HAL
open science

Analyse des micro-Doppler de cibles mobiles déformables en imagerie radar

Antoine Ghaleb

To cite this version:

Antoine Ghaleb. Analyse des micro-Doppler de cibles mobiles déformables en imagerie radar. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Télécom ParisTech, 2009. Français. NNT : . pastel-00634637

HAL Id: pastel-00634637

https://pastel.hal.science/pastel-00634637v1

Submitted on 21 Oct 2011

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

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

THESE

présentée pour obtenir le grade de

Docteur de Télécom ParisTech

Spécialité : Signal et Images

par :

Antoine GHALEB

Analyse des micro-Doppler de cibles mobiles déformables en imagerie radar

---

Soutenue le 9 Février 2009 devant le jury composé de

Président :

Walid Tabbara	Professeur - Supelec

Rapporteurs :

Emmanuel Trouvé	Professeur - Polytech'Savoie
René Garello	Professeur - Télécom Bretagne

Examinateurs :

Jean-Marie Nicolas	Professeur - Télécom ParisTech (Directeur de thèse)
Florence Tupin	Professeur - Télécom ParisTech
Luc Vignaud	Ingénieur de recherche - ONERA (Encadrant)
Jacques Blanc-Talon	Ingénieur de recherche - DGA

Invité :

François Le Chevalier	Directeur scientifique - Thales Systèmes Aéroportés

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ceux qui m'ont permis de mener à bien cette thèse à savoir la DGA pour son financement et l'ONERA pour m'avoir accueilli au sein du département Électromagnétisme et Radar.

Je remercie chaleureusement mes deux encadrants, Jean-Marie Nicolas et Luc Vignaud qui m'ont permis de réaliser ce travail. Même dans les moments de remise en question, ils n'ont jamais cessé d'être enthousiastes, ce qui m'a beaucoup aidé. Néanmoins, en dépit de leur grande perspicacité, je ne suis pas certain qu'ils aient prédit un tel déroulement. Ils acquiesceront certainement si je leur dis, excusez moi la formule, qu'on a souvent avancé au radar.

Je remercie sincèrement Emmanuel Trouvé et René Garello d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et d'avoir porté la plus grande attention à la lecture du document. En sollicitant René, je n'ai pas pensé une seule seconde que retentirait un jour le tonnerre de Brest.

Je remercie également gracieusement les autres membres du jury, Walid Tabbara, Florence Tupin, Jacques Blanc-Talon et François Le Chevalier de m'avoir fait l'honneur d'assister à ma soutenance.

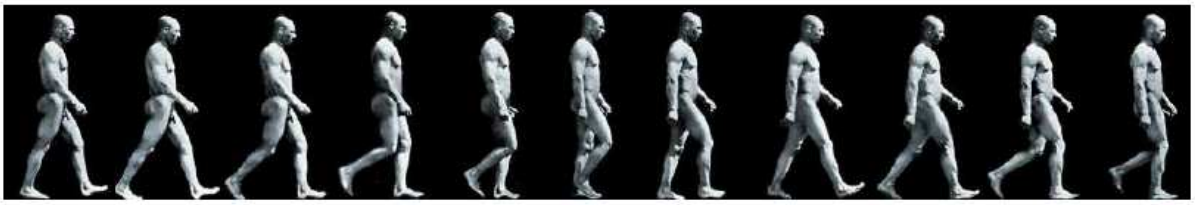
Je remercie expérimentalement Yoann Paichard et Julien Le Kernec pour leurs précieuses données sans lesquelles ce manuscrit ne ressemblerait plus à une bande dessinée.

Je voudrais saluer tous les collègues de l'unité TSI, les thésards, les stagiaires et le post-doc que j'ai côtoyés pendant 3 ans. Un grand merci également à Élisabeth Bertheau pour le soutien qu'elle apporte aux doctorants.

Enfin je remercie du fond du cœur ceux sur qui j'ai pu compter chaque jour : mes parents, Émilie, Pierre et Rafika - N'habek. Cette thèse leur est dédiée.

Sois heureux un instant. Cet instant c'est ta vie.

Omar Khayyâm



La marche humaine selon Eadweard Muybridge (1830-1904).

La marche humaine selon John Cleese (1939-).

Table des matières

Introduction **1**

1 Imagerie radar et effet micro-Doppler **5**

1.1 Principes du radar 6

1.1.1 Présentation et spécificités du radar 6

1.1.2 Une double localisation en distance et en Doppler 6

1.1.3 Modélisation du signal radar 7

1.1.4 Traitement en distance et en Doppler 8

1.2 Imagerie radar 11

1.2.1 Imagerie à ouverture de synthèse 12

1.2.2 Dimensions de l'image 13

1.3 Effet micro-Doppler 14

1.3.1 Définition 14

1.3.2 Signature micro-Doppler d'un réflecteur en rotation 16

1.3.3 Généralisation à N réflecteurs 19

1.3.4 Modélisation d'un rotor d'hélicoptère 20

1.3.5 Travaux autour de l'effet micro-Doppler 22

2 Du système de mesure à la formation d'images **25**

2.1 HYCAM : un radar imageur haute résolution 26

2.1.1 Description du système de mesure 26

2.1.2 Forme d'onde du radar HYCAM 28

2.2 Protocole expérimental 30
2.2.1 Géométrie de la scène 31
2.2.2 Configuration du radar 33
2.2.3 Enregistrement du signal 33
2.3 Traitement des données HYCAM 34
2.3.1 Calcul des coefficients de rétrodiffusion 34
2.3.2 Calibrage 35
2.3.3 Étalonnage 35
2.3.4 « Soustraction de chambre » 37
2.3.5 Suppression des échos fixes 37
2.3.6 Formation des images 38
2.4 Apport d'un outil de simulation 39
2.4.1 Hypothèses du modèle 39
2.4.2 Modélisation du signal reçu 40

3 Analyse du mouvement d'une roue 43

3.1 Trajectoire des points d'une roue 44
3.1.1 Histoire de la cycloïde 44
3.1.2 Equation paramétrique de la cycloïde 44
3.2 Vitesse absolue 45
3.2.1 Rotation sans roulement 48
3.2.2 Roulement sans glissement 48
3.3 Vitesse radiale 49
3.3.1 Changement de repère 50
3.3.2 Vitesse radiale 51
3.3.3 Etude analytique des vitesses radiales extrêmes 55
3.4 Extraction de caractéristiques 58

4 Imagerie radar de la roue 61

4.1 Données réelles et données simulées 62
4.1.1 Acquisitions de données réelles 62
4.1.2 Données simulées 63
4.2 Analyse des résultats 64
4.2.1 Rotation sans roulement 65
4.2.2 Roulement sans glissement 73

5 Analyse du mouvement d'un piéton 81

5.1 Définitions et caractéristiques du mouvement 82
5.1.1 Phases du mouvement 82
5.1.2 Caractéristiques du cycle de locomotion 84
5.2 Synthèse du mouvement d'un piéton 85
5.2.1 Historique 85
5.2.2 Utilisation d'un système de capture de mouvement 87
5.3 Analyse cinématique du mouvement 90
5.3.1 Position 91
5.3.2 Vitesse 92
5.3.3 Accélération du pied 94
5.3.4 Dispersion des vitesses à un instant donné 95
5.4 Modélisation empirique du mouvement 96
5.4.1 Marche 97
5.4.2 Course 100
5.4.3 Remarques sur la modélisation 101

6 Le piéton vu par un radar 103

6.1 Introduction 104
6.1.1 Travaux effectués sur l'analyse du Doppler du piéton 104
6.1.2 Apport de la thèse 105
6.2 Analyse des données du modèle de piéton 106

