

La foule

Par définition, une foule est une multitude de personnes regroupées dans un même lieu. Face à la complexité du comportement de l'homme, de nombreux modèles de simulations ont été proposés ces dernières années afin de reproduire un comportement ou une situation précise. Les premières études menées pour décrire le comportement des piétons durant la marche étaient des observations des piétons afin de recueillir des informations qualitatives (e.g. la détermination des préférences des piétons) et quantitatives (e.g. la vitesse de marche des piétons) sur la foule. Ces observations ont permis de lister certaines caractéristiques dans le comportement des piétons et de visualiser des phénomènes d'auto-organisation de la foule. Elles ont inspiré par la suite les chercheurs qui ont proposé des modèles de foule afin de les simuler efficacement. Les premiers modèles caractérisant le comportement des piétons ont été des modèles statistiques [24, 27]. Ils ont permis de définir les valeurs de densités et de débits observables, et ainsi de trouver les vitesses moyennes de déplacement des piétons. Les premiers modèles informatiques simulant les mouvements de foule sont les modèles de simulation macroscopique [24, 27–33]. Les comportements simulés restent simples car les piétons sont représentés dans leur ensemble. Pour prendre en compte des comportements de piétons plus complexes, les modèles de mouvement de foule microscopiques

ont été développés [6, 7, 10, 34, 35]. Chaque piéton a son propre comportement, prend ses propres décisions et réagit individuellement aux modifications de son environnement.

Cette section est formée de deux parties. La première partie 1.2.1 présente les observations faites sur la foule. Elles ont permis de lister les différents comportements des piétons dans des situations définies, et de noter les phénomènes d'auto-organisation de la foule, qui se mettent en place dans certaines situations précises. Dans la deuxième 1.2.2, les différentes catégories de modèles de mouvement de foule existants seront présentées.

1.2.1 Observations de la foule

Une liste des différentes observations faites sur la foule est donnée. Ces observations ont été utilisées par la suite pour proposer un modèle de mouvement de foule.

Comportement des piétons

Les caractéristiques du comportement des piétons, données dans de nombreux documents [4, 36, 37], sont :

- D'après [38], la vitesse moyenne des piétons en régime libre suit une loi gaussienne de moyenne 1.34 m.s^{-1} et d'écart type 0.26 m.s^{-1} . Ces paramètres ont été recalculés à partir de données provenant de plusieurs pays sur des observations faites dans un couloir non encombré [39].
- D'après [40], un piéton se déplace à une allure souhaitée qui dépend de ses caractéristiques personnelles (son âge, son genre, sa taille, son état de santé, etc.), des caractéristiques de son voyage (sa destination finale, sa familiarité avec le chemin utilisé, la longueur du chemin, la prise en compte ou non de bagages, etc.), des propriétés de l'infrastructure traversée (son type, son état, son attractivité, sa capacité à servir d'abri, etc.), et finalement les caractéristiques de l'environnement (conditions climatiques, etc.).
- les piétons sont adeptes du principe du moindre effort : ils n'aiment pas faire des détours ou se déplacer en sens inverse de la majorité des gens, même s'ils doivent aller dans une direction surpeuplée.
- en fonction de ses motivations, le piéton choisira de se déplacer selon le chemin le plus court, le plus rapide, ou le moins contraignant.
- les piétons changent de direction le moins possible : ils préfèrent marcher sur une route droite plutôt que sinueuse.
- chaque piéton préfère se déplacer avec sa propre allure souhaitée, celle où il est le plus à l'aise et donc dépense le moins d'énergie.
- les piétons aiment s'approprier un territoire : ils gardent une certaine distance entre eux et entre eux et les obstacles. Cette distance minimale dépend entre autres de la densité de la foule et de chaque individu.

- pour avancer plus vite parmi une foule, un piéton peut se faufiler entre les autres piétons en pivotant son corps pour passer dans des espaces peu larges [41].
- les piétons ne se déplacent pas tel un fluide continu, mais en petits groupes espacés. La majorité des personnes constituant une foule sont des groupes (e.g. amis ou famille) composés de deux à quatre membres [42] marchant comme “un seul homme”.
- un groupe séparé pour une certaine raison cherche à se reformer.
- un groupe organisé hiérarchiquement (e.g. une famille) a un comportement différent d’un groupe n’ayant pas de hiérarchie (e.g. un groupe d’amis).
- en cas d’embouteillage, les individus suivent la personne devant eux et créent une sorte de flux.
- dans le cas d’une foule voulant sortir d’une pièce en urgence, les interactions entre individus eux-mêmes et entre individus et obstacles peuvent créer de grandes pressions, ce qui a pour conséquence de blesser des individus ou encore détruire des obstacles (comme des barrières ou des grillages).
- en situation de panique, un individu devient nerveux, ce qui induit un manque de lucidité et un comportement autiste. Ce type de comportement est visible généralement dans des lieux clos (e.g. un avion).
- en situation d’urgence, un individu se déplace considérablement plus vite que la normale.
- en situation d’urgence, les individus tendent à développer un phénomène de mimétisme : ils agissent de la même façon que leurs voisins.

Phénomènes d’auto-organisation observés

De nombreux travaux présentent les phénomènes d’auto-organisation observés dans le trafic piétonnier. Quelques uns de ces phénomènes sont retrouvés par certains modèles de foule. Ces phénomènes d’auto-organisation sont :

- L’effet “Faster is slower” : quand la voie se rétrécit et qu’il y a un phénomène d’entonnoir, les individus sont plus nerveux et veulent avancer plus vite. Ils “poussent” les autres individus et donc le mouvement devient moins fluide, la foule est plus dense et le temps nécessaire à la traversée de l’entonnoir augmente.
- l’embouteillage : quand une foule très dense essaie de se déplacer.
- le blocage et le phénomène d’arche (Figure 1.1) : quand une foule dense veut traverser un espace étroit tel qu’une porte, un blocage s’installe et une arche se forme autour de l’espace peu large.
- la formation de ligne (Figure 1.2) : quand une foule se déplace dans deux directions

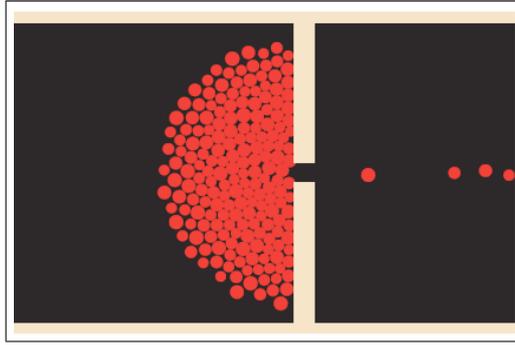


FIGURE 1.1 – Phénomène d’arche d’après [2].

opposées, il se crée naturellement des lignes de piétons qui se suivent, ce qui permet de réduire les collisions entre piétons et d’augmenter leur vitesse de déplacement.



FIGURE 1.2 – Formation de ligne à contre courant d’après [3].

- le phénomène d’oscillation (Figure 1.3) : lorsqu’une porte est traversée par deux foules se déplaçant en sens contraire, les piétons composants chaque foule la traversent en alternance et un phénomène d’oscillation se crée.

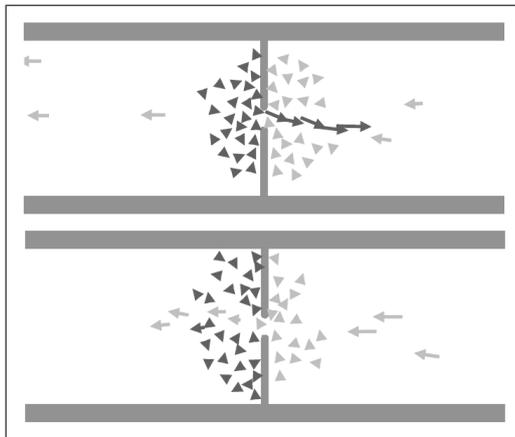


FIGURE 1.3 – Phénomène d’oscillation d’après [4].

- le “corner hugging”(Figure 1.4) : lorsque des piétons tourne dans un angle, ils ralentissent et la densité de piéton augmente près de l’angle.



FIGURE 1.4 – Corner hugging d’après [3].

- le comportement de compétition : lorsque des piétons sont en compétition pour évacuer un espace donné, l’évacuation est inefficace ou les comportements des individus sont inadaptés.
- la file (Figure 1.5) : lors d’une évacuation, les piétons se mettent en file indienne.

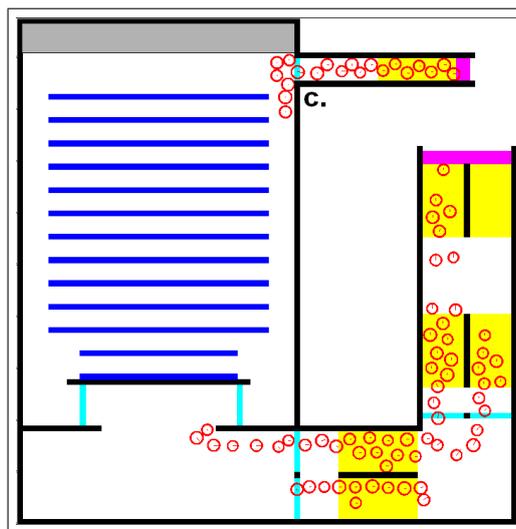


FIGURE 1.5 – Formation de file indienne lors de l’évacuation d’après [5].

- pendant une évacuation, les piétons ont tendance à aller vers la sortie qu’ils ont l’habitude d’utiliser.

1.2.2 État de l’art des modèles de mouvement de foule

Les modèles de mouvement de foule ont été développés idéalement pour reproduire tous les comportements des piétons ainsi que les phénomènes de foule observés. Évidemment, la complexité des comportements et phénomènes observés font que chaque modèle cible une ou des applications spécifiques. Les divers comportements peuvent être classés en trois catégories [39] : (i) le niveau stratégique qui regroupe les décisions que prend l’individu sur l’organisation générale de ses activités, comme le fait d’aller acheter un billet de train puis

d’aller acheter un journal [43]; (ii) le niveau tactique qui relève de l’intégration de la topologie des lieux et de la planification de route pour réaliser chacune des tâches [39, 44]; (iii) et enfin le niveau opérationnel qui relève du déplacement à court terme du piéton et de ses interactions avec les individus qu’il croise sur son chemin [7, 10, 23]. La modélisation de l’intégralité de ces comportements nécessite la mise en place d’une formalisation très lourde, intégrant un grand nombre de processus cognitifs comme la perception, le contrôle moteur, les motivations du piéton, sa mémoire, ses capacités de raisonnement, etc. Ce type de modélisation trouve son intérêt dans certains domaines de recherche comme l’intelligence artificielle, la psychologie expérimentale ou les neurosciences cognitives, dont les finalités sont différentes de notre problématique de travail. Nous nous intéresserons aux comportements des piétons qui relèvent du niveau opérationnel, comme l’évitement ou la bousculade. Parmi les modèles qui se focalisent sur ce niveau opérationnel, les différentes approches existantes peuvent être classées selon différents critères (Figure 1.6) : le mode de représentation de la foule, la représentation de l’espace de déplacement des piétons, la représentation du piéton, la représentation du contact, la représentation du mouvement des piétons, le phénomène de foule ciblé à analyser, le type de foule, etc. Nous avons choisi de classer et présenter

mode of representation of the crowd	macroscopic	(Henderson, 1971; Bodgi <i>et al.</i> , 2007)
	microscopic	(Reynolds, 1987; Helbing <i>et al.</i> , 1995) (Blue <i>et al.</i> , 2000; Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001) (Teknomo, 2006; Paris <i>et al.</i> , 2007; Venel, 2008) (Pécol <i>et al.</i> , 2010)
representation of the area of displacement	continuous space	(Reynolds, 1987; Helbing <i>et al.</i> , 1995) (Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001; Teknomo, 2006) (Paris <i>et al.</i> , 2007; Venel, 2008; Pécol <i>et al.</i> , 2010)
	discretized space	(Blue <i>et al.</i> , 2000)
representation of the contact	by using regularizing laws	(Helbing <i>et al.</i> , 1995; Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001) (Teknomo, 2006)
	by solving a local non linear problem	(Venel, 2008; Pécol <i>et al.</i> , 2010)
representation of the pedestrians’ movement	rules	(Reynolds, 1987; Blue <i>et al.</i> , 2000) (Venel, 2008)
	data	(Paris <i>et al.</i> , 2007; Paris, 2007)
	forces	(Helbing <i>et al.</i> , 1995; Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001) (Teknomo, 2006; Pécol <i>et al.</i> , 2010)
target phenomena to be analyzed	counterflow lines	(Helbing <i>et al.</i> , 1995; Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001) (Teknomo, 2006; Paris <i>et al.</i> , 2007) (Venel, 2008; Pécol <i>et al.</i> , 2010)
	evacuation	(Helbing <i>et al.</i> , 1995; Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001) (Venel, 2008; Pécol <i>et al.</i> , 2010)
type of crowd walking	normal walking velocity	(Helbing <i>et al.</i> , 1995; Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001) (Teknomo, 2006; Paris <i>et al.</i> , 2007) (Paris, 2007; Pécol <i>et al.</i> , 2010)
	emergency walking	(Helbing <i>et al.</i> , 1995; Hoogendoorn <i>et al.</i> , 2001) (Venel, 2008)

FIGURE 1.6 – Critères pour la classification des modèles de mouvement de foule [5].

les modèles de niveau opérationnel selon le mode de représentation de la foule. Nous démontrons deux grandes catégories : les modèles dits “macroscopiques” et les modèles dits “microscopiques”.

