

# Gestion du comportement des piétons

---

*Ce chapitre a pour objectif de présenter la manière dont un comportement est affecté à chaque piéton :*

- ★ une “volonté” est donnée à chaque piéton*
  - ★ les interactions entre un piéton et son environnement proche sont gérées*
-

PLAN DU CHAPITRE 3

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>3.2</b>	<b>Une volonté pour chaque piéton . . . . .</b>	<b>83</b>
3.2.1	Introduction de la vitesse souhaitée dans le modèle de mouvement de particule . . . . .	83
3.2.2	La vitesse souhaitée . . . . .	84
3.2.3	Influence du paramètre $\tau$ . . . . .	86
<b>3.3</b>	<b>Gestion des interactions avec l'environnement proche . . . . .</b>	<b>86</b>
3.3.1	Forces socio-psychologiques . . . . .	87
3.3.2	Modélisation d'un sous-groupe . . . . .	88
<b>3.4</b>	<b>Synthèse du chapitre . . . . .</b>	<b>96</b>

---

## 3.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent qu’une approche de mouvement de particules rigides peut être utilisée pour gérer les contacts entre piétons et le mouvement des piétons. Dans ce chapitre, nous proposons une modélisation du comportement des piétons, publiée dans les articles [5, 113, 114]. Cette modélisation se fait en deux étapes : la première “nécessaire” permet de définir la stratégie de déplacement d’un piéton, comme s’il était seul dans un espace donné. Une “volonté” de se déplacer dans une direction particulière avec une allure spécifique à chaque instant est déterminée pour chaque piéton. La seconde étape permet à chaque piéton de gérer les interactions avec son environnement proche pour rendre son comportement plus réaliste.

## 3.2 Une volonté pour chaque piéton

Un piéton est représenté par une particule ayant une direction et une allure souhaitées. Dans la littérature, il existe trois méthodes pour donner une volonté au piéton : (i) l’utilisation de règles [6, 8, 34, 55–59] comme dans les modèles “rule-based” et d’automate cellulaire ; (ii) l’utilisation de forces [2, 4, 7, 9, 23, 35, 47–53, 60–62] comme dans les modèles de type force sociale et de choix discret ; ou (iii) l’utilisation directe d’une vitesse souhaitée [10] comme dans le modèle mathématique.

Nous avons décidé d’utiliser les deux dernières méthodes. La vitesse souhaitée, actualisée à chaque instant, permet de donner une volonté au piéton, et la force permet d’introduire cette vitesse souhaitée dans le modèle de mouvement de particule.

### 3.2.1 Introduction de la vitesse souhaitée dans le modèle de mouvement de particule

L’idée est d’introduire, dans le modèle de mouvement de particule, une force  $\underline{f}^a(t)$  qui permet de donner une vitesse souhaitée aux piétons à chaque instant. Cette force ajoutée est une des composantes de la force intérieure  $\underline{f}^{int}(t)$  présente dans l’équation (2.12) (ou  $f$  dans les équations (2.1) et (2.8)). Si c’est la seule composante, on peut noter :  $\underline{f}^{int}(t) = \underline{f}^a(t)$  où  $\underline{f}^a(t)$  est la force d’accélération intérieure introduite par Helbing [7]. Nous avons choisi d’utiliser cette force car elle décrit un comportement réaliste avec peu de paramètres utilisés.  $\underline{f}^a(t)$  est la force motrice des piétons. Elle est nécessaire pour donner la trajectoire et l’allure désiré de chaque piéton. Chaque composante  $\underline{f}_i^a(t)$  du vecteur force de dimension  $2N$  :

$\underline{f}^a = ({}^t f_1^a, {}^t f_2^a, \dots, {}^t f_N^a)$ , est associée au piéton  $i$  et a pour expression :

$$\underline{f}_i^a(t) = m_i \frac{\|\dot{u}_{d,i}\| e_{d,i}(t) - \dot{u}_i(t)}{\tau_i} \quad (3.1)$$

où  $\dot{u}_{d,i}$  est la vitesse désirée du piéton  $i$ ;  $e_{d,i}$  est sa direction désirée;  $\dot{u}_i$  est sa vitesse réelle;  $\tau_i$  est un temps de relaxation permettant au piéton  $i$  de retrouver sa vitesse désirée après un contact ou un changement soudain de direction pendant la marche. Plus la valeur de  $\tau_i$  est petite, plus le piéton est “agressif” [2] et retrouve rapidement sa vitesse souhaitée lorsqu’elle est différente de sa vitesse réelle. Helbing a choisi  $\tau = 0.5$  s. Un exemple est illustré sur la figure 3.1, les trajectoires de deux piétons identiques  $i$  et  $j$  se déplaçant dans des directions opposées, après une collision, en fonction de différentes valeurs de  $\tau$ , sont données.

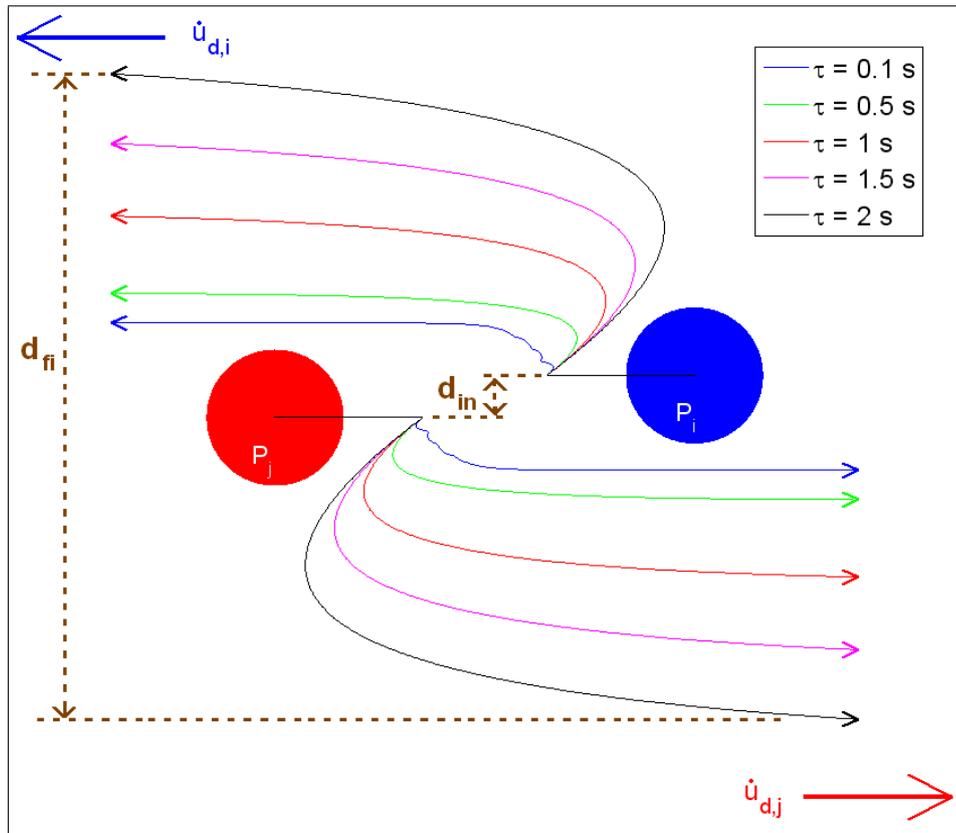


FIGURE 3.1 – Représentation des trajectoires de deux piétons identiques  $i$  et  $j$  se déplaçant dans des directions opposées, pour des valeurs différentes de  $\tau$ . Après la collision, pour chaque piéton, la force d’accélération intérieure permet de modifier progressivement la vitesse réelle après le choc pour retrouver la vitesse souhaitée. La rapidité du changement de vitesse dépend des valeurs de  $\tau_i$  et  $\tau_j$ . Dans cet exemple,  $\tau_i = \tau_j = \tau$ .