6.2.1 Vitesse radiale des différentes parties du corps 106

6.2.2 Imagerie radar à partir des données simulées 111

6.2.3 Conclusions sur les simulations 138

6.3 Analyse des données réelles 138

6.3.1 Une campagne d'acquisition sur mesure 138

6.3.2 Résultats 140

6.4 Conclusion sur l'analyse d'un piéton 162

Conclusions et perspectives **163**

Bibliographie **169**

Introduction

La détection et la reconnaissance de cibles sont des enjeux majeurs, que ce soit un cadre militaire ou dans le domaine civil. La télédétection désigne l'ensemble des solutions qui permettent d'étudier un phénomène à distance. Parmi elles, il existe l'imagerie radar dont le principe est d'émettre une onde électromagnétique et d'analyser l'écho renvoyé dans le but de former une image. Le radar présente des particularités qui le rendent particulièrement intéressant par rapport aux autres instruments de mesures. Il possède sa propre source d'illumination (capteur actif), ce qui lui donne la possibilité de fonctionner de jour comme de nuit, contrairement aux instruments optiques qui dépendent d'une source d'illumination externe (capteurs passifs). En outre, le signal est émis dans une gamme de fréquences lui permettant d'être peu sensible aux conditions atmosphériques. L'onde peut ainsi traverser les nuages, la pluie, le brouillard, la neige ou le sable sec.

D'abord utilisé pour détecter et localiser des cibles à grande distance, le radar a ensuite été exploité pour réaliser des images. La résolution en distance est obtenue en émettant un signal bref, donc large bande tandis que la résolution transverse, assujettie aux lois de la diffraction, est inversement proportionnelle à la dimension du capteur. Or aux longueurs d'ondes radioélectriques, la taille effective de l'antenne ne permet pas d'obtenir une résolution satisfaisante. L'imagerie radar à synthèse d'ouverture (SAR [1] ou ISAR [2] suivant la configuration retenue) consiste à exploiter le mouvement relatif entre le radar et la cible pour simuler une antenne de grande dimension et ainsi améliorer la résolution transverse.

En imagerie SAR, le radar est mobile et la scène est fixe. En imagerie ISAR, le radar est fixe et le mouvement de la cible permet de reconstituer la carte des réflecteurs de la scène, en distance et en Doppler. Traditionnellement, les méthodes de formation d'images ISAR supposent que la cible est rigide et ne tiennent pas compte de ses déformations géométriques. Le mouvement des roues, des pales d'hélicoptère, des turbines d'avions, les vibrations d'une structure sont les déformations les plus courantes. De même, le piéton est un cas d'étude puisque le balancement des bras et des jambes est indépendant du reste du corps.
Ces mouvements, qui s'ajoutent au déplacement global de la cible, créent une modulation en fréquence sur le signal réfléchi. Ce phénomène est appelé effet micro-Doppler et se traduit sur le spectre Doppler par un étalement des fréquences autour de la fréquence Doppler centrale

1. Synthetic Aperture Radar
2. Inverse Synthetic Aperture Radar

associée au déplacement global de la cible.

De nombreuses études ont été réalisées sur l'effet micro-Doppler depuis une dizaine d'années. Elles ont permis de mieux comprendre les mécanismes qui en sont à l'origine et d'analyser les conséquences dans la formation des images radar. Introduit par Parker [Park-92] et Zediker [Zedi-98] sous le nom de modulation Doppler, le phénomène est appliqué au radar par Chen [Chen-00]. Il est baptisé « effet micro-Doppler » car il est créé par les micro-mouvements d'une cible. Chen a proposé une modélisation mathématique du phénomène micro-Doppler induit par des structures en vibration ou en rotation. Avec lui, d'autres auteurs [Li-02, Spar-03, Thaya-04] ont étudié ce sujet. Ils ont notamment utilisé des procédés temps fréquence permettant d'extraire les micro-Doppler dans le signal réfléchi.

Parfois considéré comme un artefact lors de la formation d'image, l'effet micro-Doppler peut apporter des informations sur la structure de la cible et ainsi être utilisé pour la reconnaissance de cibles mobiles. Les caractéristiques des micro-Doppler sont propres à chacune des cibles puisque la modulation du signal reçu est directement reliée aux propriétés géométriques et dynamiques des micro-structures de la cible. Il est donc possible d'étudier l'interaction entre le signal et les parties mobiles de la cible à travers l'analyse de l'effet micro-Doppler. Ce dernier peut ainsi être vu comme une signature et fournir des informations complémentaires aux méthodes de reconnaissance déjà existantes.

D'un point de vue applicatif, des études ont été menées pour caractériser la démarche d'un piéton [Geish-01, Geish-02, Otero-05, Dorp-03]. En étudiant la variation de la fréquence Doppler au cours du temps, elles ont permis de remonter aux caractéristiques de la marche telles que l'allure ou la longueur d'une foulée. L'ensemble de ces démarches apporte une meilleure compréhension du phénomène et propose des outils de traitement du signal pour l'analyser. Les études sur le piéton sont également très prometteuses en raison de la constante augmentation des besoins dans le domaine de la sécurité et de la surveillance.

Dans tous les articles relatifs à l'effet micro-Doppler, aucun accent n'est mis sur la dimension spatiale du phénomène. L'analyse est faite uniquement sur la variation du Doppler au cours du temps, par des techniques temps-fréquence. En outre, la plupart des études sont basées sur des modèles théoriques et des simulations mais les données expérimentales sont encore rares.

Or il se trouve que pour répondre à une demande croissante de systèmes de mesure à haute résolution, l'ONERA [3] a développé un radar numérique large bande nommé HYCAM [Paich-07]. Ce dispositif est unique puisqu'il permet de mesurer, avec une résolution de 20 cm, la SER [4] de cibles qui varient rapidement aux cours du temps, en émettant un signal large bande sur un temps très court. Ces caractéristiques font que le radar HYCAM est particulièrement adapté pour étudier en deux dimensions (distance-Doppler) la structure de l'effet micro-Doppler induit par les déformations géométriques de cibles mobiles.

3. Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
4. Section Efficace Radar

C'est dans ce contexte que nous avons mené cette étude. Il s'agit de mettre en évidence les phénomènes mis en jeu lors de l'interaction d'un signal radar avec les parties déformables d'une cible mobile. Le but est de remonter aux caractéristiques de la cible à partir de sa signature micro-Doppler. Les travaux se sont organisés autour de deux applications : l'étude des roues et des piétons.

Cette thèse s'articule autour de six chapitres.

Les deux premiers chapitres exposent les bases nécessaires à la compréhension du manuscrit :

- le **chapitre 1** rappelle les principes généraux de l'imagerie radar et propose une revue des travaux sur l'effet micro-Doppler.
- le **chapitre 2** aborde l'aspect expérimental de la thèse depuis la description du radar HYCAM jusqu'au processus de formation d'image.

Les deux chapitres suivants sont consacrés à l'étude de la roue :

- le **chapitre 3** étudie la cinématique des points d'une roue afin de modéliser le Doppler réfléchi par l'ensemble des points d'une roue en fonction de sa position par rapport au radar.
- le **chapitre 4** traite de l'extraction est de l'interprétation des propriétés de la signature micro-Doppler d'une roue et d'un ventilateur, à travers l'analyse conjointe de données réelles et de données simulées.

Les deux derniers chapitres sont dédiés à l'étude du piéton :

- le **chapitre 5** permet de comprendre les bases du mécanisme de la marche et de la course. Grâce à un modèle de piéton obtenu par un système de capture de mouvement, nous avons étudié la cinématique des principales parties du corps. Pour pouvoir analyser l'image radar d'un piéton, il est important de comprendre comment l'onde électromagnétique interagit avec les différentes parties du piéton en mouvement. Cela nécessite de connaître le mouvement de chacune des parties du corps.
- le **chapitre 6** vise à comparer les images obtenues à partir de données simulées et les images issues des données réelles. Il permet de comprendre comment est formée l'image résultante de l'interaction d'un signal radar avec un piéton en mouvement.