Les modèles dits macroscopiques

Dans les modèles macroscopiques, les piétons ont un comportement collectif, la foule est considérée dans son ensemble. On peut les classer en deux sous-catégories : les modèles de régression et les modèles de dynamique des fluides ou gaz.

Modèles de régression : Dans les modèles de régression, le mouvement global des piétons est établi à partir de relations statistiques entre les variables de flot et dépend de l'infrastructure étudiée et des circonstances spécifiques au mouvement [24,27]. Pour bien comprendre le fonctionnement de ce type de modèles, nous présentons l'approche historique des niveaux de service introduite par Fruin [24]. Les différents modèles de régression sont expliqués dans [37]. Pour caractériser chaque lieu d'échange, Fruin met au point une graduation en niveaux de services. Chaque niveau correspond à un intervalle de densités de personnes, et à un débit moyen observé, allant de A pour le meilleur à F pour le moins bon (Tableau 1.1).

Niveau de service	Densités		Débit
	personnes/m ²	m ² /personnes	pers./min/m
A	< 0.3	> 3.2	< 23
B	0.3 à 0.4	2.3 à 3.2	23 à 33
C	0.4 à 0.7	1.4 à 2.3	33 à 49
D	0.7 à 1.1	0.9 à 1.4	49 à 66
E	1.1 à 2	0.5 à 0.9	66 à 82
F	> 2	< 0.5	variable

TABLE 1.1 – Niveaux de services de Fruin [24].

La caractérisation de chaque niveau de service, du point de vue du comportement des piétons, est la suivante :

- A** Jusqu'à cette densité, chaque voyageur peut se déplacer à la vitesse qu'il désire, les collisions restant improbables.
- B-C** Les voyageurs peuvent encore se mouvoir avec une relative facilité, éviter les conflits et choisir leur vitesse.
- C-D** Les dépassements deviennent plus difficiles, la faible distance séparant chaque personne incite les piétons à réduire leur vitesse.
- D-E** Cette zone critique impose une vitesse générale faible, le déplacement des voyageurs devient irrégulier, les déplacements et autres changements de direction sont quasiment impossibles.
- E-F** Les contacts entre piétons sont inévitables, interdisant tout dépassement.

Modèles de dynamique des fluides ou gaz : Pour illustrer les modèles de dynamique des fluides ou gaz [28–33,45], on prend l'exemple du modèle de foule de Bodgi [31] dans lequel les piétons sont représentés dans leur ensemble par un fluide compressible. Cette approche est connue dans la modélisation du trafic de véhicules. On regarde le comportement de la foule en un point donné, les variables utilisées sont des variables locales qui dépendent du temps t et de l'espace x ($x \in [0; L]$) si l'on considère la position longitudinale des piétons sur

une passerelle de longueur L). Ainsi le comportement de la foule est assimilé à celui d'un liquide compressible gouverné par l'équation de conservation de la masse, où η représente la densité locale des piétons et v leur vitesse locale :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\eta \cdot v) = 0 \quad (1.1)$$

Ayant deux variables, une deuxième équation sera nécessaire pour compléter le système. Elle est généralement connue sous le nom d'équation de fermeture, et met en relation les variables η et v .

D'autres modèles de dynamique des fluides ou gaz sont présentés dans [37].

Synthèse : Si on se base sur les observations de la foule qui stipulent que les personnes se déplacent majoritairement en petites unités, ce type de modèles n'est plus adapté à la foule. Par contre, ils peuvent être utiles lorsque les foules sont denses et que l'on s'intéresse aux mouvements d'ensemble de la foule. Les autres inconvénients des modèles macroscopiques sont que les caractéristiques de chaque piéton ne peuvent pas être prises en compte, comme la position du piéton, la direction de son mouvement et ses caractéristiques physiques.

Les modèles dits microscopiques

Dans les modèles microscopiques, le mouvement de chaque individu est représenté dans le temps et l'espace. Chaque individu a son propre comportement, ses propres décisions et interagit avec les autres. On peut classer ces modèles en 5 sous-catégories : les modèles à base de règles, les modèles de forces sociales, les modèles d'automates cellulaires, les modèles de choix discret et les modèles mathématiques.

Modèle à base de règles : Le modèle "rule-based" introduit par Reynolds [6, 46] s'inspire du vol en groupe des oiseaux pour modéliser la foule. En l'occurrence, trois règles décrivent le comportement des oiseaux qui restent à une certaine distance les uns des autres (Figure 1.18) : (i) la séparation : les oiseaux ne collisionnent pas ; (ii) l'alignement : ils essayent de garder une direction et une vitesse de mouvement commune ; et (iii) la cohésion : ils essayent de rester unis. La première règle consistant à ne pas faire collisionner les oiseaux ou futurs piétons a pour conséquence que la forme des individus n'est pas importante.

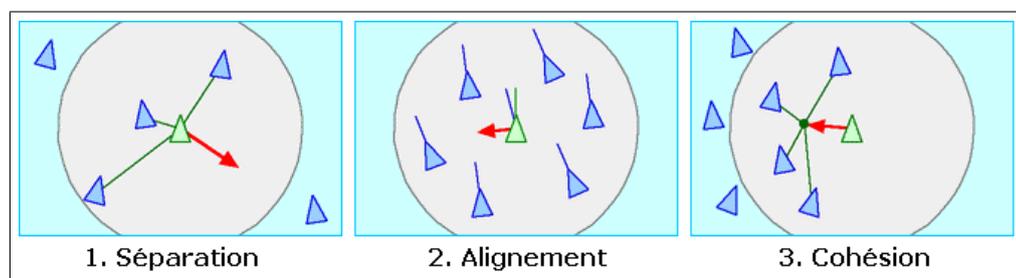


FIGURE 1.7 – Les trois règles caractérisant le comportement des oiseaux [6].

Le principal avantage de ce modèle est sa faible complexité, et son inconvénient majeur est qu'il n'est pas adapté aux foules trop denses car les collisions entre piétons sont évitées.

Modèles de forces sociales : Le modèle de forces sociales [2, 4, 7, 23, 47–53] développé principalement par Helbing est un modèle qui permet de gérer le mouvement de chaque piéton, représenté par un disque, par l'utilisation de 3 forces : une d'accélération, une de répulsion et une d'attraction (facultative) (Figure 1.8). La force motrice d'accélération permet

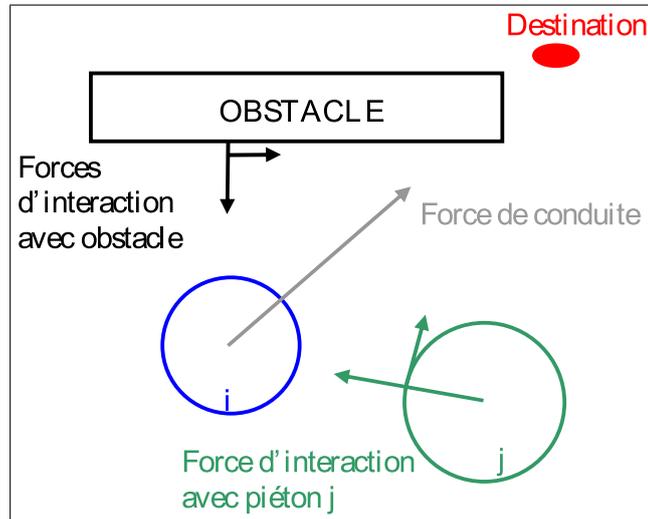


FIGURE 1.8 – Les forces agissant sur le piéton i - les forces représentées : une force motrice d'accélération pour qu'il se déplace vers une destination souhaitée ; une force d'interaction à distance à cause du piéton j , et une autre à cause de l'obstacle ; et les forces non représentées : les forces de répulsion permettant de gérer les contacts piéton-piéton et piéton-obstacle et les forces attractives permettant d'introduire d'autres comportements [7].

au piéton de se déplacer vers sa destination souhaitée. Elle est dirigée à chaque instant vers cette destination. La force de répulsion est inspirée d'une approche granulaire [54]. Chaque piéton a sa propre masse et a une certaine direction et allure qu'il adapte en fonction de l'environnement qui l'entoure (piétons et obstacles). Il peut se déplacer continûment dans un environnement 2D car il n'y a pas de discrétisation spatiale de la zone de déplacement. Ce modèle est principalement utilisé pour simuler des situations d'évacuation.

Le principal avantage de ce modèle est sa faible complexité, et son inconvénient majeur est qu'il n'est pas adapté aux foules trop denses car les piétons oscillent sur place de part l'utilisation de la force de répulsion à distance [53].

Modèles d'automates cellulaires : Les modèles d'automates cellulaires sont des modèles où la zone de déplacement 2D des piétons est discrétisée [8, 34, 55–59]. Une grille uniforme de cellules comporte des cellules inaccessibles pour représenter les obstacles, des cellules occupées par les piétons et des cellules vides (Figure 1.9). A chaque pas de temps, les piétons se déplacent de cellule en cellule voisine selon certaines règles. Il y a deux façons de déplacer les piétons à chaque pas de temps. Soit les piétons se déplacent chacun à leur tour (individu par individu) de manière aléatoire. La gestion du contact se fait alors de manière intrinsèque, le piéton ne peut pas se déplacer dans une cellule occupée. Soit la mise à jour de la position des piétons est globale (en même temps) et le hasard est utilisé si deux piétons veulent se déplacer dans la même cellule.

Le principal avantage de ce type de modèles est la réalisation de simulations dans des espaces vastes avec beaucoup de piétons car les temps de calcul des simulations sont inté-

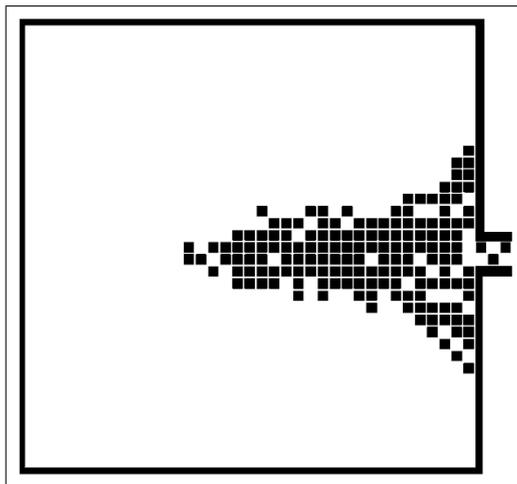


FIGURE 1.9 – Exemple d’une simulation d’évacuation de salle réalisée avec un modèle d’automate cellulaire [8].

ressants. L’inconvénient majeur est le manque de réalisme car le mouvement des piétons est restreint par la grille et les contacts ne sont pas gérés directement.

