait que les temps de marche soient toujours plus élevés avec l'outil PD qu'avec NA peut être lié aux différences que présentent les méthodes employées, comme :

1. La mesure de la distance réelle sur le terrain : La distance sur PD est calculée en considérant l'élévation du terrain (distance de surface), au contraire de NA qui calcule la distance de façon planimétrique. La longueur des chemins bidimensionnelles ou planimétriques peut être considérablement inférieure à celle d'une entité sur un terrain accidenté (Esri, 2022b) (comme c'est le cas de la zone d'étude). Cela peut expliquer que le temps de marche nécessaire pour atteindre un EVU soit supérieur en PD qu'en NA. Pour confirmer cette hypothèse, il serait nécessaire de réaliser une analyse isotropique basée sur *raster*.

2. L'inclusion des données de couverture du sol en PD et l'effet des barrières au déplacement en PD : L'inclusion de la notion d'impédance en fonction de la classe de couverture du sol rajoute des coûts de déplacement supplémentaires dans le calcul de coût total en PD par rapport NA, pour lequel le coût de déplacement est seulement défini par la valeur de pente. Des tests ont été réalisés pour observer l'effet de la couverture du sol dans le calcul du coût total, mais le coût supplémentaire ne semble pas être suffisant pour expliquer les grandes différences observées dans le niveau d'accessibilité obtenu avec PD et NA, particulièrement pour le modèle PMR. Néanmoins, la représentation des barrières naturelles au déplacement (rivières, rochers, etc.) et anthropiques (autoroutes, chemins de fer, aéroport, etc.) semble produire des effets de restriction sur l'accessibilité piétonne en PD par rapport à NA. Nous observons qu'en PD, les zones de plus de 20 minutes de marche d'un EVU dans le modèle PMC sont particulièrement situées au croisement de l'autoroute 17 à Ecublens, à proximité de la gare de Lausanne et au nord de l'aéroport Lausanne-Blécherette. L'inclusion de barrières sur PD génère donc une augmentation du coût de déplacement dans le calcul de coût total et produit des zones de desserte plus restreintes qu'en NA. Dans NA, il est possible d'ajouter des barrières mais l'effet qu'elles produisent n'est pas le même qu'en PD car elles génèrent uniquement des interruptions sur le réseau piéton lorsqu'une barrière intercepte un segment du réseau. Les zones de desserte générées en NA ne sont donc pas limitées par la présence de barrières. Bien que le calcul de temps de marche est exclusivement basé sur les caractéristiques du réseau piéton, les zones de desserte résultantes incluent également des régions qui sont dépourvues de chemins. Delamater et al. (2012, p. 15) expliquent que « les zones de desserte en NA sont des approximations surfaciques des segments (*edges*) du réseau dans un temps de déplacement spécifié à partir du lieu d'origine (*facilities ou sources*) » [traduction libre]. Dans NA, les segments du réseau sont convertis en une structure de données de réseau triangulé irrégulier (TIN) ou les estimations de temps de parcours des segments sont considérés comme des valeurs de « hauteur ». Les zones de desserte sont ensuite constituées par un sous-ensemble de polygones TIN situées dans le temps de trajet spécifié. Les limites des polygones des zones de desserte ne sont donc pas restreintes par l'absence de chemins et donc la limite des zones de desserte ne pas certaine. Delamater et al. (2012, p.15) soulèvent donc l'incertitude associée au processus de génération des polygones de zones de service et mettent en question la validité des limites des zones de service produites en NA. Cela peut être une de

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

raisons pour lesquelles les zones de service avec NA sont plus larges que celles générées avec PD.

3. Le coût de déplacement (temps de marche) en fonction de la pente : le coût total de déplacement est défini par la vitesse en fonction de la pente. Les deux méthodes utilisées permettent d'inclure l'effet de la pente de manière différente sur l'analyse d'accessibilité piétonne. Dans NA, la pente est calculée pour chaque segment de 10 m de longueur par trigonométrie avec les valeurs de pente des sommets. En PD, la pente est aussi calculée par trigonométrie mais entre les centres de chaque cellule d'une résolution de 0.5 m. La différence de résolution dans le calcul de pente peut donc générer une assignation de valeurs de pente différente pour PD et NA. De plus, la valeur de coût de déplacement assignée à chaque segment ou à chaque pixel a été fait différemment. L'assignation des valeurs de coût en NA a été faite par classes de pente, c'est-à-dire que, par exemple, pour les segments qui ont une valeur de pente $\geq 2\%$ et $< 4\%$, la valeur de la vitesse est de 4,2 km/h, donc un temps de marche 0,14 min. En PD, l'assignation des valeurs de coût s'effectue à travers le FV qui assigne une valeur de coût en fonction du diagramme de FV défini par une table. Les valeurs sont donc assignées par une fonction continue qui peut ne pas être exactement celle définie par Victor et Klein (2011). L'inclusion du FV sur le modèle basé sur *raster* semble être la cause des résultats distincts entre NA et PD mais des tests et des évaluations plus approfondis sont nécessaires pour déterminer précisément son effet dans la modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU.