Chapitre 1

Imagerie radar et effet micro-Doppler

Avec les mots, on marque le mouvement,
avec les images, on le fixe.

Louis Scutenaire

Sommaire

1.1 Principes du radar 6
1.1.1 Présentation et spécificités du radar 6
1.1.2 Une double localisation en distance et en Doppler 6
1.1.3 Modélisation du signal radar 7
1.1.4 Traitement en distance et en Doppler 8
1.2 Imagerie radar 11
1.2.1 Imagerie à ouverture de synthèse 12
1.2.2 Dimensions de l'image 13
1.3 Effet micro-Doppler 14
1.3.1 Définition 14
1.3.2 Signature micro-Doppler d'un réflecteur en rotation 16
1.3.3 Généralisation à N réflecteurs 19
1.3.4 Modélisation d'un rotor d'hélicoptère 20
1.3.5 Travaux autour de l'effet micro-Doppler 22

1.1 Principes du radar

1.1.1 Présentation et spécificités du radar

Le radar est un appareil émettant et recevant des ondes électromagnétiques. Il est utilisé pour localiser des objets dans l'espace et déterminer leur distance. Le terme RADAR, acronyme, de « Radio Detection And Ranging » a été adopté au cours de la Seconde Guerre mondiale par l'US Navy.
Les appareils de ce type n'indiquent pas seulement la présence et la distance d'un objet éloigné, mais déterminent également sa position dans l'espace, sa taille, sa forme ainsi que sa vitesse et sa direction. Mis au point à l'origine comme instrument militaire, le radar est aujourd'hui également utilisé dans des domaines comme la navigation, le contrôle du trafic aérien, la météorologie, la radioastronomie...

A l'inverse des systèmes optiques, les radars sont des capteurs actifs : ils disposent de leur propre source d'illumination. Les conditions d'utilisation sont donc indépendantes des conditions de luminosité (heure du jour, saison).
Du fait que les longueurs d'onde utilisées sont considérablement plus grandes que celles du domaine visible, l'onde est très peu sensible à l'état des couches atmosphériques traversées (nuages, humidité, pluie, neige ...). Il est donc utilisable par tous temps. Pour les plus basses fréquences, l'onde radar est susceptible de pénétrer certaines couches de surface tels que des forêts ou du sable sec.

Toutes ces caractéristiques en font un instrument complémentaire aux dispositifs optiques, particulièrement adapté aux applications militaires, à l'étude du relief et à la cartographie.

1.1.2 Une double localisation en distance et en Doppler

Si le signal émis par le radar est une sinusoïde pure de fréquence f_0, la phase du signal reçu par le radar, après réflexion sur un réflecteur à la distance $r(t)$ s'écrit :

$$\phi_r(t) = 2\pi f_0 t + \phi(t) \tag{1.1}$$

où $\phi(t)$ est le déphasage lié à au trajet aller-retour de l'onde, que l'on peu associer à un retard τ :

$$\phi(t) = 2\pi f_0 \frac{2r(t)}{c} = 2\pi f_0 \tau \tag{1.2}$$

La distance de la cible est mesurée en estimant le retard τ entre le signal émis et le signal réfléchi.

$$r(t) = D = \frac{c\tau}{2}$$

Lorsque la cible est immobile, cette distance D est constante. Lorsque la cible est mobile, le déphasage du signal reçu varie. La fréquence Doppler est définie comme la variation du déphasage

du signal reçu et s'exprime :

$$f_d = \frac{1}{2\pi}\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{2f_0}{c}V \tag{1.3}$$

où

$$V = \frac{dr(t)}{dt}$$

est la vitesse radiale du réflecteur par rapport au radar. La fréquence instantanée du signal est alors :

$$f_i = f_0 + f_d$$

La fréquence Doppler est positive lorsque le réflecteur se rapproche du radar, négative lorsqu'il s'éloigne.

La fréquence Doppler est donc proportionnelle à la vitesse radiale qui peut donc être mesurée grâce à l'effet Doppler.

$$V = \frac{cf_d}{2f_0} \tag{1.4}$$

1.1.3 Modélisation du signal radar

La modélisation du signal radar se fait dans le cas d'un système monostatique, ce qui signifie que l'émetteur et le récepteur sont situés au même endroit.

1.1.3.1 Pour un réflecteur fixe

Le signal émis par le radar s'écrit :

$$s_e(t) = u(t)\ e^{j2\pi f_0 t} \tag{1.5}$$

où $u(t)$ est le signal émis en bande de base et f_0 la fréquence de la porteuse.

Supposons que ce signal soit réfléchi par une cible ponctuelle, de réflectivité α, située à une distance D du radar. Le signal reçu est alors proportionnel au signal émis et retardé de τ, c'est à dire le temps de parcours mis par l'onde pour effectuer l'aller et retour entre le radar et la cible. Il s'écrit :

$$s_r(t) = \alpha\ s_e(t-\tau) = \alpha\ u(t-\tau)\ e^{j2\pi f_0(t-\tau)} \tag{1.6}$$

avec

$$\tau = \frac{2D}{c}$$

Considérons une scène composée de N réflecteurs de réflectivité α_i $(i = 1, 2, .., N)$, situés aux distances D_i $(i = 1, 2, .., N)$. Le signal reçu est la somme des contributions apportées par les N réflecteurs élémentaires. Il s'écrit :

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\ s_e(t-\tau_i) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\ u(t-\tau_i)\ e^{j2\pi f_0(t-\tau_i)} \tag{1.7}$$

avec

$$\tau_i = \frac{2D_i}{c}$$

1.1.3.2 Pour un réflecteur mobile

Soient V la vitesse radiale du réflecteur et $\tau(t)$ la durée aller-retour du signal reçu à l'instant t par le radar. Le réflecteur se situe à une distance :

$$D(t) = D_0 + Vt$$

La distance $D(t)$ doit vérifier :

$$c\tau(t) = 2D\left(t - \frac{\tau(t)}{2}\right)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\tau(t) = 2\ \frac{D_0 + Vt}{c + V}$$

Le signal reçu s'écrit alors :

$$s_r(t) = \alpha\ s_e\left(\frac{c - V}{c + V}\ t - \frac{2D_0}{c}\right) \tag{1.8}$$

En faisant l'hypothèse que la vitesse de la cible est très inférieure à la vitesse de la lumière, $v \ll c$, il est possible de faire l'approximation suivante :

$$\frac{c - V}{c + V} = 1 - \frac{2V}{c}$$

Le signal reçu (1.8) s'écrit :

$$s_r(t) = \alpha\ u(t - \tau_0)\ e^{j2\pi f_0(t-\tau)}\ e^{-j2\pi f_d t} \tag{1.9}$$

avec :

$$\begin{cases} \tau_0 = \dfrac{2D_0}{c} \\ \\ f_d = \dfrac{2V}{c} f_0 \end{cases}$$

1.1.4 Traitement en distance et en Doppler

1.1.4.1 Traitement en distance (cibles immobiles)

Supposons que chaque réflecteur i soit situé à une distance $D_i = \dfrac{c\tau_i}{c}$. Le signal reçu $s_r(t)$ s'écrit 1.7 :

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\ s_e(t - \tau_i) \tag{1.10}$$

et sa transformée de Fourier :

$$S_r(f) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\ S_e(f)\ e^{-j2\pi f \tau_i} \tag{1.11}$$

$S_e(f)$ étant la transformée de Fourier du signal émis $s_e(t)$.