Modèles de choix discrets : Le modèle de choix discrets [9, 35, 60–62], qui est un mélange des modèles de forces sociales et d’automates cellulaires, repose sur l’identification de deux types de comportement : contraint et non contraint (Figure 1.10.a). Un comportement

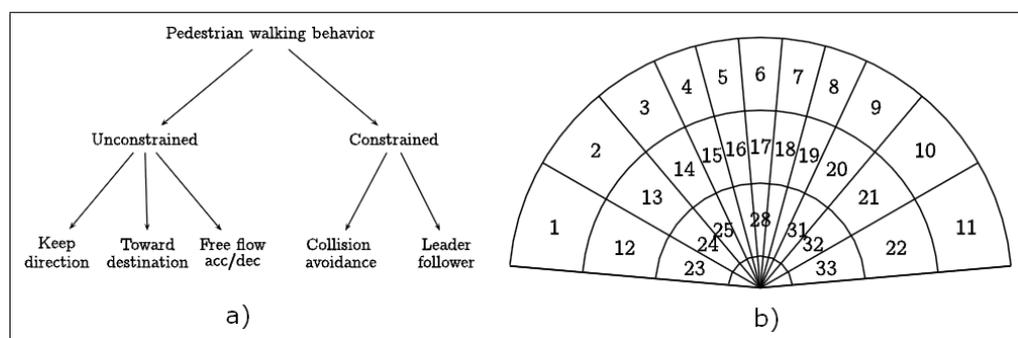


FIGURE 1.10 – Modèle de choix discret [9] - a) Concept du comportement de marche des piétons ; b) Représentation de l’ensemble des choix de mouvement du piéton, avec numérotation des alternatives.

non contraint est un comportement qui est indépendant des autres piétons. Le contraint prend en considération le phénomène de collision et le phénomène “d’entraînement”. Ce modèle fait intervenir des forces qui dépendent de nombreux paramètres déduits de données expérimentales.

L’avantage du modèle est qu’il peut simuler beaucoup de situations différentes. Ces inconvénients sont le trop grand nombre de paramètres identifiés et le fait que le déplacement du piéton se réalise à l’aide d’un champ de vision discrétisé qui restreint son mouvement (Figure 1.10.b).

Modèle mathématique : Dans le modèle mathématique de mouvements de foule de Venel [10], les piétons sont représentés par des disques, ils avancent avec leur propre direction et allure, ils peuvent se contourner et le contact entre individus est géré par une contrainte géométrique qui empêche l'interpénétration. Une vitesse souhaitée actualisée à chaque instant permet aux piétons de se déplacer selon le chemin le plus court pour atteindre leur destination. Ce modèle est inspiré d'un modèle d'interactions granulaires [63] dans lequel les contacts entre grains sont des collisions inélastiques. Il est adapté aux foules denses dans les situations d'évacuation (Figure 1.11).

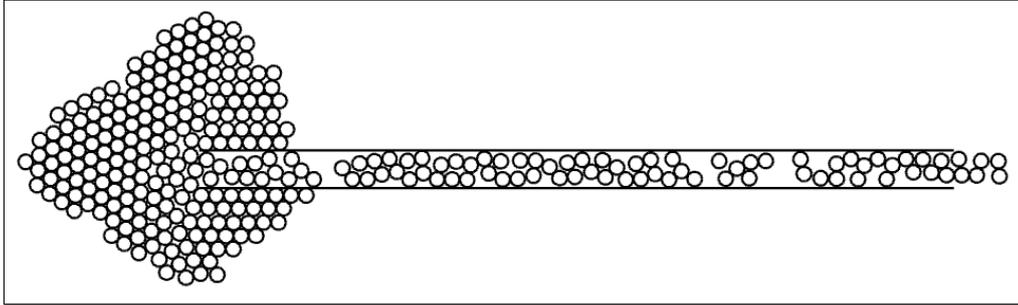


FIGURE 1.11 – Exemple d'une simulation d'évacuation d'un métro par un escalator réalisée avec le modèle mathématique de Venel [10].

L'avantage du modèle est que la condition de non-interpénétration entre les piétons est toujours respectée. Ses inconvénients sont qu'il ne prend pas en compte la masse des piétons, et que le contact piéton-piéton ou piéton-obstacle est uniquement parfaitement inélastique.

Synthèse : Les modèles microscopiques sont très intéressants pour représenter des scénarios très différents et variés : des piétons marchant dans plusieurs directions, des densités variables de piétons composant la foule, des évacuations d'urgence avec plusieurs sorties dont l'une est beaucoup plus empruntée que les autres, etc. Ces modèles sont en général moins adaptés aux foules très denses contenant beaucoup de piétons car la détection et le traitement des interactions piéton-piéton et piéton-obstacle peuvent être très lourds en temps de calcul.

1.3 Le piéton

Dans cette section, nous présentons tout d'abord les différents résultats expérimentaux des études réalisées sur la marche. Les caractéristiques de la marche des piétons ainsi que des forces engendrées par les piétons en marchant sur un sol rigide sont données [31]. Ensuite, nous exposons quelques uns des modèles de piéton existant.

1.3.1 Résultats expérimentaux des études réalisées sur la marche

Observations sur la marche

Marcher est l'action qui consiste à se déplacer en mettant un pied devant l'autre, et en gardant au moins un des deux pieds en contact avec le plancher sur lequel on bouge. Lorsqu'on marche, deux phases se succèdent : les deux pieds sont en contact avec le plancher

puis un seul. Le fait d'avoir les deux pieds en contact avec le sol permet de changer de jambe d'appui et de donner à la deuxième jambe l'impulsion nécessaire pour se lancer en avant. La durée d'un pas est définie comme la période de temps qui sépare le début de deux phases successives où les deux pieds sont simultanément en contact avec le sol. La longueur d'un pas est la distance qui sépare les deux pieds durant la phase de contact simultanée. Lorsque le piéton marche librement, i.e. lorsqu'il n'est influencé ni par son environnement proche ni par le plancher, la longueur moyenne d'un pas suit une loi normale de moyenne $L_0 = 0.71 \text{ m}$ et d'écart-type 0.071 m [64]. La vitesse de marche est définie comme le rapport entre la longueur d'un pas et sa durée. La valeur moyenne de la vitesse de marche dans des conditions de marche libre suit un loi normale de moyenne 1.34 m.s^{-1} et d'écart-type 0.26 m.s^{-1} [38].

Périodicité et fréquences

La marche d'un piéton dans des conditions de marche libre est habituellement supposée périodique [65], i.e. la longueur d'un pas et sa durée sont sensiblement identiques d'un pas à l'autre pour un même piéton. La période de la marche est définie comme étant la durée moyenne d'un pas pour un piéton donné. La fréquence a été évaluée expérimentalement par plusieurs auteurs et a une valeur voisine de 2 Hz (Tableau 1.2). La figure 1.12 montre la courbe de la distribution normale des fréquences selon Matsumoto et al. [11] d'après des expériences réalisées sur 505 personnes.

Auteurs	Fréquences
Matsumoto et al. [11] (505 personnes)	la fréquence suit une loi de distribution normale de moyenne 2 Hz et d'écart-type 0.173 Hz
Kerr et Bishop [66] (40 personnes)	fréquence moyenne de 1.9 Hz
Leonard [67]	fréquence de la marche normale $1.7 - 2.3 \text{ Hz}$
Bachmann et al [68]	$1.6 - 2.4 \text{ Hz}$
Zivanovic et al. [64] (939 personnes)	loi normale de moyenne 1.87 Hz et d'écart-type 0.186 Hz

TABLE 1.2 – Fréquence de marche.

Cependant, cette périodicité est contestée dans les travaux de Sahnaci et Kasperi [69] qui affirment que la durée d'un pas diffère selon la jambe d'appui. Ainsi, on aurait deux fréquences et donc deux périodes différentes.

Forces engendrées par la marche d'un piéton

Durant la marche, chaque pied, lors de son contact avec le plancher, engendre une force à trois composantes. Dans ce qui suit, les indices V , N et T indiquent respectivement les directions verticale, normale et tangente au mouvement du piéton, les indices d et g indiquent respectivement les jambes droites et gauches :

$$\underline{F}_{pd} = \begin{bmatrix} F_{Td}(t) \\ F_{Nd}(t) \\ F_{Vd}(t) \end{bmatrix} \quad \underline{F}_{pg} = \begin{bmatrix} F_{Tg}(t) \\ F_{Ng}(t) \\ F_{Vg}(t) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

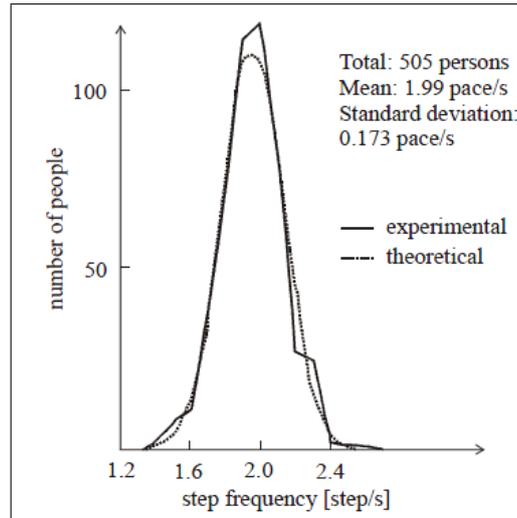


FIGURE 1.12 – Distribution normale de la fréquence d’après Matsumoto et al. [11].

La force \underline{F}_p engendrée par un piéton n’est autre que la somme des forces engendrées par chacune des jambes :

$$\underline{F}_p = \underline{F}_{pd} + \underline{F}_{pg} = \begin{bmatrix} F_{Td}(t) + F_{Tg}(t) \\ F_{Nd}(t) + F_{Ng}(t) \\ F_{Vd}(t) + F_{Vg}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_T(t) \\ F_N(t) \\ F_V(t) \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

La force verticale : La force verticale est toujours dirigée vers le plancher, elle a donc un signe constant, que ce soit pour la jambe droite (F_{Vd}) ou la jambe gauche (F_{Vg}), qui est le même pour les deux jambes. La force verticale totale F_V a donc elle aussi le même signe, et elle a pour amplitude moyenne le poids du piéton (750 N à 800 N en moyenne) et varie de ± 250 N [70]. Durant un pas, la jambe qui est en contact avec le plancher engendre une force verticale dont le graphe est en “selle de cheval” et présente deux extrema [12, 65, 71–76], (Figure 1.13.a). La première partie de ce graphe s’apparente à un quart de sinus qui est dû au choc du talon sur le plancher et la dernière partie à un quart de sinus dû à la force provoquée par la pointe pour pouvoir lancer la jambe en avant. La force verticale totale $F_V(t)$ est représentée dans la Figure 1.14.a. Comme on peut le voir, si on suppose que les forces verticales engendrées par les deux jambes sont égales (même direction, même sens et même amplitude), la force verticale totale $F_V(t)$ peut être considérée comme périodique, de période égale à la durée d’un pas donc à la période de la marche.

La force normale au mouvement du piéton : La force normale a des sens opposés pour chacune des jambes : durant un pas où la jambe gauche est en contact avec le plancher, elle est dans un premier temps dirigée vers la droite puis vers la gauche ; c’est l’inverse dans le cas de la jambe droite. L’amplitude de cette force varie entre -35 N et $+35$ N d’après [77], et de -25 N à $+25$ N d’après [70, 78] (Figure 1.13.b). Les variations de la force normale totale $F_N(t)$ (Figure 1.14.b) permettent d’identifier les phases de contact simultanée et les phases de contact d’une seule jambe. Cette identification est basée sur les maxima et minima de la force ; i.e. le passage de l’accélération à la décélération, puis le retour à l’accélération, détermine le début et la fin de la phase de contact des deux jambes. Comme la force engendrée par une jambe est dans le sens contraire à celle engendrée par l’autre, la

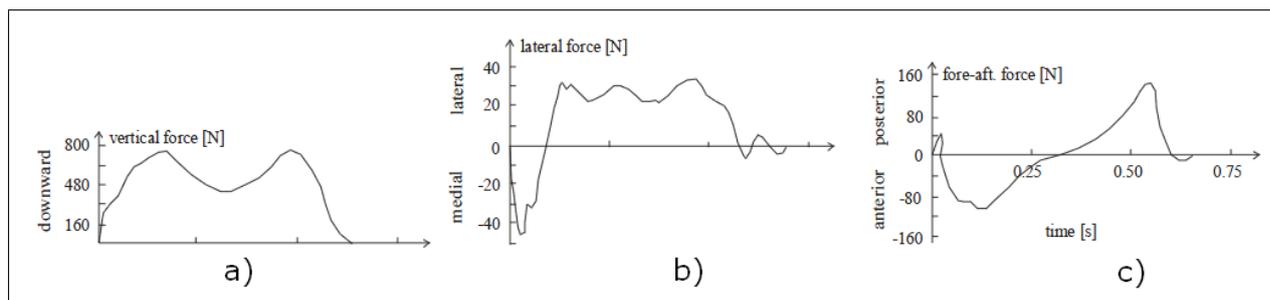


FIGURE 1.13 – Courbes typiques de la force pour la marche d'après [12] : (a) composante verticale, (b) composante normale à la direction de mouvement du piéton, (c) composante tangentielle à la direction de mouvement du piéton.