D'autres éléments peuvent également générer des différences entre les résultats obtenus avec PD et NA mais leurs effets sont moins clairs que ceux mentionnés ci-dessus car ils peuvent conduire à des sous-estimations ou surestimations des résultats. L'un de ces éléments est la représentation des EVU. En NA, les points d'entrée des EVU peuvent provoquer des sous ou surestimations du temps de marche nécessaire pour atteindre un EVU, comme il a été observé dans la section 4.3. Ce biais pourrait être réduit si l'on utilise un nombre plus élevé de points, par exemple, placés conjointement à l'intersection de chemins et à une équidistance sur le périmètre des EVU. A ce sujet, PD est plus précis car il a l'avantage de représenter les polygones des EVU par leur forme originale. Cependant, PD suppose que les EVU sont accessibles de tous les côtés, ce qui n'est pas toujours vrai (Chênes et al. 2021).

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

De plus, lors du processus de rasterisation, une déformation des polygones est générée, qui peut être importante en fonction de la résolution spatiale utilisée.

Un autre élément à considérer est la construction du réseau piéton, qui diffère pour chaque méthode utilisée. En NA, le réseau est constitué par les couches de chemins « formels » et « informels ». Les trottoirs et les passages piétons n'ont pas été modélisés sur NA car nous avons supposé que toutes les rues de moins de 10 m de largeur ont des trottoirs et que les couches utilisées incluent les passages piétons. Cependant, la faible représentation de ces éléments peut affecter le calcul d'accessibilité piétonne du fait que les chemins d'accès aux EVU peuvent ainsi être plus ou moins longs et augmenter ou diminuer en conséquence le temps de marche. Victor (2016) et Swisstopo (2021) incluaient les trottoirs et les passages piétons dans leurs analyses en faisant un acheminement beaucoup plus réaliste des piétons. Bien que nous ayons complété la couche des chemins piétons « formels » avec les données d'*OSM*, le réseau piéton créé présente une forte discontinuité. Pour la suite, il est donc conseillé de représenter les trottoirs et les passages piétons, et de compléter et de corriger si nécessaire la connectivité du réseau quand les données proviennent de différentes sources (Loreno et al., 2014) afin d'améliorer et de rendre plus réaliste la modélisation du déplacement piéton (Swisstopo, 2021). En NA, seuls les segments représentant des chemins ont été utilisés, tandis que les piétons peuvent aussi se déplacer hors des chemins. Les espaces ouverts peuvent aussi être représentés comme le fait Victor (2016), mais c'est une tâche beaucoup plus complexe que celle qui peut être faite sur PD. Sur ce point, PD offre l'avantage de représenter le mouvement libre des piétons en dehors des chemins grâce à l'utilisation d'une couche de couverture du sol. L'utilisation de cette donnée permet aussi de surmonter le problème d'un réseau routier incomplet et c'est la raison pour laquelle cet outil a été l'outil privilégié dans les études d'accessibilité dans les zones rurales ou en développement (Mulrooney et al., 2017). Malgré cela, la méthode basée sur *raster* présente aussi des problèmes de connectivité, car lors de la rasterisation, certains éléments tels que les chemins ou les barrières au déplacement, peuvent se connecter alors qu'ils ne le sont pas en réalité (Delamater et al., 2012 ; Sander et al., 2010). L'effet causé par la rasterisation peut être diminué avec une résolution spatiale plus haute, mais comme il est démontré par Delamater et al. (2012) la matrice de déplacement est toujours plus connectée par rapport au réseau vectorielle. Un effet opposé, la déconnexion des éléments, est causé par

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

l'assignation des valeurs d'impédance de 0 aux barrières physiques au déplacement piéton dans la couche de coût de surface. Cet effet pourrait être diminué si l'on assigne une valeur d'impédance positive très haute (par exemple 1000) de manière à restreindre le mouvement dans ces zones. Il reste à approfondir la cause de la génération des cellules *NoData*, autres que les zones définies comme barrières dans la couche de coût total cumulé. L'une des causes peut être l'effet produit par l'inclusion du FV. Des modèles effectués sans l'inclusion du FV ne génèrent pas de cellules *NoData* tandis que d'autres tests réalisés avec la fonction de randonnée de Tobler (*Tobler's hiking function* en anglais) génèrent des quantités beaucoup plus faibles de cellule *NoData*. Il est donc nécessaire de réaliser une analyse plus approfondie afin de mieux identifier la cause de ce problème.

Aucun des réseaux piétons ne prend en compte le niveau d'élévation des segments des chemins. En NA cela est possible lors de la configuration du réseau, mais pas en PD. Le fait que tout le réseau soit connecté peut générer une surestimation de l'accessibilité piétonne aux EVU. Le facteur de niveau d'élévation pose également des problèmes dans PD lors de la création de la couche de coût total cumulé, car les ponts ou les tunnels ont une valeur de pente qui n'est pas correcte. Cette erreur est corrigée sur NA manuellement, comme cela a été fait dans ce travail.