Le traitement en distance consiste à corréler le signal reçu par des répliques adaptées à la distance $d = \frac{c\tau}{2}$. La corrélation s'écrit :

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_r(t)\ s_e^{\star}(t-\tau)\ dt \tag{1.12}$$

soit dans le domaine fréquentiel, en utilisant l'équation 1.11 :

$$\tilde{R}(f) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\ |S_e(f)|^2\ e^{-j2\pi f \tau_i} \tag{1.13}$$

Finalement, en repassant dans le domaine temporel, l'équation 1.13 devient :

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{R}(f)\ e^{j2\pi f \tau} df = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \int_{-\infty}^{\infty} |S_e(f)|^2\ e^{j2\pi f(\tau-\tau_i)}\ df \tag{1.14}$$

Si le spectre du signal est à bande infinie et $|S_e(f)|^2$ est constant pour $f \in [-\infty, \infty]$, alors :

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\ \delta(\tau - \tau_i)$$

La distribution temporelle des réflecteurs est une somme d'impulsions de Dirac.

Si le spectre du signal est à bande limitée et $|S_e(f)|^2$ est constant pour $f \in [-B/2, B/2]$, alors :

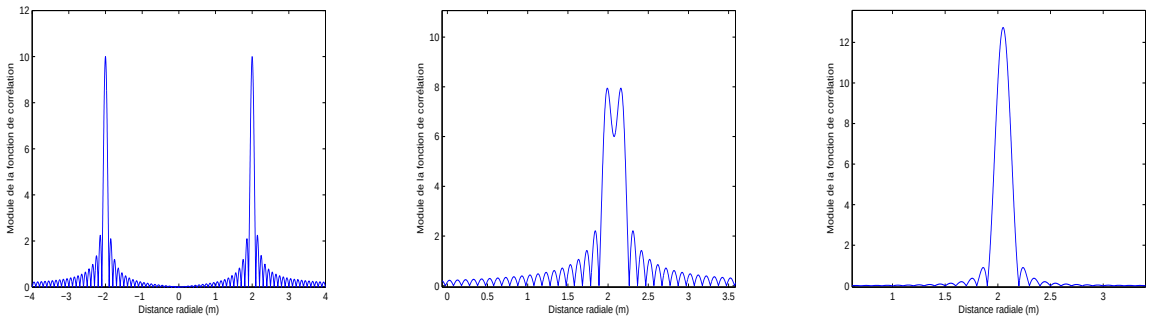
$$R(\tau) = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \tilde{R}(f)\ e^{j2\pi f \tau} df = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i\ B \frac{\sin \pi B(\tau - \tau_i)}{\pi B(\tau - \tau_i)}$$

La résolution en radar est caractérisée comme la possibilité de pouvoir séparer en distance deux réflecteurs i et j identiques ($\alpha_i = \alpha_j$). Elle est définie par la largeur à $-3\ dB$ du lobe principal de $R(\tau)$, soit :

$$\delta\tau = \frac{1}{B} \Leftrightarrow \delta x = \frac{c}{2B} \tag{1.15}$$

La résolution est donc inversement proportionnelle à la bande B du signal émis.

La figure 1.1 met en évidence le pouvoir de résolution, par la simulation du profil distance de 2 réflecteurs, en fonction de la distance qui les sépare. Pour une résolution théorique de 10 cm (équation 1.14), les deux réflecteurs sont résolus sur la figure de gauche (distance entre réflecteurs : 4 m), presque indiscernables sur la figure centrale (distance entre réflecteurs : 20 cm), non résolus sur la figure de gauche (distance entre réflecteurs : 10 cm).



(a) Distance : 4 m (b) Distance : 20 cm (c) Distance : 10 cm

FIGURE 1.1 – Profils distance de 2 réflecteurs avec une résolution $\delta x = 10$ cm

1.1.4.2 Traitement en Doppler (cibles mobiles)

Supposons maintenant que les cibles soient mobiles et que chaque réflecteur i ait une fréquence Doppler f_i. Le signal reçu $s_r(t)$ s'écrit :

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \; s_e(t) \; e^{j2\pi f_i t} \tag{1.16}$$

et sa transformée de Fourier :

$$S_r(f) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \; S_e(f - f_i) \tag{1.17}$$

Le traitement en Doppler consiste à corréler le spectre du signal reçu par des répliques adaptées à la fréquence f_d. La corrélation s'écrit :

$$\tilde{R}(f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} S_r(f) \; S_e^{\star}(f - f_d) \; df \tag{1.18}$$

soit dans le domaine temporel, en utilisant l'équation 1.17 :

$$R(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \; |s_e(t)|^2 \; e^{-j2\pi f_i t} \tag{1.19}$$

Finalement, en repassant dans le domaine fréquentiel, l'équation 1.19 devient :

$$\tilde{R}(f_d) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \int_{-\infty}^{\infty} |s_e(t)|^2 \; e^{j2\pi(f_d - f_i)t} \; dt \tag{1.20}$$

Si le temps d'analyse est de durée infinie et si $|s_e(t)|^2$ a une enveloppe constante pour $t \in [-\infty, \infty]$, alors :

$$\tilde{R}(f_d) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \; \delta(\tau - \tau_i)$$

La distribution des réflecteurs est une somme d'impulsions de Dirac et la résolution du Doppler tend vers zéro.

Si le temps d'analyse est de durée finie et $|s_e(t)|^2$ est constant pour $t \in [-T/2, T/2]$, alors :

$$\tilde{R}(f_d) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \, T \frac{\sin \pi T(f_d - f_i)}{\pi T(f_d - f_i)}$$

Comme pour le traitement en distance, la résolution en Doppler est définie comme la largeur à $-3\ dB$ du lobe principal de $\tilde{R}(f_d)$, soit :

$$\delta f_d = \frac{1}{T} \Leftrightarrow \delta V = \frac{c}{2 f_0 T} \tag{1.21}$$

La résolution en Doppler est donc inversement proportionnelle au temps d'analyse T.

1.2 Imagerie radar

La combinaison de l'analyse en distance et en Doppler permet de constituer des images radar bi-dimensionnelles.
La figure 1.2 décrit une barre en rotation dans le plan, composée de 5 réflecteurs ponctuels, et dont le centre de rotation est immobile et sur l'axe de visée du radar. Dans cette configuration, la barre peut être représentée dans le plan distance-Doppler, puisque les points ont une distance et une vitesse radiale différente vis à vis du radar.

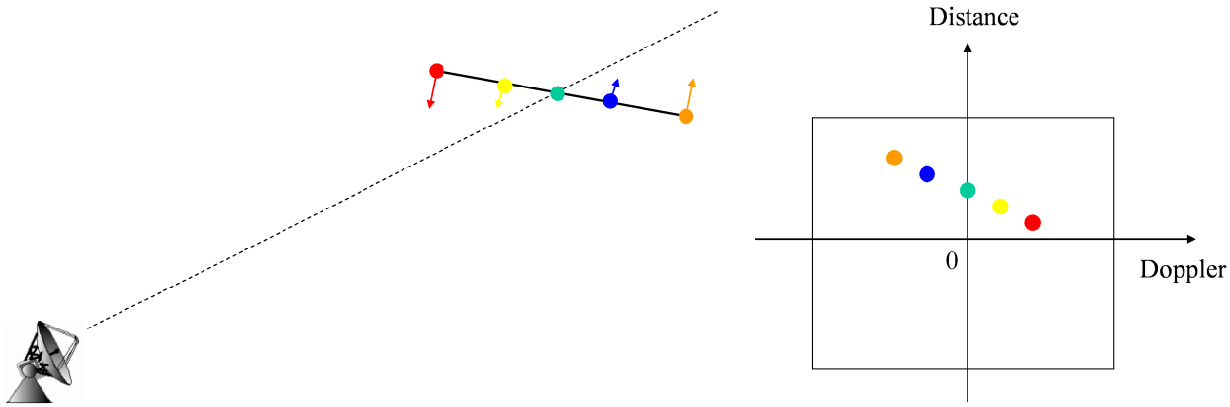


FIGURE 1.2 – Représentation distance-Doppler d'une barre en rotation

La dimension en Doppler permet de déduire la distance transverse si la rotation de la cible est connue. La figure 1.3 décrit la rotation d'un réflecteur par rapport au radar. Soient Ω la vitesse de rotation et R_0 la distance entre le centre de rotation et le radar. Pour un point situé à une distance d du centre de rotation, et en champ lointain ($R_0 \gg d$), la distance qui sépare le réflecteur du radar s'écrit :