### 3.2.2 La vitesse souhaitée

Les expressions de  $\|\dot{u}_{d,i}\|$  et  $e_{d,i}(t)$  doivent être déterminées pour trouver  $\underline{f}_i^a(t)$ . L’amplitude  $\|\dot{u}_{d,i}\|$  de la vitesse souhaitée représente l’allure à laquelle le piéton  $i$  veut se mouvoir sur la structure considérée et peut être influencée par sa nervosité. En générale,

la vitesse est choisie dans une distribution normale de moyenne  $1.34 \text{ m.s}^{-1}$  et d'écart type  $0.26 \text{ m.s}^{-1}$  [38]. Elle peut aussi être définie en fonction de la longueur de pas souhaitée  $L_{pas,0,i}$  du piéton  $i$  et de la fréquence angulaire latérale  $\omega_i$  de sa marche libre souhaitée [31], par l'expression :

$$\|\dot{\underline{u}}_{d,i}\| = \frac{L_{pas,0,i}}{\pi} \omega_i . \quad (3.2)$$

Plusieurs définitions de la trajectoire souhaitée  $\underline{e}_{d,i}(t)$  d'un piéton  $i$  peuvent être données : soit (i) la trajectoire la plus confortable pour lui, i.e. celle qui lui demande le moins d'effort (e.g. éviter les escaliers, etc.), et où il y a le moins de changement de direction possible, etc. ; ou (ii) la trajectoire du chemin le plus court ou (iii) celle du chemin le plus rapide pour se déplacer d'un lieu à un autre [133]. Il est possible de combiner plusieurs stratégies de déplacement dans la même simulation, ou de modifier la stratégie choisie pendant la simulation si nécessaire.

La stratégie du chemin le plus court pour joindre un point à un autre a été implémentée en utilisant un algorithme de Fast Marching [134] pour obtenir  $\underline{e}_{d,i}$  (voir B). Cette direction dépend de l'espace d'évolution considéré (obstacles, etc.), du temps, et aussi des caractéristiques de l'individu (genre, âge, comportement pressé ou non, etc.). Elle est définie par :

$$\underline{e}_{d,i}(t) = \frac{\dot{\underline{u}}_{d,i}(t)}{\|\dot{\underline{u}}_{d,i}\|} .$$

La figure 3.2 illustre sur un exemple les distances géodésiques à la sortie d'une salle contenant un obstacle. Deux exemples de trajectoires les plus courtes sont tracées en fonction de la position initiale du piéton dans la salle.

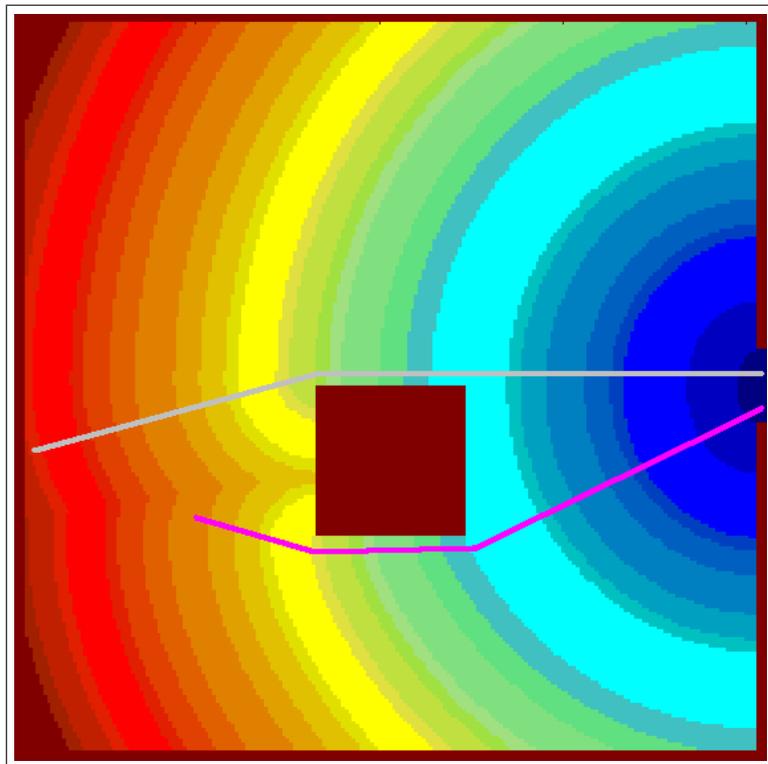


FIGURE 3.2 – Distances géodésiques à la sortie d'une salle contenant un obstacle - Deux exemples de trajectoires les plus courtes sont tracées.

### 3.2.3 Influence du paramètre $\tau$

Les trajectoires de deux piétons se déplaçant dans des directions opposées, après collision, sont considérées. Une étude a été réalisée pour déterminer l'influence du temps de relaxation  $\tau$  sur le temps  $t_{fi}$  nécessaire aux piétons pour retrouver leur trajectoire désirée après la collision, et sur la distance finale  $d_{fi}$  entre le centre des deux piétons après la collision (Figure 3.1).

Quand la distance initiale  $d_{in}$  entre les centres des piétons est petite, et que la valeur de  $\tau$  reste faible ( $< 0.5$  s), plusieurs contacts peuvent avoir lieu parce que les piétons marchent "agressivement" et retrouvent leur vitesse souhaitée immédiatement après la dernière collision.