Finalement, deux autres éléments peuvent affecter l'ensemble de l'analyse d'accessibilité piétonne aux EVU. En premier lieu, le choix de la définition des EVU peut produire une sous-estimation de l'accessibilité aux EVU du fait que d'autres types d'espaces, comme les espaces bleus (les lacs ou les rivières) ou les surfaces agricoles (comme les champs, prairies et pâturages) peuvent aussi jouer un rôle important dans le délaissement et la recreation de la population urbaine. En ce sens, la délimitation de la zone d'études génère aussi des sous-estimations d'accessibilité aux EVU du fait que certains polygones ont été coupés par les limites administratives et d'autres sont restés hors la zone d'étude. L'effet du bord pour être diminué en générant une zone *buffer* autour de la zone d'études (Comber et al. 2008 ; Mulrooney et al., 2017)

Puisque de nombreuses différences existent entre les méthodes employées, il serait pertinent d'effectuer des analyses en faisant varier un seul élément des modèles à la fois (par exemple, réaliser des calculs avec des modèles qui considèrent une vitesse de marche

constante ou variable en fonction de la pente) afin de mieux comprendre comment et dans quelle mesure chaque élément affecte le niveau d'accessibilité piétonne aux EVU.

6. Conclusion

Ce travail analyse l'application de deux méthodes, l'une basée sur *raster* et l'autre sur réseau, pour analyser l'accessibilité piétonne aux EVU dans la zone urbaine du canton de Vaud, pour les personnes à mobilité dite « classique » et « réduite ».

Comme indiqué dans l'hypothèse principale de ce travail, les méthodes PD et NA génèrent des différences dans le nombre de personnes qui se trouvent à différents temps de marche d'un EVU. Les méthodes appliquées présentent des avantages et des inconvénients dans la modélisation de l'accessibilité piétonne aux EVU qui peuvent générer des sous-estimations et des surestimations des statistiques. Il est clair qu'une analyse plus approfondie est nécessaire pour clarifier quels éléments de chaque méthode affectent le calcul de l'accessibilité piétonne. Au-delà des différences entre les résultats des deux méthodes, ce travail met en lumière l'importance de considérer les capacités de déplacement réduites de certains groupes de la population. De plus, les comparaisons des modèles théoriques avec des données de terrain permettent de mettre en évidence la nécessité d'inclure davantage d'informations sur les préférences et les attentes des piétons et des visiteurs des EVU afin de mieux modéliser le déplacement piéton et de mieux saisir le niveau d'accessibilité de la population générale et des sous-groupes en particulier.

Ce travail souligne donc l'importance de réaliser des analyses d'accessibilité piétonne aux EVU qui incluent les caractéristiques et les préférences de sous-groupes de la population afin de fournir des informations utiles pour la planification, la gestion et l'aménagement urbain en vue de construire des villes plus inclusives, équitables et durables.

7. Bibliographie

Bauchot, L. (2022). *Analyse des interrelations entre les caractéristiques, les usages et les perceptions des utilisateurs des espaces verts dans la zone urbaine du canton de Vaud*. Mémoire en préparation

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

Bertram, C., & Rehdanz, K. (2015). Preferences for cultural urban ecosystem services : Comparing attitudes, perception, and use. *Ecosystem Services*, 12, 187-199. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.12.011>

Braubach, M., Egorov, A., Mudu, P., Wolf, T., Ward Thompson, C., & Martuzzi, M. (2017). *Effects of Urban Green Space on Environmental Health, Equity and Resilience* (p. 187-205). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_11

Canton de Vaud. (2020). *Etat et structure de la population*. <https://www.vd.ch/themes/etat-droit-finances/statistique/statistiques-par-domaine/01-population/etat-et-structure-de-la-population/>

Canton de Vaud. (2021). *Vieillir 2030. Portrait des seniors dans le canton de Vaud*. Département de la santé et l'action sociale (DSAS). https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/dsas/DGCS/20210924_Portrait_Seniors_final.pdf

Carmen, R., Jacobs, S., Leone, M., Palliwoda, J., Pinto, L., Misiune, I., Priess, J. A., Pereira, P., Wanner, S., Ferreira, C. S., & Ferreira, A. (2020). Keep it real : Selecting realistic sets of urban green space indicators. *Environmental Research Letters*, 15(9), 095001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9465>

Centre de recherches routières. (2012). *Revêtements des aménagements piétons. Recommandations pour la conception, la mise en œuvre et l'entretien*. Jean-Claude Moureau (Bruxelles Mobilité). <http://urbanisme.irisnet.be/publications/pdf/ppt-midis-aatl/revetements-pietons-vm>

Chênes, C., Giuliani, G., & Ray, N. (2021). Modelling Physical Accessibility to Public Green Spaces in Switzerland to Support the SDG11. *Geomatics*, 1(4), 383-398. <https://doi.org/10.3390/geomatics1040022>

Comber, A., Brunsdon, C., & Green, E. (2008). Using a GIS-based network analysis to determine urban greenspace accessibility for different ethnic and religious groups. *Landscape and Urban Planning*, 86(1), 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.01.002>