$$r(t) = R_0 + d \sin\theta = R_0 + d \sin \Omega t \tag{1.22}$$

La fréquence Doppler s'écrit :

$$f_d = \frac{2 f_0}{c} \Omega d \cos \Omega t \tag{1.23}$$

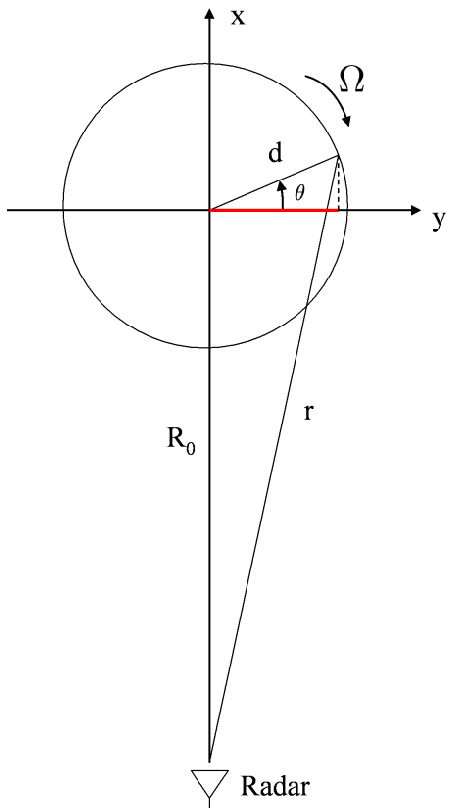


FIGURE 1.3 – Rotation d'un point par rapport au radar

En posant $y = d \cos \Omega t$, la distance transverse y s'exprime en fonction de la fréquence Doppler.

$$y = \frac{c f_d}{2 f_0 \Omega} \tag{1.24}$$

1.2.1 Imagerie à ouverture de synthèse

La qualité de l'image est notamment déterminée par sa résolution, à savoir la capacité de séparer plusieurs réflecteurs identiques proches les uns de autres. La résolution en distance est fixée par la largeur de bande du signal émis. La résolution en Doppler est obtenue en exploitant l'ouverture synthétique de l'antenne générée par le mouvement relatif entre la cible et le radar.

Lorsque la cible est fixe et le radar mobile, le processus est appelé SAR (*Synthetic Aperture Radar*) ou RSO (*Radar à Synthèse d'Ouverture*). Inversement, le processus est appelé ISAR (*Inverse Synthetic Aperture Radar*) ou RSOI (*Radar à Synthèse d'Ouverture Inverse*) lorsque le radar est fixe et la cible mobile. Dans chacun des cas, le traitement effectué permet d'affiner l'ouverture de l'antenne dont les dimensions ne permettent pas d'obtenir des résolutions satisfaisantes aux longueurs d'onde utilisées. C'est de là que provient la terminologie synthèse d'ouverture. Les principaux travaux en imagerie ISAR on été effectués par [Chen-80, Walk-80, Wehn-87, Li-90, Carr-91, Mens-91, Vign-96].

Le traitement en distance et en Doppler que nous avons utilisé s'inspire de l'imagerie ISAR.

Dans le mode inverse, la résolution transverse est obtenue en exploitant le mouvement de rotation de la cible par rapport au radar.

L'holographie radar est un cas particulier de l'ISAR, dont le principe consiste à reconstituer l'image de la cible après l'avoir mesurée sous plusieurs orientations et dans une gamme de fréquences donnée.
Le calcul des coefficients de rétrodiffusion de la cible $H(f,\theta)$ pour chaque fréquence f, $f \in \left[f_0 - \frac{\Delta f}{2}; f_0 + \frac{\Delta f}{2}\right]$ et sous plusieurs orientations θ permet de calculer l'image $I(x,y)$ par l'expression [Vign-96] :

$$I(x,y) = \left| \sum_f \sum_\theta H(f,\theta)\ e^{-4j\pi f x/c}\ e^{-4j\pi f_0 y\theta/c} \right|^2 \tag{1.25}$$

à condition que la bande du signal émis soit faible devant la fréquence d'émission ($\Delta f/f_0 \ll 1$) et dans l'hypothèse où l'exploration angulaire $\Delta\theta$ est faible.

Les dimensions maximales de la scène sont définies par l'ambiguïté sur la mesure. L'ambiguïté en distance Δx est inversement proportionnelle au pas δf entre les fréquences. De même, l'ambiguïté transverse Δy est inversement proportionnelle au pas angulaire $\delta\theta$.

Cette approche peut également être faite sous forme d'une analyse Doppler.
En posant :

$$y = \frac{c f_d}{2 f_0 \Omega} \quad \text{et} \quad \theta = \Omega t$$

l'expression 1.25 devient :

$$I(x,f_d) = \left| \sum_f \sum_t H(f,t)\ e^{-4j\pi f x/c}\ e^{-2j\pi f_d t} \right|^2 \tag{1.26}$$

où la distance x est obtenue à partir du centre de phase de la cible.

Le calcul de l'image distance Doppler s'écrit sous la forme simplifiée d'une transformée de Fourier 2D dont les variables duales sont $x \leftrightarrow \frac{2f}{c}$ et $f_d \leftrightarrow t$. La première transformée permet de calculer l'ensemble des profils distance (ou réponses impulsionnelles) tandis que la deuxième réalise une analyse Doppler sur chacune des cases distance.

1.2.2 Dimensions de l'image

L'ambiguïté en distance est fixée par le pas entre les fréquences du signal émis :

$$\Delta x = \frac{c}{2\delta f} \tag{1.27}$$

La résolution en distance est fixée par la largeur de bande du signal émis :

$$\delta x = \frac{c}{2\Delta f} \tag{1.28}$$

L'ambiguïté en Doppler est fixée par le temps entre les mesures successives du signal émis. Le théorème de Nyquist-Shannon énonce que la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal. Selon la fréquence Doppler du phénomène observée, il faudra choisir le pas de temps adéquat afin d'éviter le repliement des fréquences.

$$\Delta f_d = \frac{1}{T_e} \tag{1.29}$$

La résolution en Doppler est fixée par le temps d'intégration :

$$\delta f_d = \frac{1}{\Delta T} \tag{1.30}$$

Plus le temps d'intégration est long, plus l'analyse en fréquence est fine mais plus le risque de défocalisation est important. En effet, l'analyse Doppler suppose que la fréquence Doppler reste constante durant le temps d'intégration, ce qui n'est pas le cas lorsque les variations de la cible sont rapides. Il s'agit donc de faire un compromis entre la résolution en Doppler et la stationnarité du phénomène.