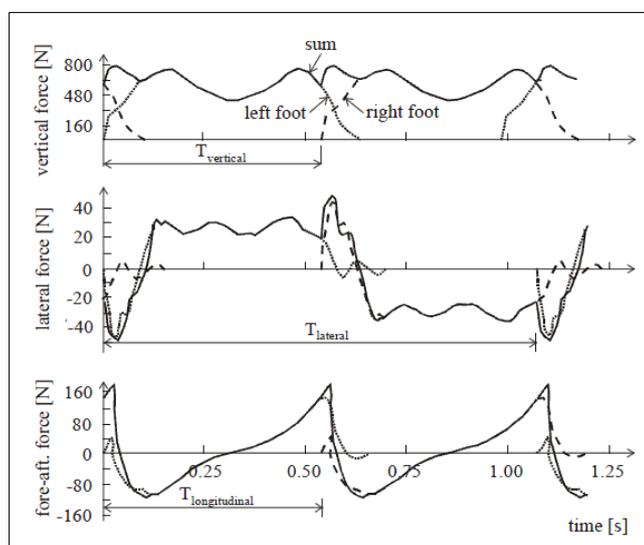


FIGURE 1.14 – Marche périodique d'après [13] : (a) composante verticale, (b) composante normale à la direction de mouvement du piéton, (c) composante tangentielle à la direction de mouvement du piéton.

force normale totale a une période qui correspond à la durée de deux pas. Elle a donc pour valeur le double de la période de la force verticale, entraînant une fréquence de moitié [79].

La force tangente au mouvement du piéton : Comme la force verticale, la force tangente au mouvement du piéton est supposée être la même pour les deux jambes. En considérant la force d'une seule jambe (Figure 1.13.c), on remarque que la première partie de la force est dirigée vers l'arrière (force négative), ce qui correspond au choc du talon, et la dernière partie est dirigée vers l'avant (force positive), ce qui correspond au choc de la pointe. En général, la force tangente totale (Figure 1.14.c) est considérée comme étant périodique de période égale à la durée d'un pas. Elle a donc la même période et la même fréquence que la force verticale.

L'hypothèse selon laquelle les forces engendrées par les deux jambes sont identiques est controversée : des mesures faites par Sahnaci et Kasperer [69] montrent que les paramètres de la force ne sont pas les mêmes pour les deux jambes. En effet, l'une des deux jambes,

qualifiée comme étant la jambe “forte”, a une longueur de pas supérieure à celle de l’autre, la jambe “faible” ; la différence entre les deux étant parfois supérieure à 5 %. La fréquence des pas n’est pas la même pour les deux jambes, l’une ayant une fréquence supérieure à l’autre. Des études probabilistes prennent en compte le fait qu’une personne ne peut pas répéter exactement les mêmes forces (en fonction du temps) au cours de différentes expériences. La force d’une seule personne est considérée périodique, mais le caractère aléatoire peut être pris en compte en considérant des fonctions de distribution du poids, de la fréquence, etc. [13].

Relations entre les différents paramètres

Des études ont montré que l’augmentation de la fréquence de marche entraîne l’augmentation de la vitesse de marche [14,80], qui à son tour entraîne une augmentation de la longueur du pas ainsi que des maxima d’amplitudes de toutes les composantes de la force engendrée par un piéton [12,14,74,80]. De plus, l’augmentation de la fréquence entraîne une diminution du temps de contact d’un pied avec le plancher. Ces relations sont illustrées dans la figure 1.15 [80] et sont valables non seulement pour la marche mais aussi pour la course.

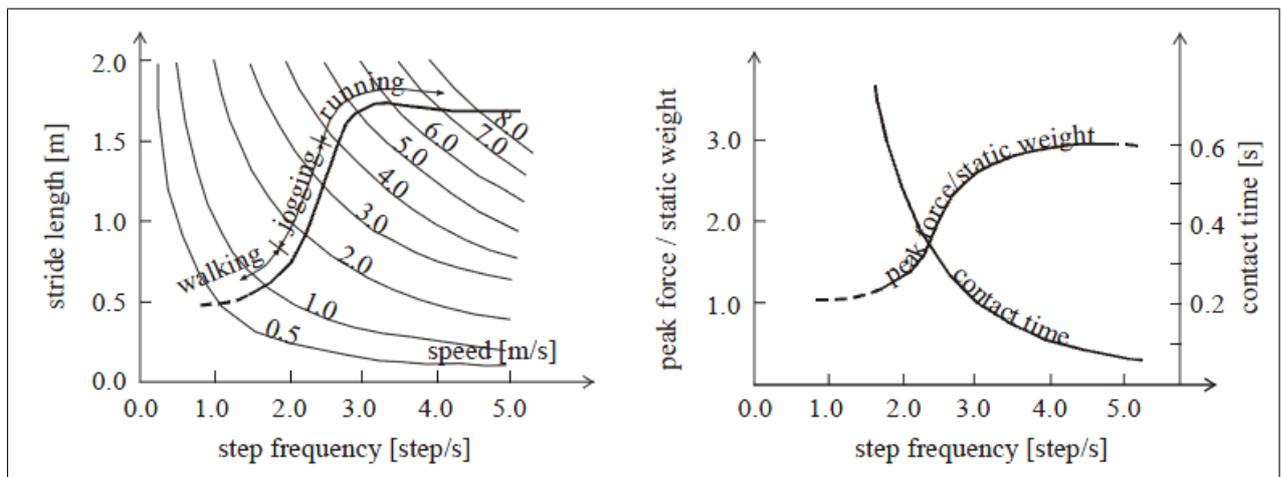


FIGURE 1.15 – Relation entre la longueur du pas, la vitesse, la force maximale et le temps de contact pour différentes fréquences de mouvement d’après [14].

Autres mouvements

Des mouvements de piétons autres que la marche existent : la course, le saut, le balancement et le rebondissement. Sans entrer dans les détails, les principales caractéristiques de ces mouvements sont présentées.

La course : Contrairement à la marche, la force engendrée par une jambe durant un pas de course présente un seul maximum [74]. Durant une course, les périodes de contact d’une seule jambe sont séparées par des périodes sans contact où la force induite est supposée nulle. La force engendrée par ce mouvement peut aussi être supposée périodique, et la fréquence fondamentale de la force verticale est dans la bande fréquentielle 1.8 – 3.4 Hz [68].

Le saut : Durant le saut, on trouve aussi des périodes de temps avec contact et des périodes sans contact. Le maximum de la force verticale est égal à plusieurs fois le poids de la personne. De plus, des études ont montré que les forces horizontales dues aux sauts verticaux existent aussi, mais la composante tangentielle au mouvement du piéton reste plus importante que la composante normale. De même que les autres forces, la force engendrée par le saut peut être supposée périodique. La fréquence fondamentale de la force verticale est dans la bande fréquentielle $2 - 3.5 \text{ Hz}$ [68].

Le balancement : Le balancement peut être défini comme étant le fait de basculer son poids d'une jambe à l'autre tout en restant sur place et sans décoller les pieds du plancher. La force engendrée par le balancement est aussi supposée périodique. La fréquence fondamentale de la force verticale appartient à l'intervalle $0.4 - 0.7 \text{ Hz}$ [68].

Le rebondissement : Rebondir c'est faire un ou plusieurs bonds en touchant à chaque fois un corps solide. La force engendrée par ce mouvement peut être supposée périodique et la fréquence fondamentale de la force verticale appartient à l'intervalle $1.5 - 3 \text{ Hz}$ [68].

1.3.2 Modélisation du piéton

Le corps humain est un système mécanique très complexe, composé de plusieurs parties en interaction réciproque. Il peut être modélisé suivant le degré de raffinement souhaité et les objectifs à atteindre. Les différents modèles de la littérature peuvent se classer en trois catégories de modélisation selon leur degré de complexité.

1ère catégorie : Modèles complexes dans lesquels chaque partie du squelette du corps humain est représentée par un corps rigide connecté aux autres par des ressorts et amortisseurs et avec des couples qui imposent le mouvement relatif entre les corps rigides de façon à reproduire l'action de la marche. La figure 1.16 est un exemple de description de deux modèles [15, 16], inspirés de [81]. Ce type de modélisation est généralement utilisé en robotique.

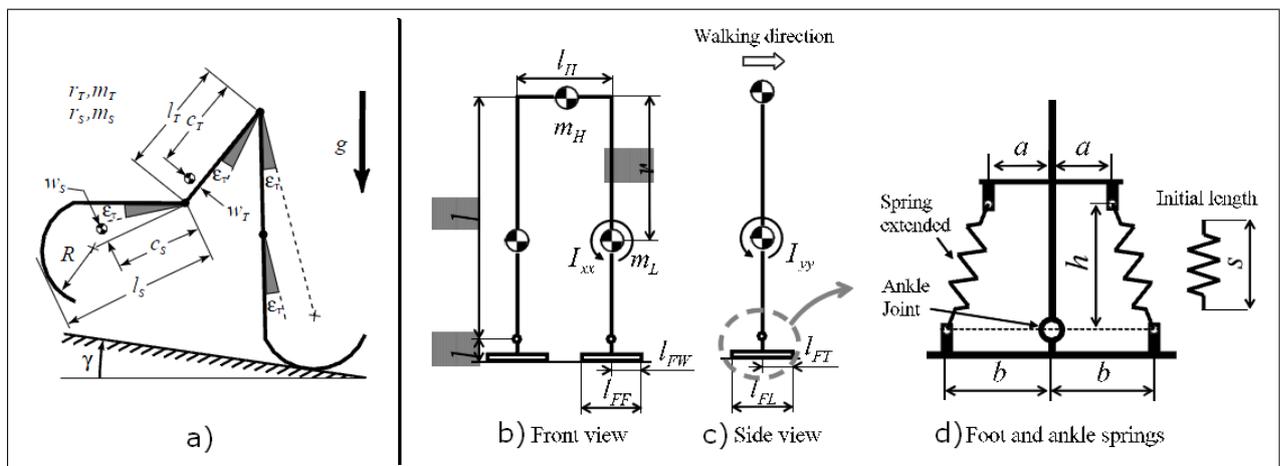


FIGURE 1.16 – Deux représentations du corps humain : (a) représentation du modèle de marche 2D de McGeer [15], (b,c,d) représentation du modèle de marche 3D [16].

2ème catégorie : Modèles dans lesquels le corps humain est schématisé comme un ensemble de masses, ressorts et amortisseurs, et chaque partie du modèle représente grossièrement une certaine partie du corps dans le but de reproduire la force d'impact d'un pied sur le sol pendant un pas [17, 18, 82]. La figure 1.17 montre deux représentations du piéton. Ces schémas ne prévoient pas de force motrice et ils ne peuvent donc pas représenter la marche. Cependant, ils permettent de reproduire correctement la force verticale d'impact d'un pied sur le sol pendant un pas. Dans la seconde représentation [18], l'influence de la raideur du sol sur la force d'impact du pied est prise en compte.