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

Confédération Suisse. (2022). *Préparer sa retraite*. <https://www.ch.ch/fr/retraite/age-de-la-retraite/>

Ćwik, A., Wójcik, T., Ziaja, M., Wójcik, M., Kluska, K., & Kasprzyk, I. (2021). Ecosystem Services and Disservices of Vegetation in Recreational Urban Blue-Green Spaces—Some Recommendations for Greenery Shaping. *Forests*, *12*(8), 1077. <https://doi.org/10.3390/f12081077>

De Roulet, P. (2012). *ItiVélo Développement d'un calculateur d'itinéraires vélo pour Genève*. Rapport de stage. Certifiact Complémentaire en Géomatique, UNIGE.

Delamater, P. L., Messina, J. P., Shortridge, A. M., & Grady, S. C. (2012). Measuring geographic access to health care : Raster and network-based methods. *International Journal of Health Geographics*, *11*(1), 15. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-11-15>

Enssle, F., & Kabisch, N. (2020). Urban green spaces for the social interaction, health and well-being of older people—An integrated view of urban ecosystem services and socio-environmental justice. *Environmental Science & Policy*, *109*, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.008>

Esri. (2022a). *Compréhension de la connectivité*.

Esri. (2022b). *Couche d'analyse de la zone de desserte*. <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/networks/service-area-analysis-layer.htm>

Esri. (2022c). *Fonction Nibble (Grignotage)*. Fonction Nibble (Grignotage). <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/nibble-function.htm>

Esri. (2022d). *Path Distance*. <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/path-distance.htm>

Farrugia, S., Hudson, M. D., & McCulloch, L. (2013). An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, *9*(2), 136-145. <https://doi.org/10.1080/21513732.2013.782342>

Fédération Française de la Randonnée Pédestre. (2022). *Marcher avec des enfants*.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

<https://www.ffrandonnee.fr/randonner/conseils/marcher-avec-des-enfants>

Giuliani, G., Petri, E., Interwies, E., Vysna, V., Guigoz, Y., Ray, N., & Dickie, I. (2021). Modelling Accessibility to Urban Green Areas Using Open Earth Observations Data : A Novel Approach to Support the Urban SDG in Four European Cities. *Remote Sensing*, 13(3), 422. <https://doi.org/10.3390/rs13030422>

Goebel, V., & Kohler, F. (2014). *L'espace à caractère urbain 2012. Rapport explicatif*. (Office fédéral de la statistique (OFS)). Office fédéral de la statistique (OFS).

Gong, F., Zheng, Z.-C., & Ng, E. (2016). Modeling Elderly Accessibility to Urban Green Space in High Density Cities : A Case Study of Hong Kong. *Procedia Environmental Sciences*, 36, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.09.018>

Guinaudeau, B., Brink, M., Schäffer, B., & Schlaepfer, M. (2022). *Quantifying the spatial distribution and social equity of urban green spaces in cities : A proposed methodology*. Article en préparation

Gupta, K., Roy, A., Luthra, K., Maithani, S., & Mahavir. (2016). GIS based analysis for assessing the accessibility at hierarchical levels of urban green spaces. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18, 198-211. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.06.005>

Herzele, A., & Wiedemann, T. (2003). A monitoring tool for the provision of accessible and attractive urban green spaces. *Landscape and Urban Planning*, 109-126. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00192-5)

Jalkanen, J., Fabritius, H., Vierikko, K., Moilanen, A., & Toivonen, T. (2020). Analyzing fair access to urban green areas using multimodal accessibility measures and spatial prioritization. *Applied Geography*, 124, 102320. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102320>

Jansson, M. (2014). Green space in compact cities : The benefits and values of urban ecosystem services in planning. *Nordic Journal of Architectural Research*, 2014, 139-160.

Kabisch, N., & Haase, D. (2014a). Green justice or just green? Provision of urban green spaces in Berlin, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 129-139.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.016>

Kabisch, N., & Haase, D. (2014b). Green justice or just green? Provision of urban green spaces in Berlin, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 129-139. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.016>

Kabisch, N., Haase, D., & Annerstedt van den Bosch, M. (2016). Adding Natural Areas to Social Indicators of Intra-Urban Health Inequalities among Children : A Case Study from Berlin, Germany. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8), 783. <https://doi.org/10.3390/ijerph13080783>

Karakas&Français SA. (2006). *Rapport sur l'état d'infiltration PGEE de la Ville de Lausanne. Rapport sur l'état d'infiltration.*

Krellenberg, K., Artmann, M., Stanley, C., & Hecht, R. (2021). What to do in, and what to expect from, urban green spaces – Indicator-based approach to assess cultural ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, 126986. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.126986>

La Rosa, D., Takatori, C., Shimizu, H., & Privitera, R. (2018). A planning framework to evaluate demands and preferences by different social groups for accessibility to urban greenspaces. *Sustainable Cities and Society*, 36, 346-362. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.026>