Quand la valeur de  $\tau$  est supérieure à 0.5 s, il y a seulement une collision, et  $t_{fi}$  et  $d_{fi}$  augmentent linéairement en fonction de  $\tau$  (Figure 3.3). L'observation des résultats obtenus

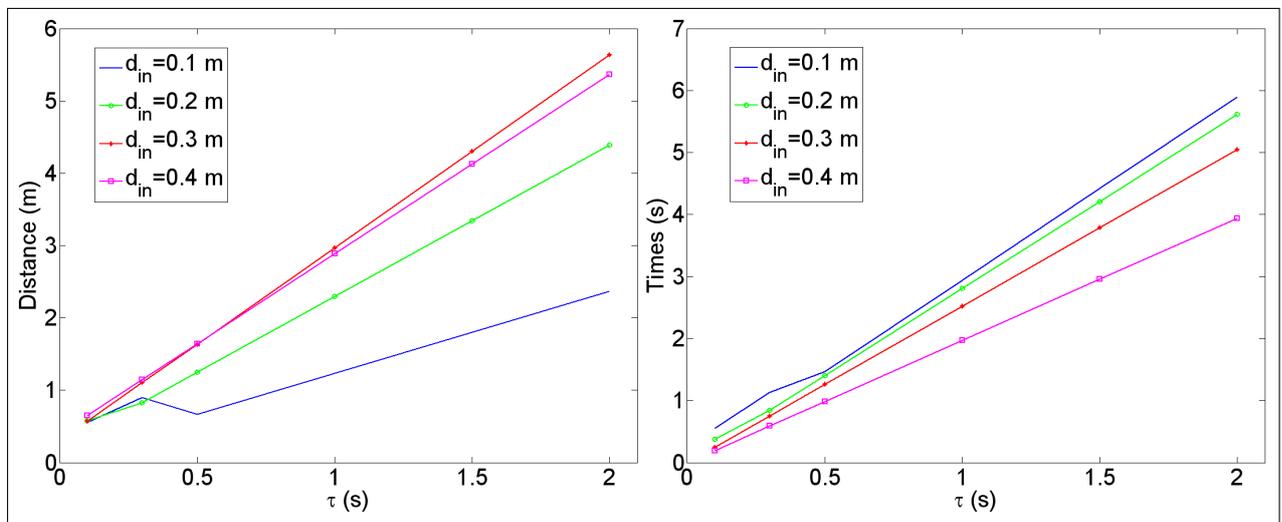


FIGURE 3.3 – a.  $d_{fi}$  en fonction de  $\tau$  et  $d_{in}$ ; b.  $t_{fi}$  en fonction de  $\tau$  et  $d_{in}$ . La vitesse des piétons est de  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et leurs rayons sont de  $0.25 \text{ m}$ .

après la collision entre deux piétons de rayons différents, mais de même vitesse (Figure 3.4), montre que le piéton le plus léger (rayon de  $0.2 \text{ m}$ ) nécessite plus de temps après le contact pour retrouver sa trajectoire désirée que le piéton le plus lourd (rayon de  $0.25 \text{ m}$ ). Quelques soient les conditions initiales, cette observation peut être réalisée car le contact entraîne une grande déviation de la trajectoire et de la vitesse du piéton le plus léger.

## 3.3 Gestion des interactions avec l'environnement proche

Pour rendre le comportement du piéton plus réaliste, ses interactions avec son environnement proche doivent être gérées. Dans la littérature, les modèles opérationnels présentent quatre types d'interactions à distance possibles : les interactions attractives [7,62] ; les interactions répulsives piéton-obstacle [2] ; les interactions répulsives piéton-piéton [2,23,50,62,135] ; et les interactions géant les sous-groupes [22,23].

Dans notre modèle de foule, les interactions attractives ne sont pas nécessaires car la stratégie de déplacement choisie pour un piéton peut être modifiée pendant la simulation. Les interactions avec les obstacles de l'environnement sont déjà prises en compte par le Fast mar-

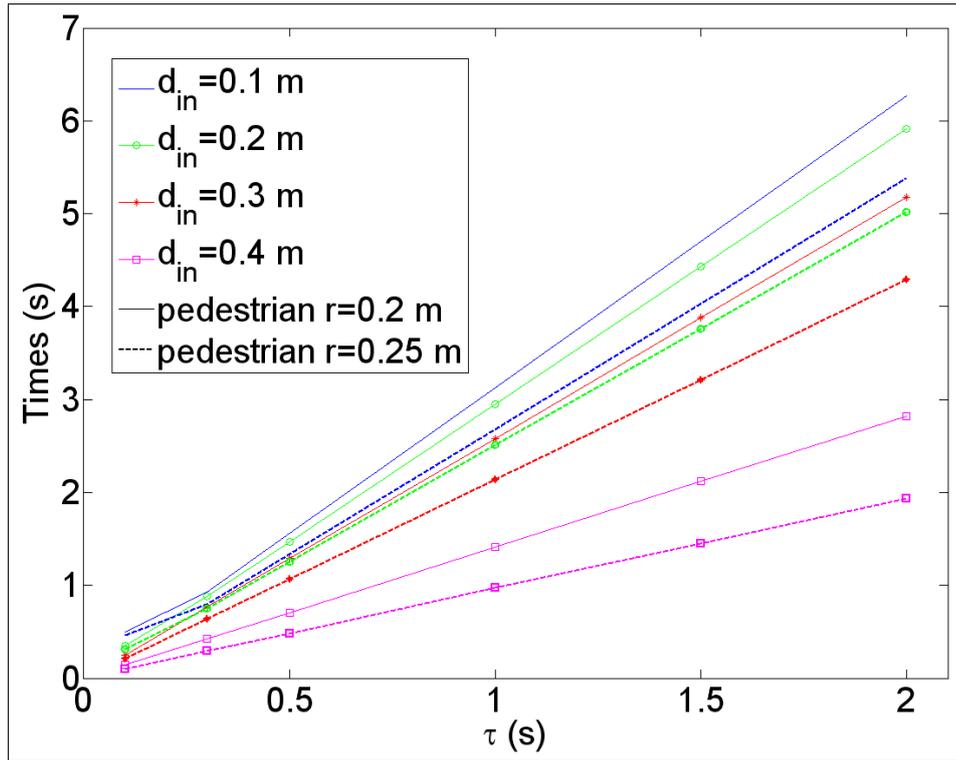


FIGURE 3.4 –  $t_{fi}$  en fonction de  $\tau$  et  $d_{in}$ . La vitesse des piétons est de  $1.5 \text{ m.s}^{-1}$  et les rayons sont de  $0.2 \text{ m}$  et  $0.25 \text{ m}$ .

ching qui permet au piéton de les contourner. Seules les interactions répulsives piéton-piéton et les interactions géant les sous-groupe doivent être introduites.

Toute interaction représentée par une force peut être ajoutée à notre modèle de foule. Dans la suite, nous présentons deux exemples de forces introduites dans  $\underline{f}^{int}(t)$  en plus de la force d'accélération intérieure  $\underline{f}^a(t)$ ,  $\underline{f}^{int}(t) = \underline{f}^a(t) + \underline{f}^{soc}(t) + \underline{f}^{sgr}(t)$  où  $\underline{f}^{soc}(t)$  est une force socio-psychologique [2] qui reflète la tendance des piétons à garder une certaine distance les uns des autres ; et  $\underline{f}^{sgr}(t)$  est une force de "sous-groupe" [22, 23] qui permet de modéliser les comportements de groupes de personnes dans les mouvements de foule. Une autre alternative à l'utilisation de forces est proposée par la suite, pour gérer un cas particulier de sous-groupe : des piétons "se tenant par la main".

### 3.3.1 Forces socio-psychologiques

Dans la littérature, les variantes des forces répulsives piéton-piéton [2, 23, 50, 62, 135] sont nombreuses. Toutes peuvent être introduites dans notre modèle de foule, mais pour comprendre leur fonctionnement, nous avons choisi de présenter le type de force proposée par Helbing [2], qui en a inspiré d'autres.