La vitesse radiale étant proportionnelle à la fréquence Doppler, l'ambiguïté ΔV et la résolution δV en vitesse sont données par :

$$\Delta V = \frac{c}{2 f_0 T_e} \tag{1.31}$$

$$\delta V = \frac{c}{2 f_0 \Delta T} \tag{1.32}$$

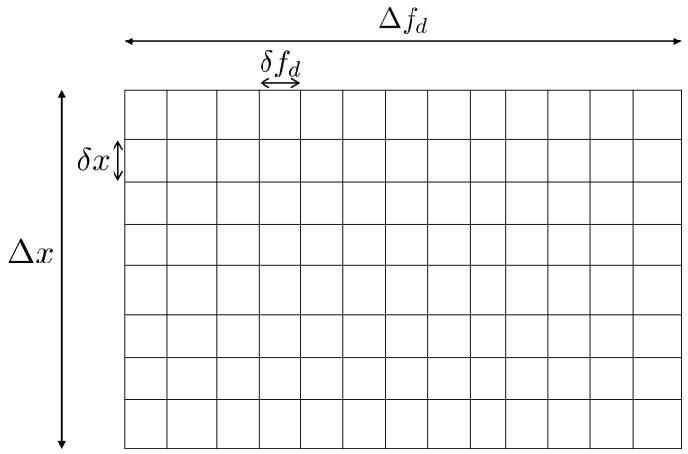


FIGURE 1.4 – Ambiguïté et résolution en distance et en Doppler

1.3 Effet micro-Doppler

1.3.1 Définition

Lorsqu'un objet présente des déformations en plus de son déplacement global, le signal radar réfléchi est modulé en fréquence. En effet, comme les parties déformables ont des vitesses radiales

différentes de la vitesse de déplacement de la cible, cela se traduit sur le spectre Doppler par un étalement des fréquences autour de la fréquence Doppler centrale. Dans la littérature cette modulation en fréquence est appelée effet micro-Doppler. Les premiers à introduire la modulation Doppler sont Parker et al. [Park-92] et Zediker et al. [Zedi-98]. D'abord utilisé dans les systèmes LIDAR, le principe est étendu puis généralisé en radar par Chen et al. [Chen-00, Chen-02, Chen-03, Chen-06].

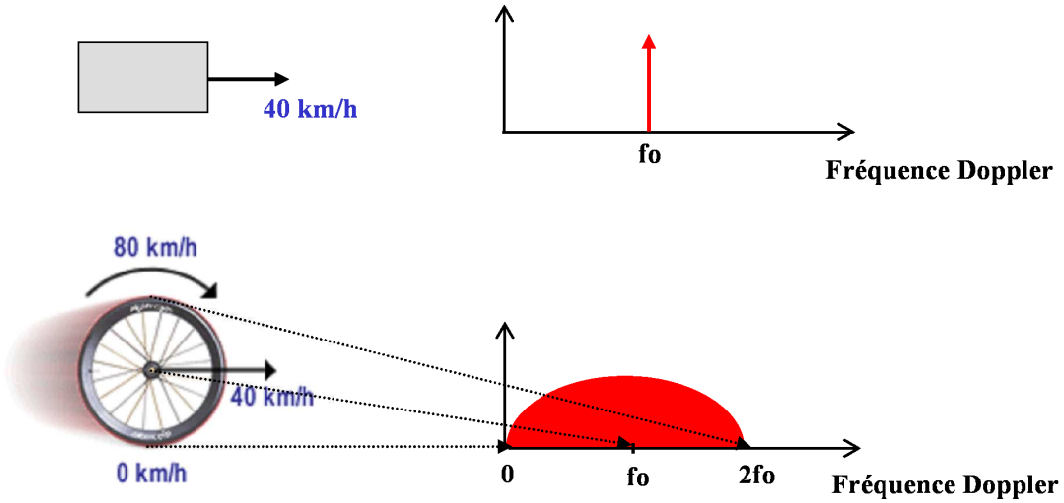


FIGURE 1.5 – Mise en évidence de l'effet micro-Doppler : cible en translation (en haut), cible en translation + rotation (en bas)

Les mouvements à l'origine de l'effet micro-Doppler sont d'origines diverses. Les plus fréquemment rencontrés sont les rotations des roues, des pales d'hélicoptères, des antennes tournantes, des turbines d'avions, les vibrations d'une structure... Le mouvement des piétons est également intéressant dans la mesure où les bras et les jambes ont un mouvement propre, distinct de celui du corps.
La figure 1.5 met en évidence la différence entre le spectre Doppler d'une cible rigide et celui d'une cible en rotation.

Les caractéristiques des micro-Doppler sont propres à chacune des cibles. La modulation du signal reçu est directement reliée au mouvement et à la géométrie des micro-structures de la cible. A travers l'analyse de l'effet micro-Doppler, il est donc possible d'étudier l'interaction entre le signal et les parties déformables de la cible. Il devient ainsi envisageable de remonter aux propriétés géométriques et dynamiques de la cible à partir de son spectre Doppler. Le micro-Doppler de la cible peut ainsi être vu comme une signature et fournir des informations complémentaires aux méthodes de reconnaissance déjà existantes.

Les travaux sur les micro-Doppler se sont accrus ces dernières années. Ils portent principalement sur l'utilisation d'ondelettes et d'analyse temps fréquence pour extraire les micro-Doppler dans le signal réfléchi [Chen-06, Chen-00, Chen-02, Chen-03, Li-02, Spar-03, Thaya-04, Thaya-07, Thaya-08].

1.3.2 Signature micro-Doppler d'un réflecteur en rotation

Dans ses travaux [Chen-00, Chen-02, Chen-06], Chen a proposé une description mathématique du phénomène micro-Doppler induit par une structure en vibration ou en rotation.
En radar, une petite variation de la distance d'un réflecteur peut changer la phase du signal rétrodiffusé. Une variation en distance [1] d'une demi longueur d'onde entraîne une variation de phase de 360°. En bande X ($f_0 = 10$ GHz), cela correspond à une distance de $1,5$ cm. Par conséquent, le mouvement d'un réflecteur peut être mesuré par le changement de la phase, tant que ce mouvement n'excède pas la demi longueur d'onde. La fréquence Doppler qui représente la variation de la phase au cours du temps peut être utilisée pour étudier les vibrations ou les rotations de structures de cibles.

Modélisation du signal temporel :
Pour commencer, intéressons nous à la modélisation d'un signal radar modulé par la rotation d'un seul réflecteur, l'axe de rotation étant perpendiculaire au sol (plan Oxy) .
La figure 1.6 illustre la configuration qui définit la position du centre de rotation par rapport au radar.

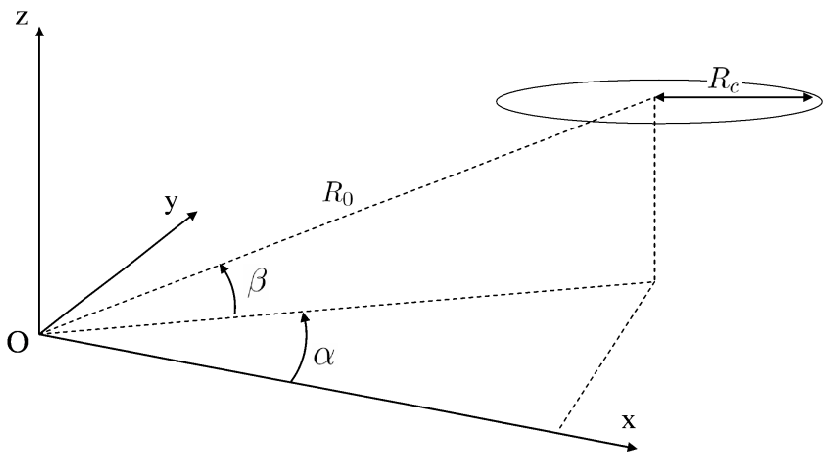


FIGURE 1.6 – Configuration de la modélisation d'un réflecteur en rotation

Soient :
- R_0 la distance entre le radar et le centre de rotation, supposée constante dans ce paragraphe ;
- R_c le rayon de la rotation ;
- Ω_r la vitesse angulaire de la rotation ;
- α l'angle d'azimut ;
- β l'angle d'élévation.