Le Texier, M., Schiel, K., & Caruso, G. (2018). The provision of urban green space and its accessibility : Spatial data effects in Brussels. *PLOS ONE*, 13(10), e0204684. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204684>

Loi fédérale sur les forêts, RS 921.0 (1991). https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/2521_2521_2521/fr

Loreno, S. (2014). *The Cost of Hauling Timber : A Comparison of Raster- and Vector- Based Travel-Time Estimates in GIS*. <https://doi.org/10.15760/geogmaster.08>

Markevych, I., Schoierer, J., Hartig, T., Chudnovsky, A., Hystad, P., Dzhambov, A., de Vries, S., Triguero-Mas, M., Brauer, M., Nieuwenhuijsen, M., Lupp, G., Richardson, E., Astell-Burt, T., Dimitrova, D., Feng, X., Sadeh, M., Standl, M., & Fuertes, E. (2017). Exploring pathways

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

linking greenspace to health : Theoretical and methodological guidance. *Environmental Research*, 158, 301-317. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.028>

Mulrooney, T., Beratan, K., McGinn, C., & Branch, B. (2017). A comparison of raster-based travel time surfaces against vector-based network calculations as applied in the study of rural food deserts. *Applied Geography*, 78, 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.10.006>

Nations Unies. (2016). *Rapport sur les objectifs de développement durable 2016*.

Office fédéral de la statistique. (2015). *Registre fédéral des bâtiments et des logements. Catalogue des caractères*. (3.7.). Office fédéral de la statistique.

Office fédéral de la statistique. (2019). *Atlas statistique de la Suisse* (7004424). Densité de la population, 2019; Office fédéral de la statistique (OFS). https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/fr/15467_75_3501_70/24215.html

OFROU, & Mobilité piétonne Suisse. (2018). *Aménagements piétons. Manuel de planification des mesures*. Office fédéral des routes (OFROU). www.ofrou.admin.ch

OMS. (2017). *Urban Green Space Interventions and Health. A review of impacts and effectiveness*. WHO Regional Office for Europe UN City.

Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., Watson, R. T., Başak Dessane, E., Islar, M., Kelemen, E., Maris, V., Quaas, M., Subramanian, S. M., Wittmer, H., Adlan, A., Ahn, S., Al-Hafedh, Y. S., Amankwah, E., Asah, S. T., ... Yagi, N. (2017). Valuing nature's contributions to people: The IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26-27, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>

Priess, J., Pinto, L. V., Misiune, I., & Palliwoda, J. (2021). Ecosystem Service Use and the Motivations for Use in Central Parks in Three European Cities. *Land*, 10(2), 154. <https://doi.org/10.3390/land10020154>

Remme, R. P., Frumkin, H., Guerry, A. D., King, A. C., Mandle, L., Sarabu, C., Bratman, G. N., Giles-Corti, B., Hamel, P., Han, B., Hicks, J. L., James, P., Lawler, J. J., Lindahl, T., Liu, H., Lu, Y., Oosterbroek, B., Paudel, B., Sallis, J. F., ... Daily, G. C. (2021). An ecosystem service

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

perspective on urban nature, physical activity, and health. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(22), e2018472118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2018472118>

Sander, H. A., Ghosh, D., van Riper, D., & Manson, S. M. (2010). How Do You Measure Distance in Spatial Models? An Example Using Open-Space Valuation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(5), 874-894. <https://doi.org/10.1068/b35126>

Schipperijn, J., Bentsen, P., Troelsen, J., Toftager, M., & Stigsdotter, U. (2013). Associations between physical activity and characteristics of urban green space. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.12.002>

Statistique Vaud. (2021). *Démographie. Rapport thématique*. https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/dfin/statvd/Publications/Autres/2021-2050_Persp-popul_VD_rapport.pdf

Swisstopo. (2021). *Réseau des transports CH - Acheminement spécifique pour les piétons Exemple de cas pratique élaboré en collaboration avec la ville de Saint-Gall et Fussverkehr St. Gallen*. <https://storymaps.arcgis.com/stories/71a8de33b0814654b4c1360d123ec0c7>

Swisstopo. (2022). *SwissALTI3D. Le modèle de terrain à haute résolution de la Suisse*. <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/height/alti3d.html#dokumente>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, & Population Division. (2019). *World urbanization prospects : The 2018 revision*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

Victor, N. (2010). *Modélisation de l'accessibilité piétonne à Luxembourg-Ville. Rapport de stage*.

Victor, N. (2016). *Evaluation des déplacements piétons quotidiens : Application à la ville de Luxembourg*. Université de Lyon.