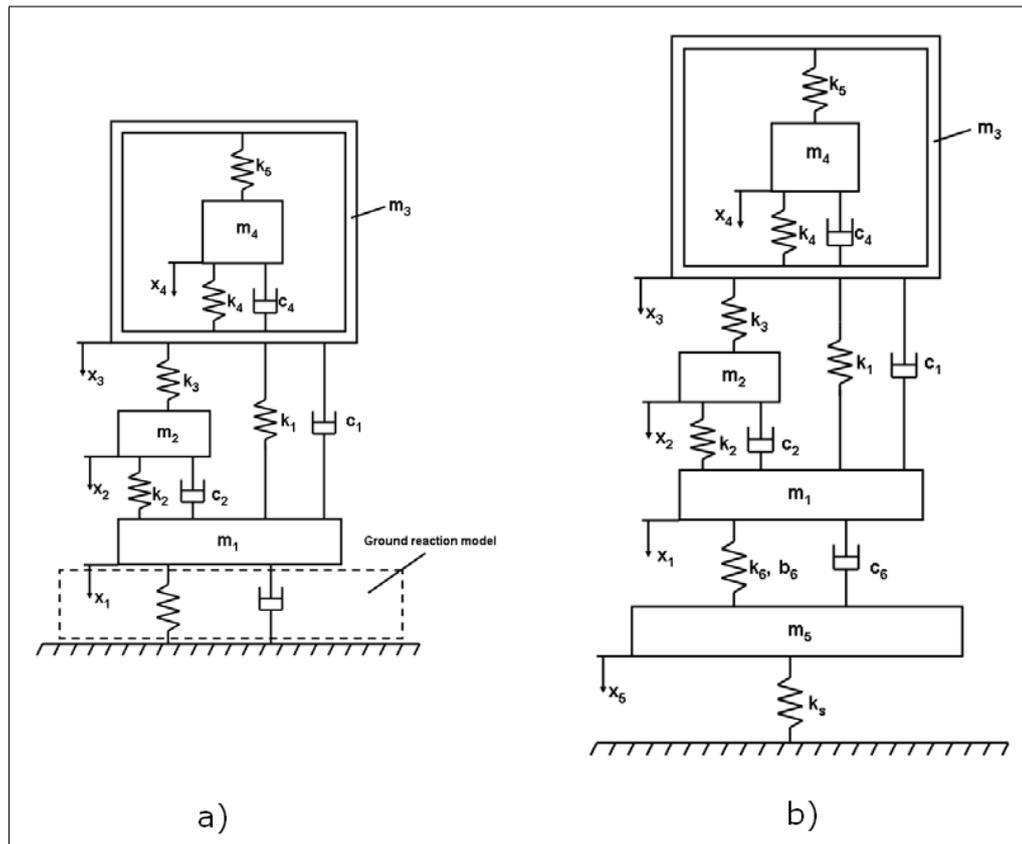


FIGURE 1.17 – Représentation du piéton : (a) [17], (b) [18].

3ème catégorie : Le corps humain est simplement représenté par une seule masse en interaction avec le sol. C'est l'expression de la force échangée entre l'individu et le sol qui permet de différencier les modèles. La figure 1.18 est un exemple de représentation du piéton [19].

Dans la situation qui nous intéresse pour cette thèse, i.e. la formulation d'un modèle de piéton pour représenter correctement le chargement dynamique de la foule sur une structure vibrante, nous sommes obligés de trouver un bon compromis entre l'exigence de simplicité du modèle du piéton, car il y en aura des centaines sur une passerelle, et l'exigence de représenter correctement un phénomène complexe comme la synchronisation entre piéton et structure. Cette 3ème catégorie de représentation du piéton est celle qui nous intéresse.

La modélisation de la force induite par un piéton est assez compliquée et ceci pour plusieurs raisons [13] :

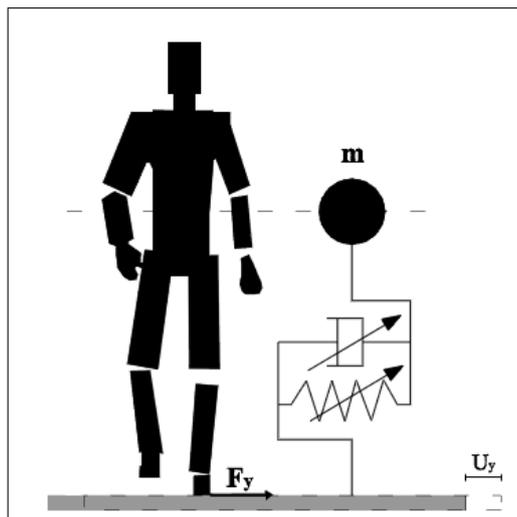


FIGURE 1.18 – Schéma simplifié de l'oscillateur qui représente le comportement dynamique latéral du piéton [19].

1. La force dépend de plusieurs paramètres, tels que le poids de la personne, la fréquence du mouvement, etc.
2. La force dynamique générée par un piéton est un processus à bande étroite assez difficile à modéliser et pas encore bien compris.
3. L'influence du nombre de personnes et leur degré de synchronisation/corrélation sont difficiles à généraliser.

D'après certains auteurs [13,25], la force est différente suivant que les vibrations sont perceptibles ou non. Cependant, des études réalisées par l'Association Française de Génie Civil [77] ont montré que l'amplitude de la force engendrée par un piéton est sensiblement la même que le plancher soit rigide ou souple. Par contre, lorsqu'un piéton perçoit les oscillations du plancher, il a tendance à adapter sa fréquence sur celles des oscillations de la structure. C'est donc la fréquence de la force qui varie et non son amplitude. Dans la littérature, on trouve deux types d'approches : la première consiste à modéliser la force d'un seul piéton, et la deuxième celle d'une foule ou d'un groupe de piétons. De plus, à l'intérieur de ces catégories, on rencontre des modèles temporels ou fréquentiels. Dans tous les cas, on distingue une approche déterministe qui propose un modèle général pour chaque type de mouvement, ou une approche probabiliste qui prend en compte le caractère aléatoire de certains paramètres qui influencent la force, tels que le poids, la fréquence du mouvement, etc. La plupart des études réalisées supposent que les deux jambes produisent la même force et que celle-ci est périodique [13]. La force totale engendrée est alors reconstruite à partir des mesures faites pour un pas comme dans la figure 1.14 [83]. Dans ce qui suit, on présente les modélisations proposées dans la littérature pour la force induite par une seule personne sur un plancher rigide.

La force verticale

En adoptant l'hypothèse selon laquelle les deux jambes engendrent la même force, et que ces forces sont périodiques, on peut supposer que la force verticale totale F_V engendrée par un piéton est périodique comme nous l'avons vu dans la section 1.3.1. De ce fait, on peut

Auteurs	a_i	ϕ_i	Commentaires
Blanchard et al. [65]	$a_1 = 0.257$		le DLF est plus faible pour des fréquences de 4 à 5 Hz
Bachmann et Ammann [68]	$a_1 = 0.4 - 0.5$ $a_2 = a_3 = 0.1$		fréquences entre 2 et 2.4 Hz fréquences autour de 2 Hz
Schulze (d'après [68])	$a_1 = 0.37, a_2 = 0.10$ $a_3 = 0.12, a_4 = 0.04$ $a_5 = 0.08$		A 2 Hz
Kerr [75]	$a_1 = a_2 = 0.07$ $a_3 \simeq 0.06$		a_1 dépend de la fréquence
Young [85]	$a_1 = 0.37(f - 0.95)$ ≤ 0.56 $a_2 = 0.054 + 0.0044f$ $a_3 = 0.026 + 0.0050f$ $a_4 = 0.04$		Valeurs moyennes
Seiler and Häuttner [86]	$a_1 = 0.4$ $a_2 = 0.15$ $a_3 = 0.1$ $a_4 = 0.05$	$\phi_1 = \frac{\pi}{2}$ $\phi_2 = -\frac{5\pi}{6}$ $\phi_3 = \frac{\pi}{2}$ $\phi_4 = -\frac{5\pi}{6}$	fréquences de l'ordre de 1.4 – 3.4 Hz

TABLE 1.3 – Les coefficients de Fourier pour la force verticale engendrée par la marche (DLFs).

développer F_V en série de Fourier jusqu'à un ordre n à préciser [13, 68] :

$$F_V(t) = P \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i \sin(2\pi i f_p t - \phi_i^0) \right) \quad (1.4)$$

où :

P est le poids de la personne (N).

i est le numéro de l'harmonique.

n est le nombre total d'harmoniques qui contribuent à la force.

$P a_i$ est le coefficient de Fourier du i -ème harmonique.

a_i est le facteur de chargement dynamique (DLF) du i -ème harmonique.

f_p est la fréquence de marche du piéton (Hz).

ϕ_i^0 est la phase du i -ème harmonique pour un développement en sinus. La valeur de ϕ_1^0 est arbitraire et peut être nulle par exemple.

Le nombre n d'harmoniques varie selon les auteurs de 1 à 5. Les valeurs proposées pour les a_i sont données dans le tableau 1.3. Kerr [75] a trouvé des valeurs expérimentales pour les a_i dispersées pour différents sujets et même pour un même sujet qui répète l'expérience [83, 84]. D'autre part, les valeurs des phases ϕ_i varient beaucoup pour les harmoniques $i \geq 2$ [68], ce qui montre le caractère aléatoire du chargement dû à la marche [83].

La force normale au mouvement du piéton

De même que pour la force verticale, la force normale peut aussi être considérée comme périodique. Elle est donc développable en série de Fourier :

$$F_N(t) = P \sum_{i=1}^n a_i \sin(2\pi i f_N t - \phi_i^0) . \quad (1.5)$$

On rappelle que P est le poids du piéton et f_N la fréquence de la force normale au mouvement du piéton qui est égale à la moitié de celle de la marche. Les valeurs des a_i sont données dans le tableau 1.4. Eriksson [87] a étudié les basses fréquences du spectre ($< 6 \text{ Hz}$), et a trouvé

Auteurs	DLFs pour les harmoniques considérés	Commentaires
Schulze (d'après [68])	$a_1 = 0.039, a_2 = 0.01$ $a_3 = 0.043, a_4 = 0.012$ $a_5 = 0.015$	fréquences de l'ordre de 2 Hz
Pizzimenti et Ricciardelli [25]	$a_1 = 0.04, a_2 = 0.008$ $a_3 = 0.023, a_4 = 0.005$ $a_5 = 0.011$	fréquences de l'ordre de $0.6 - 1.1 \text{ Hz}$ fréquences de l'ordre de $1.2 - 2.2 \text{ Hz}$ fréquences de l'ordre de $1.8 - 3.3 \text{ Hz}$ fréquences de l'ordre de $2.4 - 4.4 \text{ Hz}$ fréquences de l'ordre de $3.0 - 5.5 \text{ Hz}$

TABLE 1.4 – Les coefficients de Fourier pour la force normale engendrée par la marche (DLFs).

que la marche n'est pas parfaitement périodique, et donc ne peut pas être décrite en utilisant les DLFs comme dans les modèles précédents. En effet, comme les signaux de la force latérale mesurés ne sont pas périodiques, on ne peut pas les développer en série de Fourier, mais on peut obtenir leur spectre de Fourier et en déduire des DLFs "fictifs". Or, dans le spectre, on observe un "étalement" autour de la fréquence d'excitation : au lieu d'avoir un seul pic au niveau de cette fréquence, il y en a plusieurs. Ainsi, le DLF correspondant à cette fréquence, doit être calculé en tenant compte de cet étalement dans une bande de fréquences donnée entourant la fréquence centrale d'excitation. Pour cela, Eriksson [87] a supposé que le DLF n'est autre que la somme des pics dans une bande de fréquences centrée sur la fréquence f_N de la force latérale à étudier (i.e qui correspond au premier harmonique) et ayant pour largeur :

$$f \in \left[\frac{f_N}{2}, \frac{3f_N}{2} \right] \quad (1.6)$$

Cependant, d'après [25], sur plancher mobile tel que sur une passerelle, en prenant une telle bande de fréquences, on risque de surestimer la réponse vibratoire de la passerelle (transitoire dans le cas d'un plancher rigide). Ceci est expliqué en se basant sur le cas d'un système faiblement amorti, où l'amortissement intervient uniquement dans une bande de fréquences étroite autour de la fréquence de résonance. Ainsi, si dans le calcul des DLFs on prend en compte des composantes qui n'appartiennent pas à cet intervalle, on risque de surestimer la réponse vibratoire de la passerelle. C'est pourquoi, Pizzimenti et Ricciardelli [25] ont

préféré prendre pour chaque harmonique, une largeur de bande de fréquences qui dépend de l'amortissement ξ . Ainsi, pour le j -ème harmonique, la largeur de bande est :

$$\Delta f_j = j\pi\xi f_N \quad (1.7)$$

On remarque d'après les résultats obtenus (tableau 1.4) que l'excitation due aux harmoniques pairs est inférieure à celle due aux harmoniques impairs.