L'expression de la force socio-psychologique [2, 47], appliquée sur le piéton  $i$  et due à l'interaction avec le piéton  $j$ , est donnée par :

$$\underline{f}_{ij}^{soc}(t) = A_i \exp\left(\frac{-D_{ij}(q(t))}{B_i}\right) \left(\Lambda_i + (1 - \Lambda_i) \frac{1 + \cos \varphi_{ij}}{2}\right) \underline{e}_{ij} \quad (3.3)$$

où  $A_i$  caractérise l'amplitude de l'interaction (N) ;  $B_i$  est la portée de l'interaction répulsive (m) ;  $\Lambda_i < 1$  permet de considérer le caractère anisotropique des interactions des piétons, i.e.

la situation devant le piéton a plus d'impact sur son comportement que ce qui se passe dans son dos ;  $\varphi_{ij}$  est l'angle entre la direction  $\underline{e}_{d,i}(t)$  du mouvement désiré et la direction  $-\underline{e}_{ij}$  du piéton exerçant la force de répulsion.

$\underline{f}_{ij}^{soc}$  est une force à distance : plus les piétons  $i$  et  $j$  sont éloignés l'un de l'autre, moins l'amplitude de la force à distance est élevée, ceci à cause du terme exponentiel.

La figure 3.5 est un exemple d'interaction piéton-piéton, sans et avec la force socio-psychologique. La colonne de gauche montre une interaction sans la force socio-psychologique, il y a une

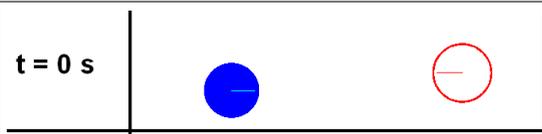
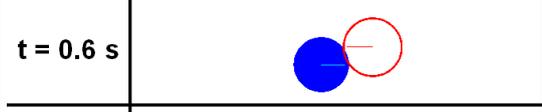
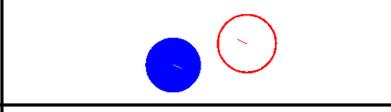
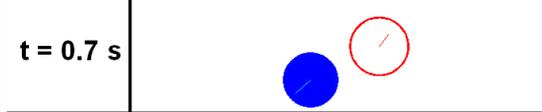
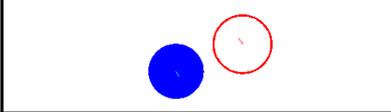
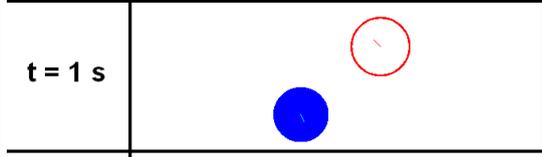
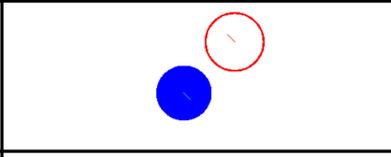
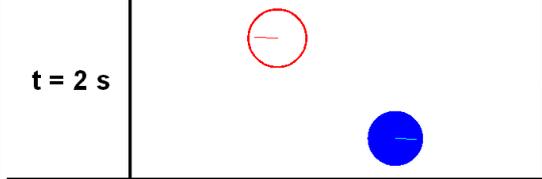
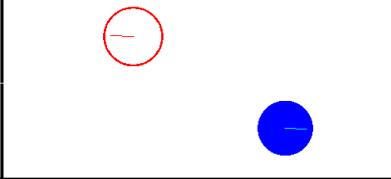
<b>t = 0 s</b>		
<b>t = 0.6 s</b>		
<b>t = 0.7 s</b>		
<b>t = 1 s</b>		
<b>t = 2 s</b>		
	<b>without socio-psychological force</b>	<b>with socio-psychological force</b>

FIGURE 3.5 – Interaction piéton-piéton, sans (colonne de gauche) et avec (colonne de droite) la force socio-psychologique.

collision entre les deux piétons. La colonne de droite montre une interaction avec la force socio-psychologique, il n'y a pas de collision. L'interaction à distance permet à chaque piéton d'éviter son voisin en lui tournant autour.

### 3.3.2 Modélisation d'un sous-groupe

Un "groupe" est défini comme une collection physique de personnes suivant le même itinéraire, mais qui peuvent ou ne peuvent pas faire partie du même groupe social ; tandis qu'un "sous-groupe" est défini comme des personnes appartenant au même "groupe" physique qui veulent rester ensemble. Des études ont révélé que les sous-groupes les plus petits comme ceux d'amis ou de membres d'une famille constituent la majorité de la population d'une foule [42]. Les premières observations ont montré que les groupes composés de deux à quatre membres sont les plus fréquents, tandis que les groupes de la taille de cinq personnes et plus, sont rares [23, 59].

En général, cette problématique de la gestion des sous-groupes est totalement négligée lorsque l'on s'intéresse aux problèmes d'évacuation de bâtiment. Pourtant, il semble naturel de penser que l'évacuation d'un espace occupé par des personnes seules nécessite moins de temps que l'évacuation de ce même espace par des familles ayant des enfants à surveiller. Savoir modéliser des sous-groupes peut donc être très intéressant, en vue de futures études.

Dans la littérature, à notre connaissance, uniquement deux modèles de sous-groupe existent [22, 23]. Ces deux modèles fonctionnent à l'aide de forces. Nous proposons une alternative originale aux forces : l'utilisation d'une vitesse de déformation. Cette notion permet de gérer un cas particulier de sous-groupe, des piétons "se tenant par la main".

La gestion du sous-groupe se fait en deux étapes : la formation du sous-groupe et la gestion des interactions entre un sous-groupe et son environnement proche. Cette dernière est la même pour les trois modèles.

Pour gérer l'interaction entre un sous-groupe et son environnement le plus proche, deux types d'interaction doivent être prises en compte : l'interaction sous-groupe / sous-groupe et l'interaction sous-groupe / piéton. La gestion de ces interactions se justifie par la tendance des personnes à contourner les sous-groupes et non pas les traverser.

Le principe de la méthode est de représenter le sous-groupe comme une seule entité et d'appliquer à chacun de ces membres, une force répulsive d'évitement  $f_{soc}^{sg}$  similaire à la force socio-psychologique (Equation (3.3)). Le centre géométrique et la vitesse moyenne du sous-groupe doivent être définis pour l'application de cette force.

Le centre géométrique de chaque sous-groupe est calculé en faisant la moyenne arithmétique des positions des membres du sous-groupe :

$$\begin{cases} C_x = \sum \frac{q_i^x}{nb} \\ C_y = \sum \frac{q_i^y}{nb} \end{cases} \quad (3.4)$$

où  $(q_i^x, q_i^y)$  est la position du membre  $i$  du sous-groupe,  $nb$  est le nombre total de personnes composant le sous-groupe.

La vitesse moyenne de chaque sous-groupe est calculée en faisant la moyenne arithmétique des vitesses des membres.

La figure 3.6 montre un exemple d'interaction entre un sous-groupe formé de 4 personnes et un piéton.