Victor, N., & Klein, O. (2011). *Modélisation et visualisation de l'accessibilité piétonne à Luxembourg-Ville*. <https://sig2011.esrifrance.fr/luxembourg.aspx>

Ville de Lausanne. (2018, juin 15). *Espaces verts*. Site officiel de la Ville de Lausanne.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

<https://www.lausanne.ch/portrait/durabilite/espaces-verts.html>

Ville de Lausanne. (2022). *Présentation des quartiers*.
<https://www.lausanne.ch/officiel/statistique/quartiers/presentation-des-quartiers.html>

Voigt, A., Kabisch, N., Wurster, D., Haase, D., & Breuste, J. (2014). Structural Diversity : A Multi-dimensional Approach to Assess Recreational Services in Urban Parks. *AMBIO*, 43(4), 480-491. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0508-9>

Wen, C., Albert, C., & Von Haaren, C. (2020). Equality in access to urban green spaces : A case study in Hannover, Germany, with a focus on the elderly population. *Urban Forestry & Urban Greening*, 55, 126820. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126820>

WikiOSM. (2020). *Map features*. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_features

Zwierzchowska, I., Hof, A., Iojă, I.-C., Mueller, C., Ponizy, L., Breuste, J., & Mizgajski, A. (2018). Multi-scale assessment of cultural ecosystem services of parks in Central European cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 84-97. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.017>

8. Annexes

Annexe I. Largeurs standard de chaque chemin, rue et route en fonction de leur type de construction.
Source : Catalogue des objets swissTLM^{3D} 1.9 (2021).

Catégories	Type de construction	Largeur définit du buffer
Barrières	Autoroutes	30m
	Semi-autoroutes	7m
Routes principales	10m <i>Strasse</i>	10 m
	8m <i>Strasse</i>	8 m
	6m <i>Strasse</i>	6 m
Route secondaire	4m <i>Strasse</i>	4 m
Route secondaire de quartier	3m <i>Strasse</i>	3 m
Chemins piétons	2m <i>Weg</i>	2 m
	2m <i>Wegfragment</i>	2 m

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

1m Weg	1 m
1m Wegfragment	1 m
Markierte Spur	1 m
Platz	3 m

Annexe II. Tableau du diagramme de facteur vertical.

Pente (en degrés)	FV pour le modèle PMC (h/mts)	FV pour le modèle PMR (h/mts)
- 90	-1	-1
-26,57	0,0005000	0,002000000
-11,31	0,0005000	0,002000000
-5,71	0,0005000	0,002000000
-4,57	0,0004348	0,001666667
-3,43	0,0004000	0,001428571
-2,29	0,0003333	0,001000000
-1,15	0,0002500	0,000769231
0	0,0002273	0,000333333
1,15	0,0002381	0,000666667
2,29	0,0002941	0,000833333
3,43	0,0003846	0,001000000
4,57	0,0004167	0,001250000
5,71	0,0005000	0,001428571
11,31	0,0005000	0,001428571
26,57	0,0005000	0,001428571
90	-1	-1

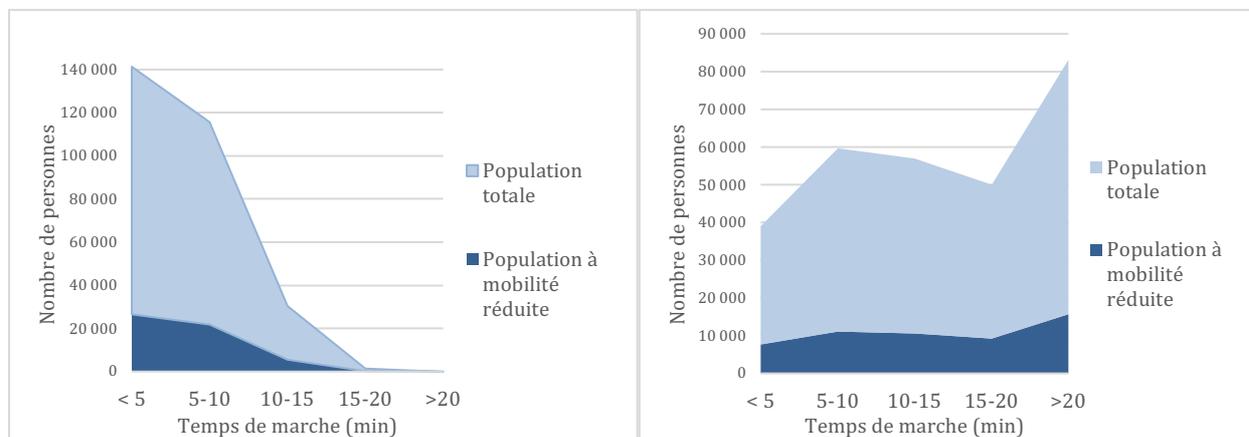
Annexe III. Géocodage de points de départ des usagers des EVU (Bauchot, 2022), calcul de chemins de moindre coût possiblement empruntés par les personnes interviewées à leur EVU de destination et calcul de chemin de moindre coût à l'EVU le plus proche depuis le même point de départ.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du
canton de Vaud