En supposant que :

$$R_0 \gg R_c$$

1. Distance aller retour

la distance entre le radar et le réflecteur peut être approximée de la manière suivante :

$$R(t) = R_0 + R_c \sin \Omega_r \cos \alpha \cos \beta \tag{1.33}$$

Le signal reçu s'écrit alors :

$$s(t) = \rho \; exp\left[j\left(2\pi f_0 t + 4\pi \frac{R(t)}{\lambda_0}\right)\right] \quad = \rho \; exp\left[j\left(2\pi f_0 t + \phi(t)\right)\right] \tag{1.34}$$

où ρ est la réflectivité du point, f_0 la fréquence porteuse du signal émis, λ_0 la longueur d'onde associée. $\phi(t)$ est la phase du point, telle que :

$$\phi(t) = 4\pi \frac{R(t)}{\lambda_0} \tag{1.35}$$

Fréquence instantanée :

La fréquence Doppler f_d, engendrée par la rotation du réflecteur, s'exprime comme la fréquence instantanée (cf section 1.1.2) :

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{1}{2\pi}\frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \frac{2}{\lambda_0} R_c \Omega_r \; cos(\Omega_r t) \cos \alpha \cos \beta \end{aligned} \tag{1.36}$$

Si les angles d'azimut α et d'élévation β sont nuls, la fréquence Doppler devient :

$$f_d = \frac{2}{\lambda_0} R_c \Omega_r \; cos(\Omega_r t) \tag{1.37}$$

La figure 1.7 montre la variation de la fréquence Doppler d'un réflecteur en rotation en fonction du rayon du cercle et de la vitesse de rotation. La fréquence Doppler est une fonction sinusoïdale de pulsation Ω_r, de maximum $(2/\lambda_0) R_c \Omega_r$.

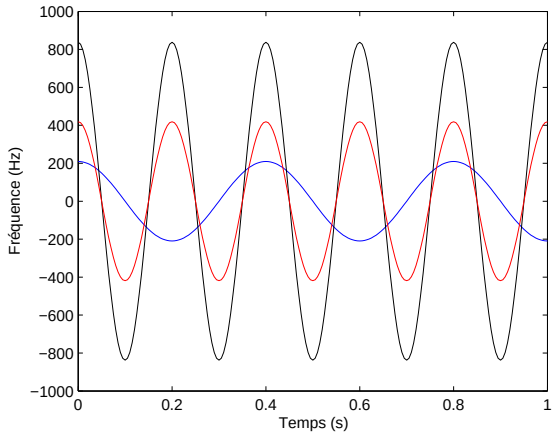


FIGURE 1.7 – Variation de la fréquence Doppler d'un réflecteur en rotation lorsque $\lambda_0 = 3$ cm (En bleu : $\Omega_r = 15\pi$ rad/s et $R_c = 20$ cm) ; En rouge : $\Omega_r = 30\pi$ rad/s et $R_c = 20$ cm ; En noir : $\Omega_r = 30\pi$ rad/s et $R_c = 40$ cm)

Spectre du signal reçu :

En posant :

$$A = \rho \; exp\left(j4\pi\frac{R_0}{\lambda_0}\right)$$

et

$$B = \frac{4\pi}{\lambda_0} \; R_c \cos\alpha \cos\beta$$

le signal reçu 1.34 s'écrit :

$$s(t) = A \; exp\left[j(2\pi f_0 t + B\sin\Omega_r t)\right] \tag{1.38}$$

Cette équation peut être développée en séries de Fourier telle que :

$$s(t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(B) exp[j(2\pi f_0 t + n\Omega_r)t] \tag{1.39}$$

où les coefficients de Fourier s'écrivent :

$$J_n(B) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} exp\left[j(B\sin\Omega_r t - n\Omega_r t)\right] dt \tag{1.40}$$

L'équation 1.40 est une fonction de Bessel de première espèce d'ordre n. En remplaçant l'équation 1.40 dans l'équation 1.39, le signal reçu devient :

$$\begin{aligned} s(t) = \; & A \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(B) \; exp[j(2\pi f_0 + n\Omega_r)t] \\ = \; & A \; \{J_0(B) \; exp[j2\pi f_0 t] \\ & + J_1(B) \; exp[j(2\pi f_0 + \Omega_r)t] - J_1(B) \; exp[j(2\pi f_0 - \Omega_r)t] \\ & + J_2(B) \; exp[j(2\pi f_0 + 2\Omega_r)t] - J_2(B) \; exp[j(2\pi f_0 - 2\Omega_r)t] \\ & + J_3(B) \; exp[j(2\pi f_0 + 3\Omega_r)t] - J_3(B) \; exp[j(2\pi f_0 - 3\Omega_r)t] \\ & + \ldots\} \end{aligned} \tag{1.41}$$

Le spectre de ce signal est constitué de paires d'harmoniques réparties symétriquement autour de la fréquence f_0 et espacées de $\frac{\Omega_r}{2\pi}$.

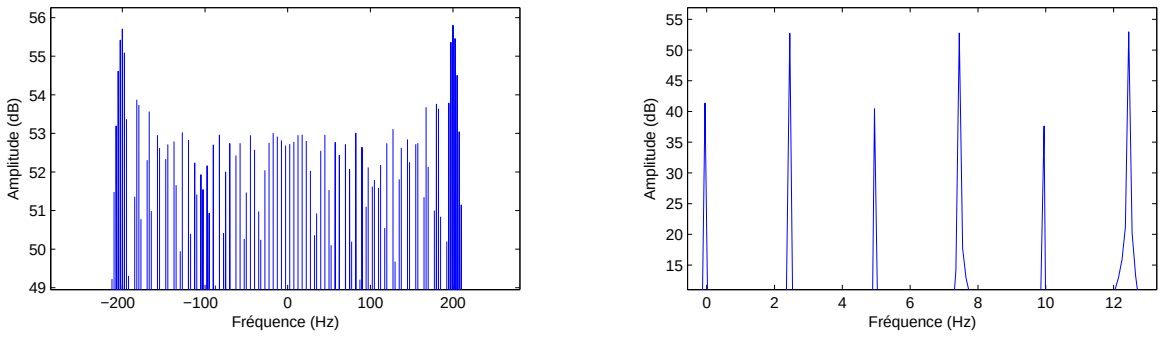


FIGURE 1.8 – Spectre du signal pour un réflecteur ($R_c = 0,2$ m, $\Omega_r = 5\pi$ rad/s, $\lambda_0 = 3$ cm)

La figure 1.8 représente le spectre du signal reçu, pour un réflecteur de réflectivité $\rho = 1$ en rotation autour d'un cercle de rayon $R_c = 0,2$ m, à une vitesse $\Omega_r = 5\pi\ rad/s$. La mesure est effectuée en bande X ($\lambda_0 = 3$ cm).
Le phénomène est suffisamment rapide pour que le Doppler du réflecteur fluctue pendant le temps d'intégration de la transformée de Fourier. Les bornes du spectre correspondent au minimum et maximum de la fréquence Doppler du réflecteur.
Dans l'exemple :

$$f_d \in \left[-\frac{2R_c\Omega_r}{\lambda_0}, \frac{2R_c\Omega_r}{\lambda_0}\right] = [-209\ Hz, 209\ Hz]$$

Le Doppler est positif lorsque le réflecteur se rapproche du radar, négatif lorsqu'il s'en éloigne. La fréquence maximum est atteinte lorsque le rayon entre le réflecteur et le centre de rotation est perpendiculaire à l'axe de visée.
L'écart entre les raies est donné par :

$$\delta f = \frac{\Omega_r}{2\pi} = 2,5\ Hz$$

ce qui correspond au nombre de tours par seconde effectués par le réflecteur.