	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$
A_j	0.96	0.73	0.879	0.55	0.74
B_j	0.0616	0.039	0.0288	0.037	0.025
$(\check{F}_{Nj}^2/\check{F}_N^2)$	0.81	0.050	0.277	0.047	0.072

TABLE 1.5 – Valeurs de A_j , B_j et $(\check{F}_{Nj}^2/\check{F}_N^2)$ d'après [25].

Mais d'après ces derniers auteurs, qui ont étudié aussi les forces normales des piétons sur les planchers rigides, un modèle probabiliste serait mieux adapté au caractère aléatoire de la marche. Une approche statistique leur a montré que la force normale $F_N(t)$ peut être considérée comme étant un processus aléatoire de moyenne nulle, caractérisé dans le domaine fréquentiel par son spectre de densité de puissance S_{F_N} (PSD, Power Spectral Density). Une régression linéaire sur des données expérimentales montre que la variance du processus est donnée par :

$$\text{var}(F_N) = E[F_N^2(t)] - (E[F_N(t)])^2 = (0.034P)^2 \quad (1.8)$$

où E désigne l'espérance. De plus, les PSDs des cinq premiers harmoniques vérifient l'expression gaussienne :

$$\frac{S_{F_N}(f) \cdot f}{\check{F}_{Nj}^2} = \frac{2A_j}{\sqrt{2\pi} \cdot B_j} \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{f/jf_N - 1}{B_j} \right)^2 \right] \quad (1.9)$$

où j est le numéro de l'harmonique considéré, \check{F}_{Nj}^2 est l'aire du PSD autour du j -ème harmonique, A_j est un paramètre de normalisation du PSD et B_j est un paramètre de la largeur de bande. Les valeurs des différents paramètres sont données dans le tableau 1.5.

Erlicher et al. [88] ont proposé un oscillateur auto-entretenu à un degré de liberté capable de prédire avec précision la force normale au mouvement du piéton générée par le piéton sur sol rigide. L'expression de cette force est :

$$F_N = -2m\mu\omega_0\dot{u}_N(t) \left(1 - \beta u_N^2(t) - \frac{\gamma}{\omega_0} \dot{u}_N(t) u_N(t) - \frac{\delta}{\omega_0^2} \dot{u}_N^2(t) \right) + \omega_0^2 u_N(t) \quad (1.10)$$

F_N a une forme polynomiale d'ordre trois, avec cinq termes et cinq paramètres à identifier. Il s'agit d'un modèle de Van der Pol modifié par l'introduction des termes proportionnels à γ et δ . Lorsque $\mu > 0$ (et c'est le cas considéré ici), l'équation (1.10) définit la force de rappel d'un oscillateur auto-entretenu (self-sustained oscillator). Le caractère auto-entretenu est du à la présence simultanée d'un terme linéaire d'amortissement négatif (source d'énergie) et d'un terme non linéaire d'amortissement positif (dissipation). Les oscillateurs auto-entretenus forcés peuvent présenter un comportement appelé "frequency entrainment", c'est-à-dire permettant la synchronisation de la fréquence de l'oscillateur avec celle de l'excitation extérieure.

La force tangente au mouvement du piéton

De même que pour les forces verticale et normale, la force tangente peut être considérée comme périodique. Elle est donc développable en série de Fourier :

$$F_T(t) = P \sum_{i=1}^n a_i \sin(2\pi i f_T t - \phi_i^0) \quad (1.11)$$

On rappelle que P est le poids du piéton et f_T la fréquence de la force tangente au mouvement du piéton qui est égale à celle de la marche. Les valeurs des a_i sont données dans le tableau 1.6.

Auteurs	DLFs pour les harmoniques considérés	Commentaires
Schulze (d'après [68])	$a_{1/2} = 0.037$, $a_1 = 0.204$ $a_{3/2} = 0.026$, $a_2 = 0.083$ $a_{5/2} = 0.024$	fréquences de l'ordre de $2 Hz$
Blanchard et al. [65]	$a_{1/2} = 0.1$ $a_1 = 0.2$ $a_2 = 0.1$	fréquences de l'ordre de $2 Hz$

TABLE 1.6 – Les coefficients de Fourier pour la force tangente engendrée par la marche (DLFs).

1.4 La synchronisation

Dans cette section, nous expliquons le phénomène de synchronisation [31, 89]. Nous introduisons tout d'abord des oscillateurs particuliers nécessaires pour que la synchronisation ait lieu : les oscillateurs auto-entretenus. Ensuite, nous définissons qualitativement ce phénomène tout en précisant les situations que l'on peut confondre avec une synchronisation mais qui ne le sont pas. Par la suite, on cite les différents types de synchronisation possibles. Puis on explique un cas particulier où un oscillateur auto-entretenu est soumis à l'action d'une force extérieure.

1.4.1 L'oscillateur auto-entretenu et ses propriétés

Définition d'un oscillateur auto-entretenu

Afin de bien définir le phénomène de synchronisation, il convient de commencer par présenter des oscillateurs particuliers qu'on appelle oscillateurs auto-entretenus :

- Un oscillateur auto-entretenu est un système actif. Il contient une source interne d'énergie qui génère son mouvement oscillatoire. Lorsque l'oscillateur est isolé, ses oscillations continuent au même rythme jusqu'à l'épuisement de la source d'énergie et son comportement ne dépend pas explicitement du temps. On dit alors que c'est un système dynamique autonome.

- Les caractéristiques des oscillations (amplitude, fréquence) sont déterminées par les paramètres internes de l'oscillateur et ne dépendent ni de la façon dont elles ont été déclenchées, ni de la réponse transitoire de l'oscillateur après leur déclenchement.
- Les oscillations sont stables aux perturbations relativement faibles : si une action extérieure à l'oscillateur vient perturber ses oscillations, après la perturbation, les oscillations reprennent leur forme initiale.

Par exemple, une horloge à pendule est un oscillateur auto-entretenu. L'énergie potentielle du poids suspendu est transformée en mouvement oscillatoire du pendule. Cette oscillation est transférée en une rotation des aiguilles de l'horloge. Le mécanisme prend donc l'énergie de la source et maintient une oscillation stable du pendule jusqu'à l'épuisement de la source d'énergie. Ces oscillations sont entièrement déterminées par les paramètres internes de l'horloge et ne dépendent pas de la façon dont le pendule a été mis en mouvement. De plus, elles ne sont pas influencées par les perturbations faibles ; en effet si une impulsion extérieure perturbe le mouvement du pendule, les oscillations reprennent leur rythme initial après avoir traversé une période transitoire.

Caractérisation d'un rythme : période et fréquence

Le mouvement d'un oscillateur auto-entretenu est périodique, et sa caractéristique principale est sa période T . On caractérise le rythme des oscillations par leur fréquence cyclique :

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \quad (1.12)$$

La pulsation ou fréquence angulaire est donnée par :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (1.13)$$

On verra par la suite que la fréquence ou la pulsation d'un oscillateur peut être modifiée à cause d'une action extérieure sur l'oscillateur ou à cause de son interaction avec un autre oscillateur. La fréquence et la pulsation d'un oscillateur, lorsqu'il est autonome (non soumis à une action extérieure), sont appelées fréquence et pulsation naturelle, propre, ou libre.

Image géométrique d'oscillateurs auto-entretenus périodiques : cycle limite

Un oscillateur auto-entretenu génère un processus périodique $x(t)$. $x(t)$ seul ne permet pas de décrire l'état de l'oscillateur à un instant donné puisqu'a priori, on ne sait pas dans quel sens $x(t)$ varie. D'où l'intérêt d'introduire une deuxième variable $y(t)$. Dans le cas d'un pendule par exemple, $x(t)$ est l'angle qu'il forme avec la verticale, et $y(t) = \dot{x}(t)$ est sa vitesse angulaire. L'évolution du couple $(x(t), y(t))$ décrit le comportement du pendule et $x(t)$ et $y(t)$ sont appelés les coordonnées dans l'espace des phases.

Soit $G(x(t), y(t))$ la courbe représentant $y(t)$ en fonction de $x(t)$. Un point de la courbe $G(x(t), y(t))$ est appelé point de phase. Dans le cas d'oscillations périodiques, $G(x(t), y(t))$ est une courbe fermée appelée cycle limite C_l : il est déterminé par les paramètres internes de l'oscillateur. Le cycle limite "attire" les trajectoires qui sont dans son voisinage. En effet, si un point de $G(x(t), y(t))$ est au voisinage de C_l , cela revient à dire que le mouvement périodique de l'oscillateur a été faiblement perturbé. Or l'oscillateur étant auto-entretenu, il retrouve son rythme initial après une période transitoire. Ceci se traduit dans le plan de phases par la convergence de la courbe $G(x(t), y(t))$ vers le cycle limite. Dans le cas particulier où le

processus périodique est un sinus, l'oscillateur est dit quasi-linéaire ou quasi-harmonique et le cycle limite est un cercle.

Phase : définition et propriétés

Amplitude stable, phase libre : On considère un oscillateur quasi-linéaire. Le processus $x(t)$ qu'il engendre s'écrit sous la forme :

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \phi_0) \quad (1.14)$$

où :

$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0}$: fréquence angulaire ou pulsation ;

T_0 : période des pulsations ;

$f_0 = \frac{1}{T_0}$: fréquence (cyclique) des oscillations ;

A : amplitude des oscillations ;

$\phi = \omega_0 t + \phi_0$: phase totale des oscillations.

La phase totale n'est pas bornée, mais on peut la ramener à l'intervalle $[0, 2\pi[$ grâce à la périodicité de la fonction sinus. ϕ_0 est la phase initiale, elle correspond à la réponse transitoire de l'oscillateur lorsqu'il a été mis en mouvement. Dans le cas où on ne s'intéresse qu'au régime stationnaire, ϕ_0 ne joue aucun rôle et peut donc être modifiée en changeant l'instant initial. Dans le plan de phase, le cycle limite d'un oscillateur quasi-linéaire est représenté par un cercle de rayon A . Le point de phase se déplace sur ce cercle avec une vitesse angulaire ω_0 , et la droite qui le relie au centre du cercle, forme avec l'axe des abscisses un angle égal à $\phi(t)$ (Figure 1.19.a). T_0 est le temps nécessaire pour que le point de phase réalise un tour complet. Les coordonnées polaires du point de phase sont $(A, \phi(t))$.

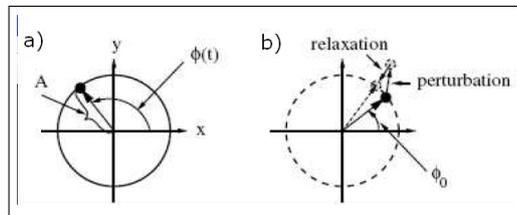


FIGURE 1.19 – (a) Cycle limite dans le plan de phases (repère fixe), (b) stabilité d'un point de phase sur le cycle limite (repère tournant).

Stabilité d'un point de phase sur le cycle limite : que se passe-t-il si on perturbe légèrement les oscillations d'un oscillateur auto-entretenu ? Pour mieux illustrer cette partie, on se place dans un repère qui effectue une rotation avec une vitesse angulaire ω_0 . Les coordonnées du point de phase dans le nouveau repère sont donc $(A, \phi(t) - \omega_0 t)$. Dans le régime stationnaire, les coordonnées seront donc (A, ϕ_0) et le point de phase est fixe. Une perturbation consiste alors à déplacer le point de phase en dehors du cycle limite (Figure 1.19.b) :

- Si l'amplitude est perturbée, celle-ci revient à sa valeur initiale A .
- Si la phase est perturbée, elle garde sa nouvelle valeur : en effet, comme toutes les valeurs initiales sont équivalentes, cela revient à changer ϕ_0 en ϕ_1 . La phase conserve alors cette nouvelle valeur jusqu'à ce qu'une nouvelle perturbation ait lieu.