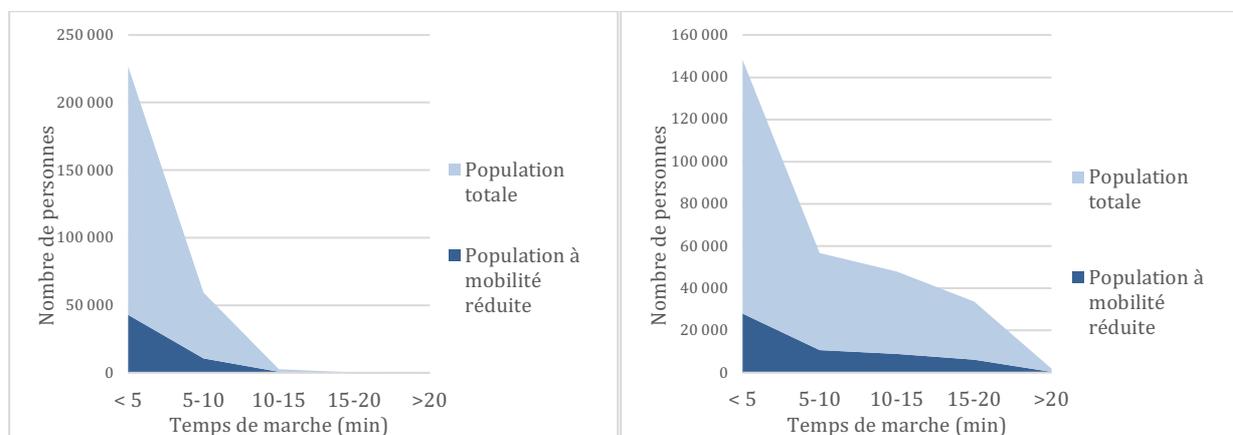
Nom de l'EVU	Activité principale	Age	Point de départ	LOCATION	LAT	LONG	STATUS	CMC possible (min) sur PD	CMC au EVU le plus proche (min) sur PD	CMC possible (min) sur NA	CMC au EVU le plus proche (min) sur NA
Parc Hermitage	Regarder le paysage	30-40	Hôtel du Port	Place du Port, Lausanne, Switzerland	46,5075	6,62774	success	83,4	7,5	54,17	2,2
Parc Hermitage	Prendre goûter en famille	30-40	Intersection Route Pavement/Route du Signal	Route du Signal, Lausanne, Switzerland	46,5324	6,63732	success	3,72	3,66	7,37	4,82
Parc Hermitage	jogging	20-30	Rue Mauborget	Rue Mauborget, Lausanne, Switzerland	46,5227	6,62912	success	16,2	2,7	16,17	8,07
Parc Hermitage	promenade	50-60	Route du Signal 23	Route du Signal, Lausanne, Switzerland	46,5324	6,63732	success	3	0,29	5,77	1,6
Petit Parc de Prieuré (PMR)	promenade	70-80	Ouchy, Tour Haldimand	Avenue de la Tour-Haldimand, Lausanne, Switzerland	46,5062	6,6424	success	7,68	0,66	11,07	1,61
Parc de la Tour Grise	Pique-nique entre amis	40-50	Intersection Fontenay-Marc-Dufour	Chemin de Fontenay, Lausanne, Switzerland	46,518	6,61926	success	10,2	11,4	10,52	9,02
Parc de la Tour Grise	manger à la pause de midi	30-40	Languedoc 30D	Chemin du Languedoc 30, Lausanne, Switzerland	46,5178	6,61108	success	42,6	9	27,67	8,83
Parc de Montoie	joue enfants	30-40	Contigny 30	Chemin de Contigny 30, Lausanne, Switzerland	46,51768	6,61108	success	0,13	0,12	1,35	1,35
Parc de Montoie	joue enfants	30-40	Chemins de Languedoc	Chemin du Languedoc, Lausanne, Switzerland	46,5178	6,609453	success	15	0,29	11,25	1,2
Forêt du Mermet	promenade	50-60	Ch. De l'Ancien-Stand 24	Chemin de l'Ancien-Stand, Lausanne, Switzerland	46,5352	6,62808	success	0,18	0,18	0,93	0,93
Parc Chamblandes	promener le chien	18-20	Intersection Chamblandes/c h, des Oches	Chemin de Chamblandes, Pully, Switzerland	46,5081	6,64826	success	1,92	1,92	2,37	2,37
Forêt Vuachère	promenade	50-60	Route Aloys-Fauquez 65	Route Aloys-Fauquez, Lausanne, Switzerland	46,5332	6,63215	success	34,8	2,82	36,83	4,33
Forêt Vuachère	Nordic Walking	20-30	Mayoresses 55	Chemin des Mayoresses, Lausanne, Switzerland	46,5317	6,65692	success	8,94	8,94	7,53	7,53
Parc Carl Sauter (PMR)	joue enfants	60-70	Gare de Renens	Place de la Gare, Lausanne, Switzerland	46,5362	6,57999	success	41,4	28,2	40,37	14,5
Parc Carl Sauter (PMC)	joue enfants	30-40	Ch.Roche 20	Place de la Gare, 1020, Renens (Vd), Switzerland	46,535	6,58991	success	52,8	7,02	14,23	5,9
Parc Grand-Pré	Rencontrer des amis	20-30	Av.de Floral 14	Avenue de Floral, Lausanne, Switzerland	46,5346	6,60168	success	52,8	10,8	26,65	11,47
Parc Grand-Pré	Prendre l'air	20-30	Av.Rochelle 16	Avenue de la Rochelle, Lausanne, Switzerland	46,5339	6,60116	success	4,86	4,86	4,1	4,1
Forêt Vallon	Passage et détente	30-40	Av.Sallaz 22	Avenue de la Sallaz, Lausanne, Switzerland	46,5316	6,64752	success	16,2	4,8	14,5	4,37

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

Annexe IV. Nombre de personnes de la population totale et de la population à mobilité réduite à différents temps de marche d'un EVU sous le modèle PMC (à droite) et PMR (à gauche) avec PD.