Dans la suite, nous présentons et comparons les trois modèles permettant de former les sous-groupes : celui de Singh [22], celui de Moussaïd [23], et celui des piétons "se tenant par la main".

### Modèle proposé par Singh [22]

Le concept de "sous-groupe" est introduit par la mise en place de "points d'attraction" pour les membres du sous-groupe (suiveurs), fixe par rapport à un leader de référence du sous-groupe. Nous supposons dans la suite que les sous-groupes se composent d'au plus quatre personnes.

Les positions relatives des points d'attraction sont fixées conformément aux expressions

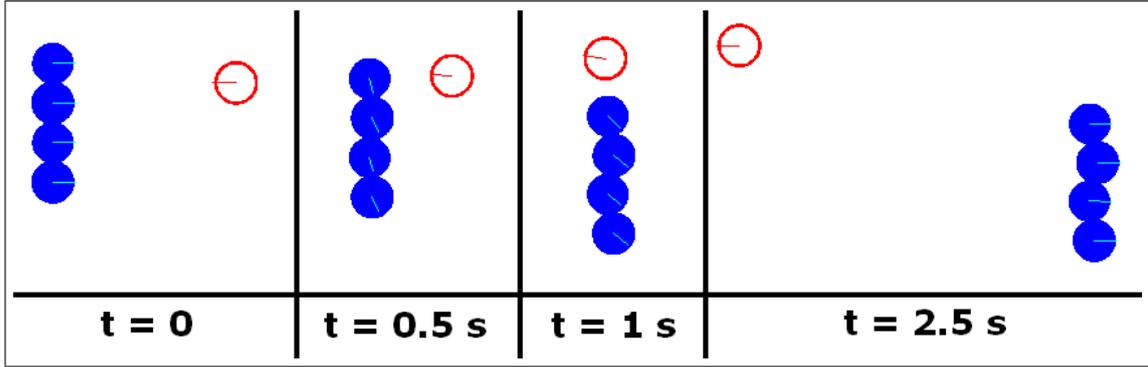


FIGURE 3.6 – Exemple d’interaction entre un sous-groupe formé de 4 personnes et un piéton.

suivantes :

$$\begin{cases} A_{f,x} = q_l^x \pm d_{l,f} \cos(\varphi_{l,f}) \\ A_{f,y} = q_l^y \pm d_{l,f} \sin(\varphi_{l,f}) \end{cases} \quad (3.5)$$

où  $(A_{f,x}, A_{f,y})$  sont les coordonnées du point d’attraction de chaque suiveur ;  $(q_l^x, q_l^y)$  sont les coordonnées du leader de référence ;  $d_{l,f}$  est la distance souhaitée entre deux membres consécutifs, le leader de référence et un suiveur ;  $\varphi_{l,f}$  est l’orientation angulaire désirée du sous-groupe. Les valeurs des paramètres  $d_{l,f}$  et  $\varphi_{l,f}$  peuvent être trouvés dans [23].

Si les membres du sous-groupe sont dans une formation en ligne, la deuxième personne à partir de la gauche est considérée comme le leader de référence pour les première et troisième personnes (Figure 3.7), alors que la troisième personne est le leader de référence pour la quatrième (Figure 3.7). Chaque membre du sous-groupe se déplace de façon autonome selon

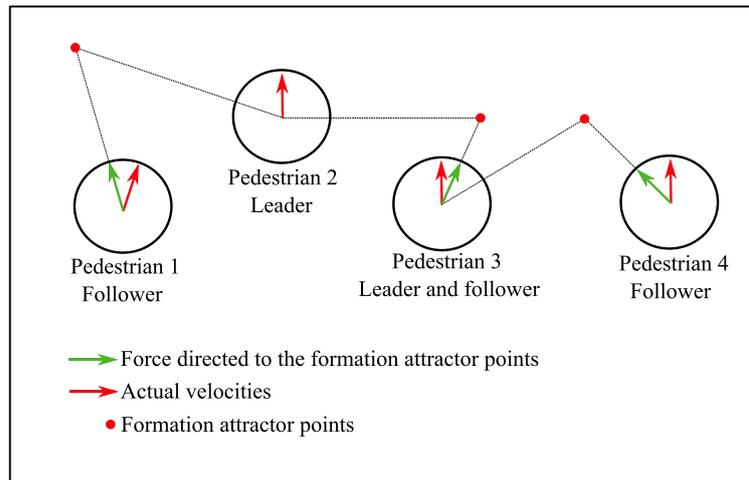


FIGURE 3.7 – Formation d’un sous-groupe de 4 personnes avec le modèle proposé par Singh [22].

sa vitesse souhaitée. Les membres suiveurs sont également attirés par leurs propres points d’attraction. Une force attractive est introduite pour que le sous-groupe se forme. Pour le suiveur  $i$ , cette force de “formation” est :

$$\underline{f}_{for,i}^{sgr}(t) = m_i \frac{k_{sgr} d_i \underline{e}_{sgr,i}(t)}{\tau_i} \quad (3.6)$$

où  $k_{sgr}$  est la constante de vitesse du sous-groupe ;  $d_i$  est la distance entre le suiveur et son point d'attraction ; et  $\underline{e}_{sgr,i}(t)$  est le vecteur unitaire dirigé du suiveur  $i$  vers son point d'attraction.

La figure 3.8 montre un exemple de formation d'un sous-groupe de 4 piétons. Le sous-groupe

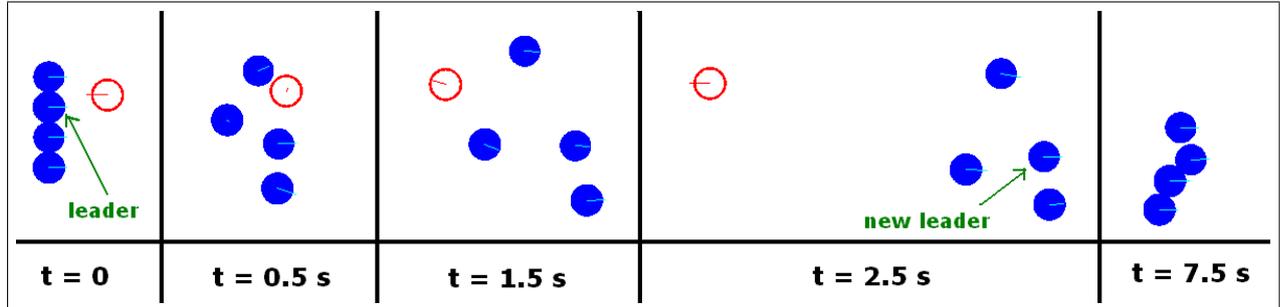


FIGURE 3.8 – Exemple de formation d'un sous-groupe de 4 piétons.

se dissocie à cause de la collision avec le piéton isolé, puis se forme de nouveau. La rapidité de la reformation du sous-groupe dépend du paramètre  $k_{sgr}$ . On remarque que le leader de référence du sous-groupe change au court de la simulation car le contact modifie l'ordre des membres.