Dans le cas général d'un oscillateur ayant une période T_0 , la phase est donnée par

$$\phi(t) = \phi_0 + 2\pi \frac{t - t_0}{T_0} \quad (1.15)$$

où t_0 est un instant initial arbitraire. L'amplitude est la variable qui caractérise la déviation transversale par rapport au cycle limite.

Propriétés d'un oscillateur auto-entretenu : dissipation, stabilité et non-linéarité

Nous exposons dans cette partie les principales propriétés d'un oscillateur auto-entretenu.

Dissipation : les systèmes macroscopiques naturels dissipent leur énergie. A moins qu'ils soient constamment alimentés en énergie, leurs oscillations diminuent jusqu'à s'arrêter. Un oscillateur auto-entretenu doit donc posséder une source d'énergie interne.

Stabilité : la stabilité des oscillateurs auto-entretenus permet de les différencier des oscillateurs conservatifs. En effet, un oscillateur conservatif a un mouvement périodique, mais ne dissipe pas de l'énergie ni n'en gagne. Dans le plan des phases, les oscillations sont représentées par un ensemble de courbes fermées (Figure 1.20). Ainsi, si le système subit une perturbation, celle-ci persiste et donc la valeur de l'énergie perturbée est conservée ; le système n'oublie donc pas ses conditions initiales. Par conséquent, les oscillations dépendent de la manière dont elles ont été déclenchées, ce qui n'est pas le cas d'un oscillateur auto-entretenu.

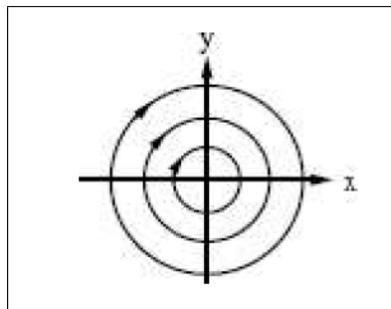


FIGURE 1.20 – Oscillateur conservatif.

Non-linéarité : la non-linéarité est essentielle dans le maintien d'un cycle limite stable d'oscillations. La stabilité équivaut à dire que le mouvement périodique existe uniquement avec une amplitude donnée. Les équations qui régissent le mouvement des oscillateurs linéaires sont évidemment linéaires. Ainsi, si $x(t)$ est une solution périodique de ces équations, pour tout facteur a , $ax(t)$ est aussi une solution périodique ce qui est contraire à la définition de la stabilité. D'où la nécessité de la non-linéarité pour le maintien de la stabilité.

Physiquement parlant, les oscillations stables expriment le fait que quelque soit le mécanisme de dissipation et d'alimentation en énergie, l'énergie de la source est transformée en mouvement oscillatoire : la quantité d'énergie dissipée E_d compense exactement la quantité d'énergie E_a fournie à l'oscillateur. En traçant E_d et E_a sur un cycle en fonction de l'amplitude des oscillations (Figure 1.21), l'amplitude des oscillations stationnaires est donnée par l'intersection de ces deux courbes. Ces courbes peuvent passer par l'origine et avoir une telle

intersection uniquement dans le cas d'un système non-linéaire (i.e. décrit par des équations différentielles non linéaires).

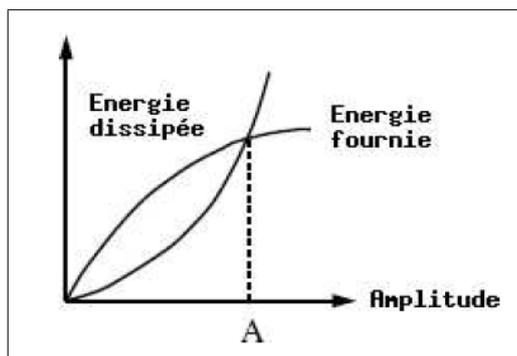


FIGURE 1.21 – Système dissipatif.

Systèmes auto-entretenus et systèmes forcés : la phase d'un système forcé n'est pas libre. Que le système soit autonome (auto-entretenu) ou forcé (son mouvement est dû à une force extérieure qui lui est appliquée), le mouvement du point de phase forme une courbe fermée qui attire les courbes de son voisinage. La différence essentielle entre un système autonome et un système forcé est que dans le cas d'un système forcé, la phase n'est pas libre et elle est en relation avec la force extérieure appliquée au système. Un oscillateur auto-entretenu peut donc se synchroniser alors qu'un système forcé ne le peut pas. Cette différence peut être mise en évidence lorsque l'on applique une perturbation au système. Dans chacun des cas, on considère 4 états différents de perturbations. Dans la figure 1.22 on représente le plan de phase pour chacun des oscillateurs. Chaque état perturbé est représenté par un point entouré d'un cercle vide dans la figure. Les 4 points correspondant à ces 4 états vont revenir vers le cycle limite, mais dans le cas du système forcé (Figure 1.22.b) ces points vont converger vers le même point, alors que pour le système auto-entretenu (Figure 1.22.a) on retrouvera 4 points distincts. Ceci s'explique par le fait que le système auto-entretenu a la mémoire de sa valeur perturbée, alors que le système forcé retrouve une certaine valeur imposée par la force extérieure et ne dépend pas de l'état initial.

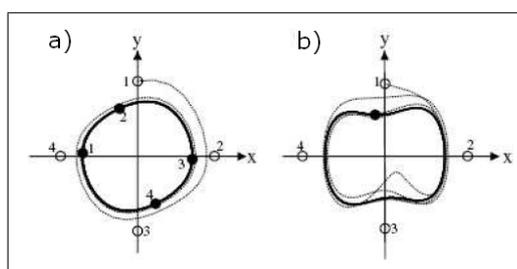


FIGURE 1.22 – Systèmes dissipatifs : (a) auto-entretenu, et (b) forcé.

1.4.2 Définition de la synchronisation

On désigne par synchronisation un ajustement des rythmes d'oscillations d'objets, dû à leur faible interaction entre eux. Pour expliquer qualitativement ce concept, on définit ce

qu'est une interaction entre objets oscillants et ce qu'on entend par ajustement de rythmes. Puis on présente des cas où la synchronisation n'a pas lieu mais où la situation prête à confusion, et enfin on présente les différents types de synchronisation.

Couplage d'objets oscillants

Supposons que l'on ait deux horloges. Même si les deux sont réalisées chez le même fabricant et sont supposées avoir les mêmes paramètres intérieurs, elles sont néanmoins différentes : en effet, à un instant donné, elle ne donnent pas exactement la même heure et leurs pendules ne sont pas à la même position. On suppose maintenant que ces deux horloges sont couplées ; elles sont posées sur une poutre non rigide. L'interaction entre elles se fait à travers les vibrations de leur support commun. Ces vibrations, même faibles modifient le rythme des oscillations des deux horloges.

Ajustement de rythme : blocage de fréquence et de phase

Les expériences montrent que même une faible interaction peut synchroniser deux oscillateurs. On considère deux oscillateurs ayant des pulsations propres f_1 et f_2 différentes quand ils sont isolés. Ils peuvent, s'ils sont couplés, et sous certaines conditions, osciller avec une même fréquence. Leur synchronisation ou leur non-synchronisation dépend des facteurs suivants :

1. La force du couplage : elle décrit si l'interaction est forte ou faible. Expérimentalement, il est souvent difficile de mesurer cette quantité. Dans l'exemple précédent, elle dépend de la souplesse du support. Si la poutre est absolument rigide, elle ne va pas être influencée par les oscillations du pendule, et l'interaction entre les deux horloges est inexistante. Par contre, si la poutre est souple, l'interaction peut avoir lieu.
2. La différence de fréquences $f_1 - f_2$: elle quantifie la différence entre les deux oscillateurs non couplés. Plus elles sont éloignées au départ, et plus il sera difficile que les oscillateurs se synchronisent. Etant couplés, deux oscillateurs ayant au départ des fréquences différentes et des phases indépendantes, ajustent leurs rythmes et commencent à osciller avec la même fréquence, ce qui implique une relation bien définie entre les phases des deux oscillateurs. On rappelle que la convergence vers cette fréquence commune dépend de $f_1 - f_2$.

Situations que l'on peut confondre avec une synchronisation

Il n'y a pas de synchronisation en l'absence d'oscillations de systèmes autonomes : Tout d'abord, il faut différencier le phénomène de synchronisation et le phénomène de résonance. On considère une poutre ayant une pulsation propre f_0 . On lui applique une force extérieure ayant une pulsation $f \neq f_0$. La poutre commence à osciller mais ces oscillations ne sont visibles que lorsque f est suffisamment proche de f_0 . Dans ce cas, on parle de résonance. Ce n'est pas un phénomène de synchronisation parce que la poutre n'oscillerait pas sans action extérieure, elle n'est donc pas un oscillateur auto-entretenu.

La variation synchronisée de deux variables n'implique pas nécessairement une synchronisation : Lorsque deux oscillateurs ne sont que des coordonnées différentes d'un même système, on ne parle pas de synchronisation. Par exemple le déplacement et la vitesse

du pendule d'une horloge ont une même fréquence et leur différence de phase est bien définie. Cependant on ne peut pas parler d'un phénomène de synchronisation car il n'y a pas de déplacement sans vitesse de déplacement et vice versa. L'absence de synchronisation dans ce cas est évidente mais ce n'est pas le cas dans des exemples plus complexes.

Un couplage très fort unifie le système et on ne peut plus supposer qu'il y a une synchronisation : Un couplage très fort entre deux oscillateurs impose des limitations très fortes au mouvement des deux systèmes. C'est comme si les deux systèmes avaient été unifiés pour ne former qu'un seul oscillateur. Ce phénomène ne peut donc pas être considéré comme étant une synchronisation. Par exemple si on relie les pendules de deux horloges par un lien rigide, ces pendules sont "obligés" d'avoir des mouvements identiques et on ne peut plus parler de synchronisation parce qu'on n'a plus qu'un seul système.

L'introduction du couplage ne doit pas changer qualitativement le comportement des systèmes qui interagissent entre eux et ne doit pas les priver de leur "individualité". En particulier, l'arrêt des oscillations d'un des systèmes ne doit pas provoquer l'arrêt des oscillations du second système.

Conclusion : Pour que l'on puisse qualifier un phénomène de synchronisation, il faut que :

- l'analyse porte sur le comportement d'au moins un oscillateur auto-entretenu, i.e. capable de générer son rythme propre ;
- les systèmes concernés ajustent leurs rythmes en réponse à un couplage faible ;
- l'ajustement des rythmes a lieu lorsque les fréquences des deux oscillateurs sont assez proches ; en particulier, si la fréquence des oscillations d'un des oscillateurs varie lentement, la fréquence des oscillations du deuxième oscillateur suit ces variations.

Les différents types de synchronisations

On peut distinguer plusieurs types de synchronisation. Dans ce paragraphe, on explique brièvement les types les plus fréquents.

Synchronisation mutuelle : quand deux oscillateurs s'influencent mutuellement et de manière égale, ils ajustent leurs rythmes mutuellement. On parle de synchronisation mutuelle. Un exemple simple reflétant ce cas est l'exemple des deux horloges à pendule posées sur une poutre. La poutre véhicule les oscillations d'une horloge à l'autre.

Ensemble d'oscillateurs : dans plusieurs cas, l'interaction ne se fait pas uniquement entre deux oscillateurs mais entre plusieurs oscillateurs. Si on prend l'exemple des lucioles, celles-ci constituent un ensemble d'oscillateurs mutuellement couplés qui peuvent s'illuminer de manière synchronisée. Les lucioles communiquent à travers leurs "flashes" lumineux. On parle de couplage global.

Synchronisation de phases et synchronisation complète d'oscillateurs chaotiques : les oscillateurs auto-entretenus peuvent générer des signaux chaotiques. Un couplage de ces oscillateurs peut aussi entraîner leur synchronisation. Dans le cas de signaux "presque périodiques", les cycles se ressemblent mais ont des amplitudes et des périodes différentes. Dans

ce cas, on peut calculer une fréquence moyenne sur un large intervalle de temps τ :

$$\langle f \rangle = \frac{N_\tau}{\tau} \quad (1.16)$$

où N_τ est le nombre de cycles effectués durant l'intervalle τ . Cette fréquence moyenne permet de décrire le comportement collectif de ce système chaotique interactif.