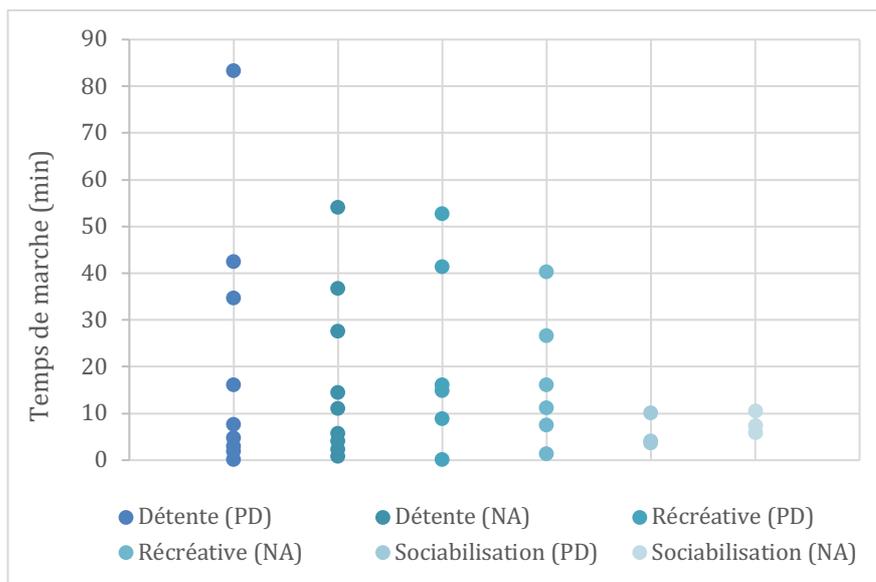


Annexe V. Nombre de personnes de la population totale et de la population à mobilité réduite à différents temps de marche d'un EVU sous le modèle PMC (à droite) et PMR (à gauche) avec NA.

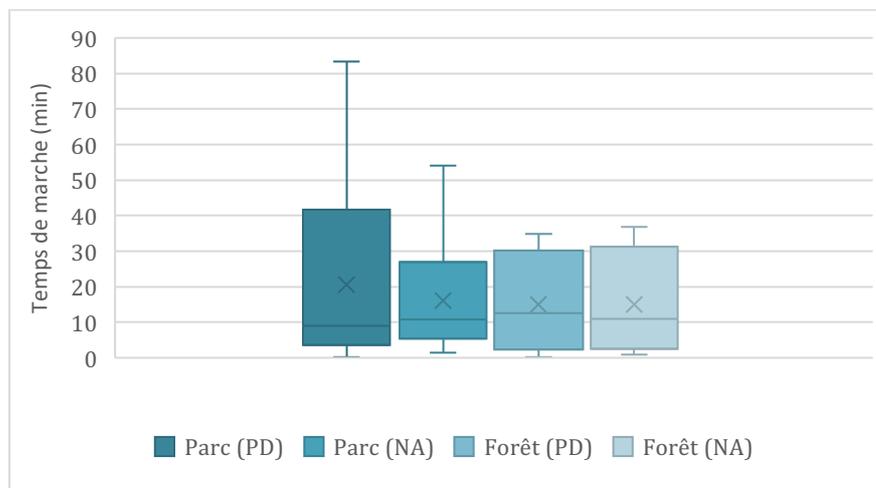


Annexe VI. Temps de marche estimé (en min) vers l'EVU de destination de personnes interviewées selon le type d'activité réalisée avec PD et NA (récréative, de détente et de sociabilisation). La pratique du sport et le jeu des enfants sont des activités récréatives; se promener, regarder le paysage et prendre de l'air sont considérées comme des activités de détente ; et rencontrer des amis ou manger avec d'autres personnes sont considérées des activités de sociabilisation.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud



Annexe VII. Temps de marche estimé (en min) vers l'EVU de destination de personnes interviewées selon le type d'EVU (parc ou forêt) obtenus avec PD et NA.



Annexe VIII. Temps de marche estimé (en min) vers l'EVU de destination de personnes interviewées selon leur classe d'âge (18-30 ans, 30-60 ans et plus de 60 ans) obtenus avec PD et NA.

Modélisation de l'accessibilité piétonne aux espaces verts de la zone urbaine du canton de Vaud