### Modèle proposé par Moussaïd [23]

La force de formation du sous-groupe  $\underline{f}_{for,i}^{sgr}(t)$  appliquée au piéton  $i$  est définie comme la somme de trois forces (Figure 3.9) :

$$\underline{f}_{for,i}^{sgr}(t) = \underline{f}_i^{vis}(t) + \underline{f}_i^{att}(t) + \underline{f}_i^{rep}(t) \quad (3.7)$$

Le premier terme  $\underline{f}_i^{vis}(t)$  de l'équation (3.7) prend en compte la direction du regard, et il est

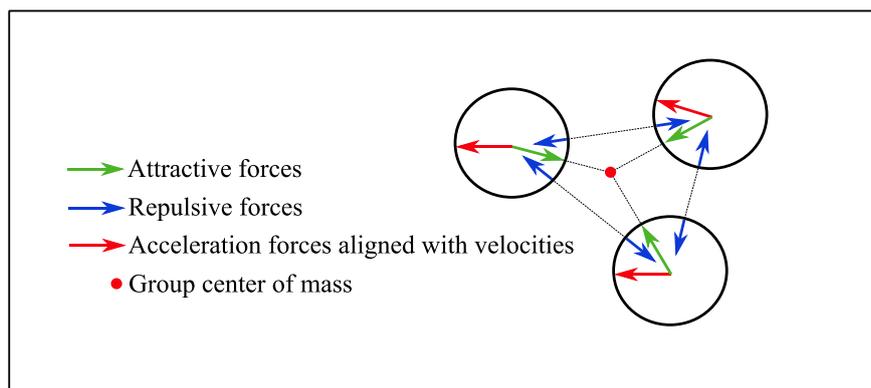


FIGURE 3.9 – Formation d'un sous-groupe de 3 personnes avec le modèle proposé par Moussaïd [23].

supposé proportionnel à la rotation de la tête  $\alpha_i$  par rapport à la direction du mouvement du piéton  $i$ , qui à son tour prend en compte le centre de masse du sous-groupe. Cette force donne de l'importance au champ visuel. En effet, lorsqu'on marche en sous-groupe, on a tendance à garder les autres membres dans son champ de vision pour faciliter l'échange de

paroles. Plus  $\alpha_i$  est grand, moins la marche est confortable. Ainsi, on suppose que le piéton  $i$  ajuste sa position pour réduire la rotation de sa tête. L'expression de la force visqueuse de visualisation est :

$$\underline{f}_i^{vis}(t) = -\beta_1 m_i \alpha_i \underline{\dot{u}}_i \quad (3.8)$$

où  $\beta_1$  est un paramètre décrivant l'amplitude de la force d'interaction entre les membres du sous-groupe ;  $m_i$  est la masse du piéton  $i$  ; et  $\underline{\dot{u}}_i$  est sa vitesse réelle.

A partir d'observations [23], il a été remarqué que le piéton essaie de garder une certaine distance par rapport au centre de masse du sous-groupe. Cette distance augmente avec la taille du sous-groupe. Ainsi, une force attractive est définie :

$$\underline{f}_i^{att}(t) = q_A \beta_2 m_i \underline{e}_{ic} \quad (3.9)$$

où  $\beta_2$  est un paramètre décrivant l'amplitude de la force attractive ;  $\underline{e}_{ic}$  est le vecteur directeur unitaire dirigé du piéton  $i$  vers le centre de masse. Le paramètre  $q_A = 1$  si la distance entre le piéton et le centre de masse du sous-groupe dépasse une distance critique, sinon  $q_A = 0$ . Cette distance critique peut être approchée par la valeur  $\frac{nb-1}{2}$  (en mètres) [23], où on rappelle que  $nb$  est le nombre de membres du sous-groupe.

Enfin, le dernier terme est une force de répulsion qui empêche les piétons de trop se rapprocher les uns des autres. Il est défini par :

$$\underline{f}_i^{rep}(t) = \sum_k q_R \beta_3 m_i \underline{e}_{ik} \quad (3.10)$$

où  $\beta_3$  est un paramètre décrivant l'amplitude de la force répulsive ;  $\underline{e}_{ik}$  est le vecteur directeur unitaire dirigé du piéton  $i$  vers le membre  $k$  du sous-groupe. Le paramètre  $q_R = 1$  lorsque la distance entre les piétons est inférieure à une distance de sécurité  $d_0$ , sinon  $q_R = 0$ .

Les valeurs numériques de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  et  $\beta_3$  sont données dans [23].

### Modélisation de piétons “se tenant par la main”

Nous proposons ensuite un cas particulier de sous-groupe, des piétons “se tenant par la main”, que l'on nommera dans la suite piétons “liés”. Alors que les méthodes existantes décrivent la cohésion du sous-groupe avec des forces [22, 23], la méthode proposée pour décrire ce comportement original, inspirée de l'article [136] décrivant l'interaction à distance entre particules rigides, est de modéliser les effets du sous-groupe comme une déformation continue du système pour les deux piétons “liés”.

La vitesse de déformation à distance est une vitesse d'écartement entre les deux piétons considérés, elle est la dérivée du carré de la distance entre les centres des deux piétons. En prenant l'exemple de deux piétons “liés”  $i$  et  $j$ , cette vitesse de déformation à distance a pour expression :

$$\Delta_{ij}^*(\underline{q}(t), \underline{\dot{u}}(t)) = 2 \left( {}^t \underline{q}_i(t) - {}^t \underline{q}_j(t) \right) \left( \underline{\dot{u}}_i(t) - \underline{\dot{u}}_j(t) \right) \quad (3.11)$$

Ainsi, le pseudopotential de dissipation (Equation (2.18)) devient :

$$\Phi^d(\underline{q}, \underline{\dot{Y}}) = \sum_{1 \leq i < j \leq N} \frac{1}{2} K_V \left( \Delta_{ij}^*(\underline{q}, \underline{\dot{Y}}) \right)^2 + \frac{1}{2} K_N \left( {}^t \underline{\Delta}_{ij}(\underline{\dot{Y}}) \underline{e}_{ji} \right)^2 \quad (3.12)$$

où  $K_V$  est un coefficient de dissipation visqueuse.

Lorsque la distance séparant les deux piétons dépasse une valeur seuil (Figure 3.11), soit lorsque l'on considère que les piétons ne sont plus "liés", nous remplaçons l'action de la vitesse de déformation à distance par une force de rappel élastique appliquée sur les deux piétons considérés pour les rapprocher l'un de l'autre. L'expression de cette force intérieure attractive (Figure 3.10), exercée par le piéton  $i$ , en relation avec le piéton  $j$ , est :

$$\underline{f}_{ij}^{int,el} = -m_i K_e (\underline{q}_i - \underline{q}_j) \quad (3.13)$$

où  $K_e$  est le coefficient positif de la force attractive élastique.