Dans le cas d'un couplage assez fort entre deux oscillateurs auto-entretenus "chaotiques", leurs fréquences moyennes deviennent égales, mais cela n'implique pas que les signaux engendrés coïncident aussi. Les couplages faibles n'influencent pas la nature chaotique des oscillateurs : les amplitudes conservent leur caractère irrégulier et restent non liées alors que les fréquences coïncident et on peut parler de différence de phase entre les oscillateurs. Ce phénomène est appelé synchronisation de phases de systèmes chaotiques.

Un couplage très fort influence non seulement les fréquences mais aussi les amplitudes. Dans ce cas, on parle de synchronisation complète.

Synchronisation par une force extérieure : un oscillateur peut aussi être influencé par une action extérieure qui lui est appliquée. Ainsi l'ajustement de l'horloge biologique et des rythmes saisonniers des systèmes vivants allant de la bactérie aux humains, est un phénomène de synchronisation appliqué par la nature. Dans les paragraphes suivants, on s'attarde sur ce type de synchronisation lorsque l'oscillateur est un oscillateur quasi-linéaire, i.e. lorsque le processus qu'il génère est sinusoïdal.

1.4.3 Synchronisation d'un oscillateur auto-entretenu par une force extérieure

Dans ce paragraphe, nous présentons le cas où un oscillateur auto-entretenu se synchronise avec une force extérieure qui lui est appliquée. Nous étudions le cas particulier d'un oscillateur quasi-linéaire faiblement forcé.

Nous rappelons qu'un oscillateur quasi-linéaire génère un processus $x(t)$ qui vérifie $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \phi_0)$ où ω_0 est sa fréquence angulaire libre et ϕ_0 sa phase initiale. La force extérieure qui lui est appliquée est supposée harmonique de fréquence ω . En d'autres termes, la force varie de la même façon que $\varepsilon \cos(\phi_e)$ où $\phi_e = \omega t + \bar{\phi}_e$ est la phase totale de la force et ε son amplitude. On suppose $\omega \neq \omega_0$ et on note $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$ le "detuning". Comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, l'amplitude de l'oscillateur est stable alors que la phase n'est ni stable, ni instable. Donc la force extérieure (faible) agit uniquement sur la phase.

On définit un repère tournant avec une vitesse angulaire ω dans le sens positif (dans le sens inverse de rotation des aiguilles d'une montre). La position du point de phase est déterminée par $\phi - \phi_e$. Dans le cas où l'amplitude de la force est nulle, le point de phase dans le nouveau repère peut avoir trois comportements différents :

- il continue à tourner dans le sens positif si $\omega_0 > \omega$: $\phi - \phi_e$ augmente avec une vitesse constante $\omega_0 - \omega$ (Figure 1.23.a)
- il est immobile si $\omega_0 = \omega$: $\phi - \phi_e$ reste constant (Figure 1.23.b)
- il tourne dans le sens des aiguilles d'une montre si $\omega_0 < \omega$: $\phi - \phi_e$ diminue avec une vitesse constante $\omega_0 - \omega$ (Figure 1.23.c)

Revenons au cas qui nous intéresse, lorsque l'amplitude $\varepsilon \neq 0$. Deux situations peuvent se présenter :

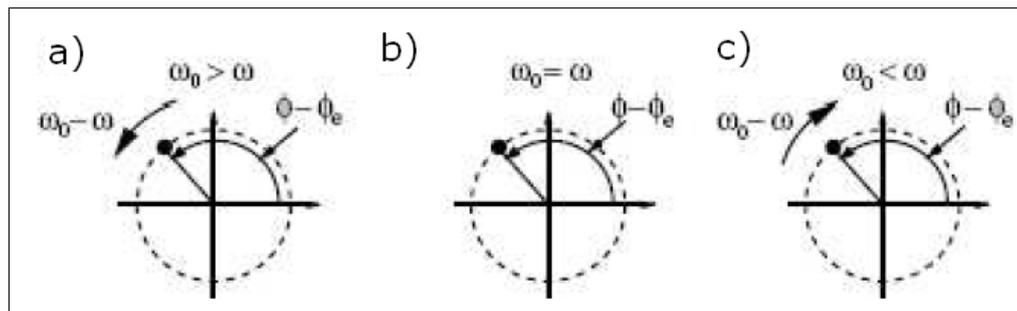


FIGURE 1.23 – Repère tournant : (a) $\omega_0 > \omega$, (b) $\omega_0 = \omega$, (c) $\omega_0 < \omega$.

- $\omega_0 = \omega$: Quelque soit la différence de phase initiale $\phi^0 = \phi_0 - \bar{\phi}_e$, cette différence de phase reste constante. La synchronisation dans ce cas trivial se manifeste par le maintien de cette stabilité dans le déphasage (cas 1 dans la figure 1.24).
- $\omega_0 \neq \omega$: On suppose par exemple que $\omega_0 > \omega$. Dans ce cas, la force tend à égaliser la phase de l'oscillateur $\phi(t)$ et la phase $\phi_e(t) + \phi^0$ ($\phi(t) - \phi_e(t)$ constante) (cas 2 dans la figure 1.24). Au contraire, le “detuning” $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$ tend à les éloigner l'une de l'autre (cas 3, 4 et 5 de la figure 1.24). La relation entre l'amplitude ε de la force et le detuning $\Delta\omega$ détermine laquelle de ces deux actions l'emportera sur l'autre.

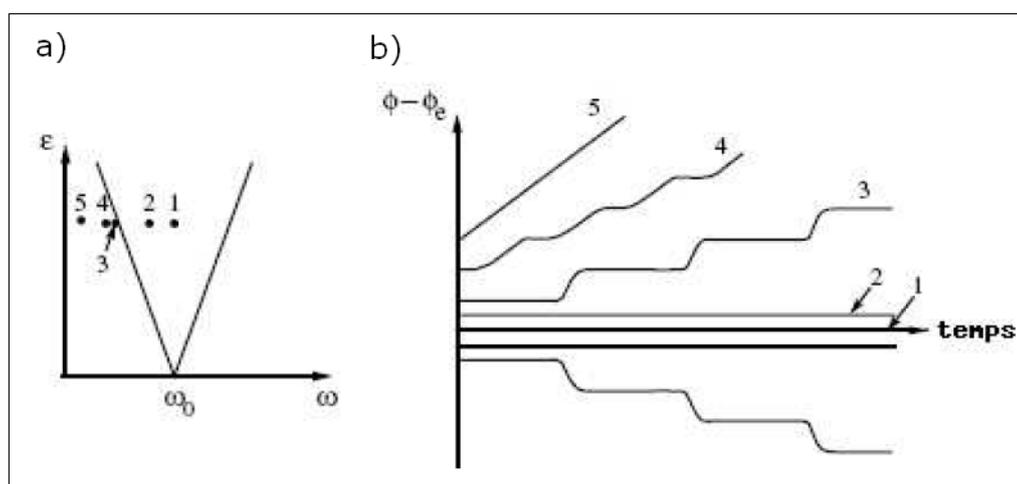


FIGURE 1.24 – Le déphasage selon la position des points par rapport à la région de synchronisation : (a) la position des points par rapport à la région de synchronisation, (b) le déphasage en fonction du temps pour les différents points.

1.5 La perception des vibrations par les humains

Les mesures faites sur des planchers rigides sont différentes de celles qui sont faites sur des planchers ayant des fréquences propres faibles : un piéton qui ressent des vibrations de la passerelle modifie son mouvement en conséquence et se synchronise (ou pas) avec celui de la passerelle. Il convient donc d'étudier la perception des vibrations par les humains. Cette notion est très subjective ; en effet, la perception des vibrations est différente d'une personne à l'autre. Il existe plusieurs seuils :

- le seuil de la perception des vibrations
- le seuil d'inconfort des vibrations
- le seuil où elles deviennent nuisibles (elles nuisent à la santé ou elles font perdre l'équilibre)

Des études sur la perception des vibrations verticales, montrent que les personnes debout ressentent plus les vibrations qu'une personne en mouvement [67]. De plus, le piéton ressent le maximum de vibration à côté de la mi-portée à cause de l'effet de la forme modale [90]. Kobori et Kajikawa [91] affirment que la vitesse du plancher est le paramètre principal qui influence la perception humaine et que l'on a une même sensibilité face aux vibrations ayant des valeurs efficaces identiques. L'utilisation de la vitesse des vibrations comme paramètre d'évaluation du confort est difficile en pratique, bien qu'utilisée au Japon, parce que généralement les mesures expérimentales sont faites avec des accéléromètres ; le signal mesuré est donc une accélération et il faut l'intégrer pour se ramener à la vitesse. Or cette intégration est parfois très compliquée. C'est pourquoi en général, on se réfère à l'accélération comme critère de confort. Blanchard et al [65], qui ont utilisé les résultats de Leonard [67] et Smith [90], ont évalué la limite maximale de l'accélération adaptée au confort du piéton :

$$a_{critique} = a_c = 0.5\sqrt{f_b}(m.s^{-2}) \quad (1.17)$$

f_b étant la fréquence fondamentale du mode vertical de la passerelle. Tilly et al. [92] ont affirmé que la valeur $\sqrt{f_b}$ pourrait être plus appropriée pour des fréquences en dehors de la plage 1.7 – 2.2 Hz, sans donner de détails sur l'élaboration de cette recommandation.

Bien que la perception des vibrations soit plus sensible dans la direction latérale de vibration du plancher, les mesures faites sont très rares, et la plupart d'entre elles portent sur des immeubles. L'AFGC [77, 93] estime que le seuil de perception se situe pour des accélérations critiques ayant des valeurs entre 0.10 et 0.15 $m.s^{-2}$, la valeur 0.10 $m.s^{-2}$ pouvant être retenue comme valeur sécuritaire. Pour les vibrations latérales de fréquence autour de 1 Hz, l'Eurocode 0 Annexe 2 propose une accélération critique horizontale de 0.2 $m.s^{-1}$ en utilisation normale et 0.4 $m.s^{-1}$ pour des conditions exceptionnelles de foule. Les essais expérimentaux réalisés par Nakamura [94] sur le T-bridge montrent que les piétons marchent normalement pour un déplacement de la passerelle de l'ordre de 10 mm (qui dans son cas correspond à une vitesse de 60 $mm.s^{-1}$ et à une accélération de 300 $mm.s^{-2}$). Pour des fréquences caractéristiques des réponses des tours d'immeubles de grandes hauteurs dues au vent (0.067 à 0.20 Hz), les facteurs les plus importants qui influencent la perception des vibrations latérales ont été déterminés [95], mais ce sont des facteurs valables en général : la fréquence des vibrations, le mouvement du corps, l'attente du mouvement (si on s'attend au mouvement, le seuil de perception est plus bas [95] mais on tolère mieux les vibrations [90], et la posture du corps. Dans cette bande de fréquences de l'immeuble, la perception des gens qui marchent est supérieure à celle des gens immobiles. Wheeler [14, 80] a remarqué que la perception d'une personne dans une foule est différente de celle d'une personne seule. Ainsi, des gens qui sautent en foule, ne se rendent pas compte des vibrations [96]. On ne sait pas exactement la cause de ce phénomène. Ceci pourrait être à cause du bruit, de la présence d'autres personnes ou pour des raisons totalement différentes.

1.6 Synthèse du chapitre

Les modélisations du comportement de la foule, du piéton, et de l'interaction piétons-structure dans le cas des passerelles, restent des sujets très complexes et encore ouverts.

L'objectif de cette thèse est de proposer un modèle 2D discret de mouvement de foule, dans lequel les piétons se déplacent continûment dans l'espace d'étude, composé de trois étapes fondamentales :

- gérer les contacts locaux piéton-piéton et piéton-obstacle,
- affecter un comportement à chaque piéton afin de pouvoir simuler des situations d'évacuations,
- gérer l'interaction piétons-structure dans le cas des passerelles souples, avec prise en compte du phénomène de synchronisation.

Les modèles de la littérature se rapprochant de ce que l'on veut proposer, à savoir ceux traitant les contacts locaux entre piétons, sont le modèle de force sociale [7] et le modèle mathématique [10]. Ces modèles étant inspirés de modèles de mouvement de grains pour la gestion des contacts [54, 63], nous nous sommes intéressés à la gestion des contacts dans milieux granulaires.