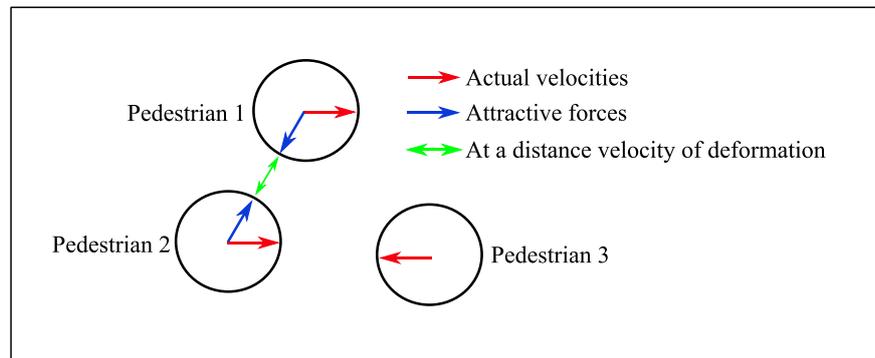


FIGURE 3.10 – Formation d'un sous-groupe de 2 personnes se tenant par la main.

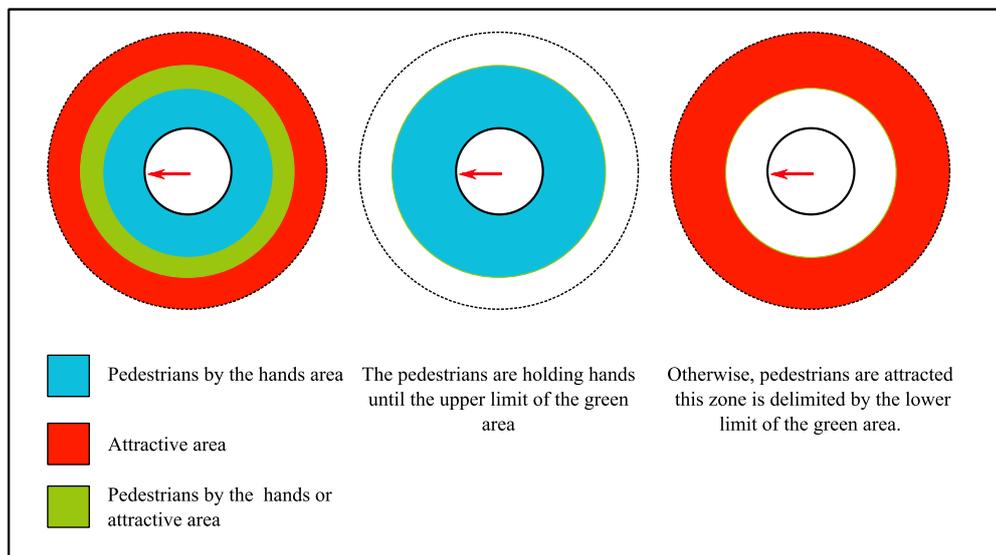


FIGURE 3.11 – Les différentes zones de l'approche "piétons se tenant par la main" - La zone bleue est la zone où les piétons sont "liés". La zone rouge est celle où ils sont "libres" et donc où la force attractive est appliquée. La zone verte est alternativement l'une ou l'autre zone : c'est la bleue lorsque les piétons sont liés, et la rouge lorsqu'ils sont libres. Cette zone permet d'éviter un comportement oscillant des piétons qui apparaît à la frontière commune des zones bleue et rouge lorsque la verte n'existe pas.

Nous avons étudié sur un exemple l'influence du paramètre  $K_V$  sur la liaison entre deux piétons. Considérons trois piétons identiques de rayon  $r = 0.24 \text{ m}$  et d'allure  $1.3 \text{ m.s}^{-1}$ . Les deux piétons liés sont espacés de  $0.26 \text{ m}$  et marchent à contre sens du piéton isolé qui vient les percuter perpendiculairement à leur formation. La collision a lieu "parfaitement" au milieu du sous-groupe (Figure 3.12). Le piéton libre essaie donc de passer entre les piétons liés. Nous avons étudié trois paramètres après la rencontre "piétons liés - piéton libre" en

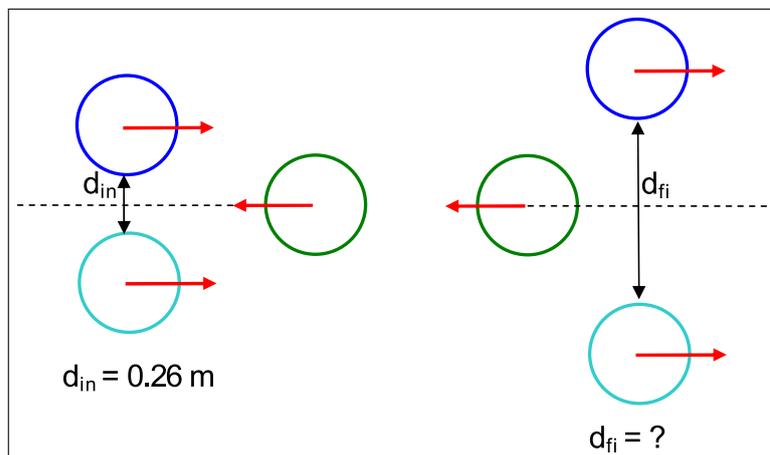


FIGURE 3.12 – Exemple d’une collision de deux piétons se tenant par la main avec un piéton isolé.

fonction de la valeur de  $K_V$  (Figure 3.13) :

- la distance finale  $d_{fi}$  entre les piétons liés
- le temps final  $t_{fi}$  mis par les piétons liés pour retrouver leur vitesses souhaitées
- le nombre total de contacts  $N_{contact}$  entre un piéton lié et le piéton libre lors de la rencontre.

La figure 3.13a. montre que la distance finale  $d_{fi}$  tend vers le diamètre du piéton libre lorsque  $K_V$  augmente, soit  $0.48 \text{ m}$ . Pour  $K_V < 1.8 \text{ kg m}^{-1}$ , le nombre de contact est  $N_{contact} = 1$ ,  $d_{fi}$  décroît et  $t_{fi}$  est constant. Pour  $K_V > 3.4 \text{ kg m}^{-1}$ ,  $N_{contact}$  et  $t_{fi}$  croissent linéairement et  $d_{fi} \simeq 0.48 \text{ m}$ . Ainsi, plus  $K_V$  est grand, plus la liaison entre les deux piétons liés est rigide, et donc plus le piéton libre a des difficultés pour traverser le sous-groupe.

### Comparaison des trois méthodes de formation des sous-groupes

Pour illustrer les atouts et faiblesses des trois approches permettant de former des sous-groupes, nous avons choisi de les comparer à l’aide d’un exemple numérique.

Un sous-groupe de trois piétons entre en collision avec un piéton isolé, puis se reforme. Les conditions initiales sont identiques pour les trois approches. Chaque ligne de la figure 3.14 correspond à une approche : celle de Moussaïd en haut, celle de Singh au milieu, et les piétons "liés" en bas. Nous remarquons que les approches de Moussaïd et Singh permettent au sous-groupe de retrouver sa configuration initiale en "V" après la collision, au contraire du sous-groupe formé des piétons liés qui perd son orientation. La ligne du haut met bien en évidence que le sous-groupe de Moussaïd se réorganise autour de son centre de masse. Dans la ligne du milieu, le sous-groupe se réorganise autour du leader de référence qui est le piéton du milieu. Celui ci s’étant déporté vers le haut à cause de la collision, le sous-groupe est décalé en conséquence. La ligne du bas montre une limite de l’approche piétons

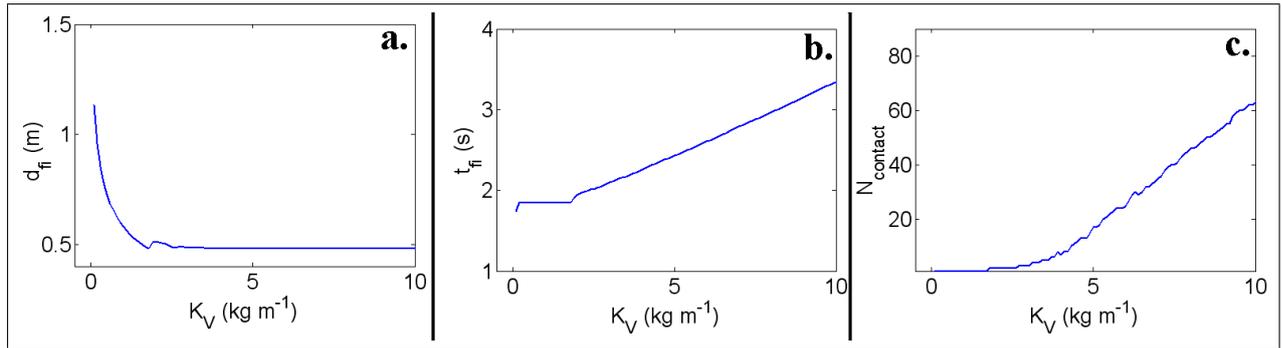


FIGURE 3.13 – Etude de trois paramètres après la rencontre “piétons liés - piéton libre” en fonction de la valeur de  $K_V$ , pour  $\tau = 0.5 \text{ s}$ ,  $h = 10^{-2} \text{ s}$  - a. la distance finale  $d_{fi}$  entre les piétons liés; b. le temps final  $t_{fi}$  mis par les piétons liés pour retrouver leurs vitesses souhaitées; c. le nombre total de contact  $N_{\text{contact}}$  entre un piéton lié et le piéton libre lors de la rencontre.

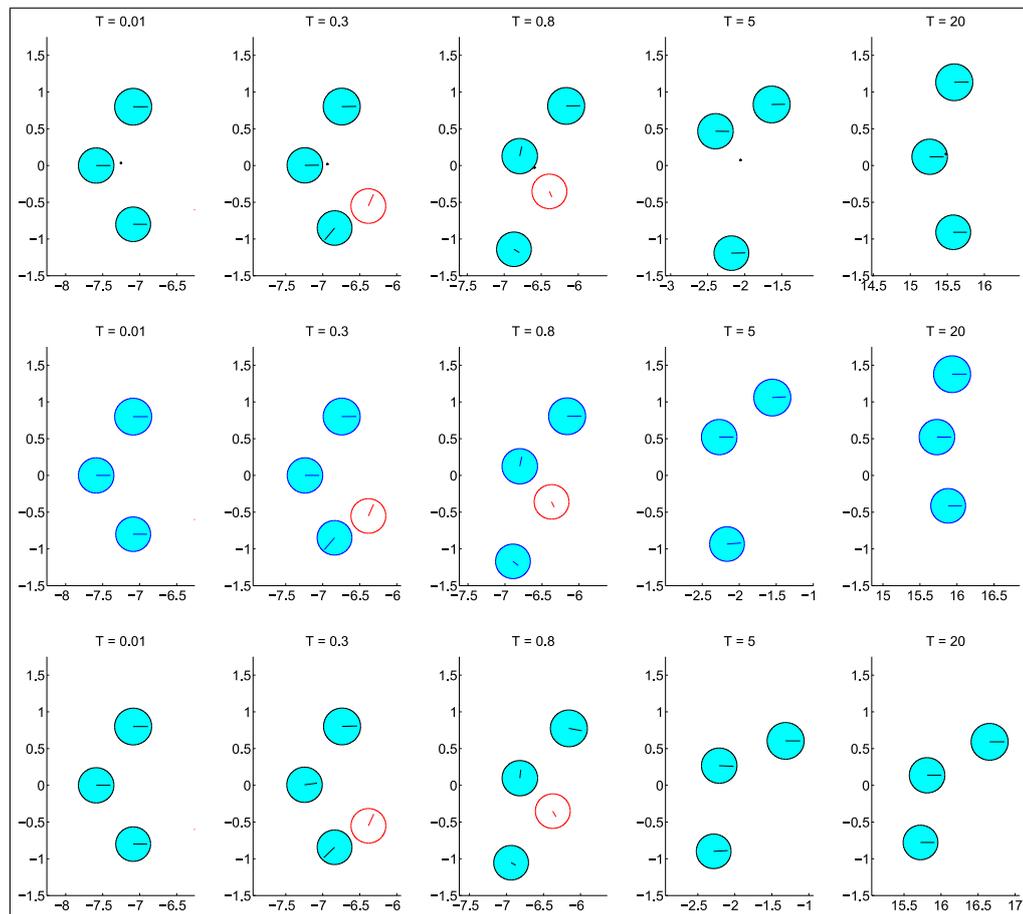


FIGURE 3.14 – Exemple d’un sous-groupe formé de trois personnes entrant en collision avec un piéton isolé - chaque ligne correspond à une approche : Moussaïd [23] en haut, Singh [22] au milieu, et piétons “liés” en bas.

“liés” telle que proposée : les interactions à distance se réalisant dans l’axe piéton-piéton, rien ne permet de réorganiser le sous-groupe. La prise en compte de la rotation des piétons

devrait permettre de contrôler l'organisation du sous-groupe, en plus de maîtriser la rigidité des liaisons entre membres du sous-groupe. Sinon, une solution hybride “modèle Moussaïd / piétons liés” ou “modèle Singh / piétons liés” pourrait être intéressante si l'on choisit de continuer de négliger la rotation des piétons sur eux-mêmes.

## 3.4 Synthèse du chapitre

Dans le chapitre, un comportement a été affecté à chaque piéton. Deux étapes sont nécessaires pour modéliser ce comportement. Dans la première obligatoire, une “volonté” de se déplacer dans une direction particulière avec une allure spécifique à chaque instant est déterminée pour chaque piéton. Une méthode de Fast Marching permet de définir la stratégie de déplacement du chemin le plus court, et donc la direction de la vitesse souhaitée. L'amplitude de la vitesse souhaitée est choisie dans la littérature. Cette vitesse souhaitée est ensuite introduite dans les approches de mouvement de particules à l'aide d'une force. Le modèle de mouvement de foule est alors créé.

La seconde étape permet de gérer les interactions à distance entre chaque piéton et son environnement proche, afin de rendre son comportement plus réaliste. Des forces sociales sont utilisées. Une approche originale permettant de former des sous groupes de piétons à l'aide d'un pseudo-potentiel de dissipation est proposée. Une comparaison des méthodes permettant de gérer les sous-groupes est réalisée.