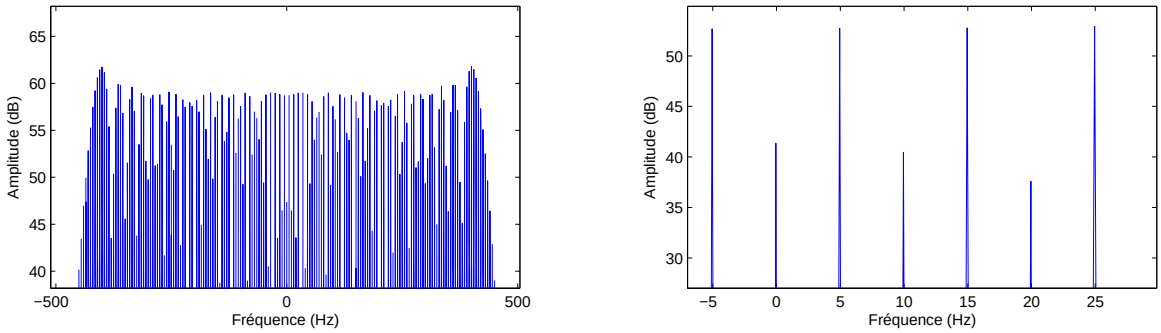


FIGURE 1.9 – Spectre du signal pour un réflecteur ($R_c = 0,2$ m, $\Omega_r = 10\pi$ rad/s, $\lambda_0 = 3$ cm)

Dans le deuxième exemple de la figure 1.9, la vitesse de rotation est multipliée par deux. De ce fait, la bande du spectre et l'écart entre les raies sont multipliées par deux : $f_d = [-418\ Hz, 418\ Hz]$ et $\delta f = 5$ Hz.

1.3.3 Généralisation à N réflecteurs

Si la structure tournante est composée de N réflecteurs uniformément répartis sur la circonférence d'un cercle de rayon R_c, le signal reçu s'écrit :

$$s(t) = A \sum_{k=0}^{N-1} exp\left[j\left(2\pi f_0 t + B\sin\left(\Omega_r t + \theta_0 + k\frac{2\pi}{N}\right)\right)\right] \tag{1.42}$$

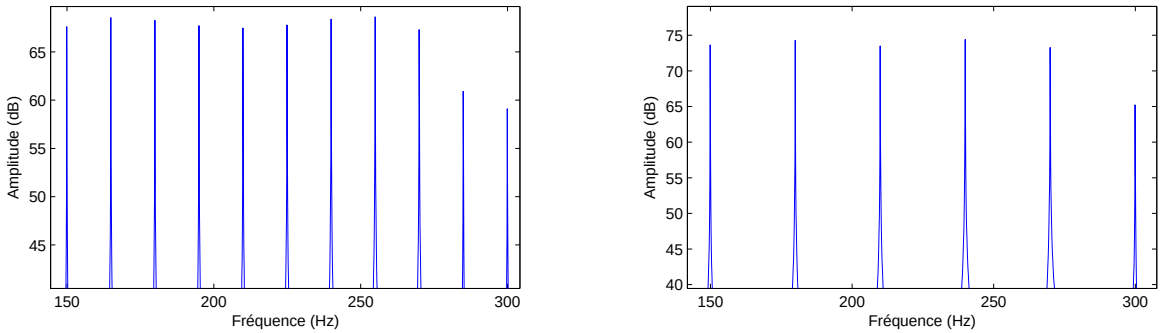
où

$$\theta_k = \theta_0 + k\frac{2\pi}{N}$$

est l'angle du réflecteur k à l'instant initial.

L'équation 1.42 peut également s'exprimer par les fonctions de Bessel du premier ordre. De la même manière que pour l'équation 1.41, le spectre micro-Doppler est constitué d'harmoniques réparties autour de la fréquence f_0 et espacées de $\frac{\Omega_r}{2\pi}$.

Reprenons l'exemple du signal réfléchi par une roue ($R_c = 0,2$ m, $\Omega_r = 10\pi$ rad/s, $\rho = 1$, $\lambda_0 = 3$ cm) dont les réflecteurs sont uniformément répartis sur la circonférence.



(a) (b)

FIGURE 1.10 – Spectre du signal pour 3 réflecteurs (a) et 6 réflecteurs (b) ($R_c = 0,2$ m, $\Omega_r = 10\pi$ rad/s, $\lambda_0 = 3$ cm)

La vitesse étant $\Omega_r = 10\pi$ rad/s, l'étendue du spectre Doppler est la même que celui de la figure 1.9 : $f_d = [-418\ Hz, 418\ Hz]$
A vitesse constante, l'écart entre 2 raies est de $\delta f = 30$ Hz lorsque $N = 3$ (Fig 1.10.a), $\delta f = 15$ Hz lorsque $N = 6$ (Fig 1.10.b). Autrement dit, lorsque le nombre de réflecteurs augmente, la fréquence de passage diminue.

Récapitulatif sur le spectre micro-Doppler :
Le spectre obtenu est un peigne de raies et se caractérise par :

- la largeur de sa bande, fixée par le double de la fréquence Doppler maximale définie par la vitesse de rotation et le rayon de la roue :

$$B = \frac{4R_c\Omega_r}{\lambda_0} \tag{1.43}$$

- l'écart entre les raies, inverse de la période du signal. Il dépend de la vitesse de rotation et du nombre de réflecteurs :

$$\delta f = N\frac{\Omega_r}{2\pi} \tag{1.44}$$

1.3.4 Modélisation d'un rotor d'hélicoptère

V.Chen a également modélisé le signal réfléchi par un rotor d'hélicoptère [Chen-02], en intégrant 1.42 sur la longueur de la pale L. Pour un rotor composé de N pales, le signal reçu s'écrit :

$$s(t) = L\sum_{k=0}^{N-1}\frac{\sin(\pi\Phi_k(t))}{\pi\Phi_k(t)} \tag{1.45}$$

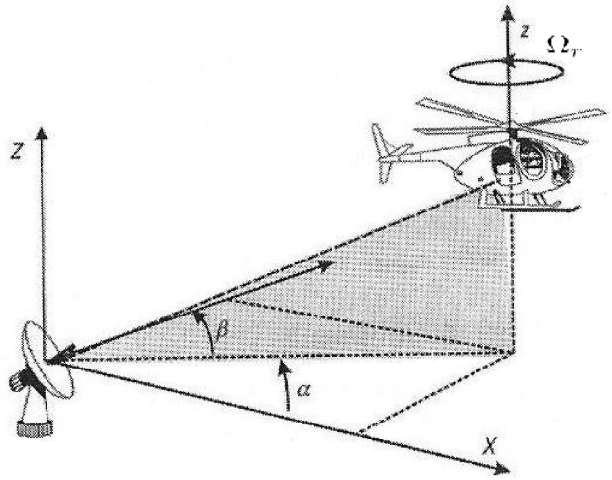


FIGURE 1.11 – Représentation d'un rotor d'hélicoptère [Chen-02]

avec :

$$\Phi_k(t) = \frac{4\pi}{\lambda_0}\frac{L}{2}\sin\left(\Omega_r t + \theta_0 + \frac{2\pi}{N}\right)\cos\alpha\cos\beta$$

Pour illustrer le modèle, prenons un rotor composé de trois pales de longueur $L = 0,2$ m tournant à la vitesse $\Omega_r = 10\pi$ rad/s.

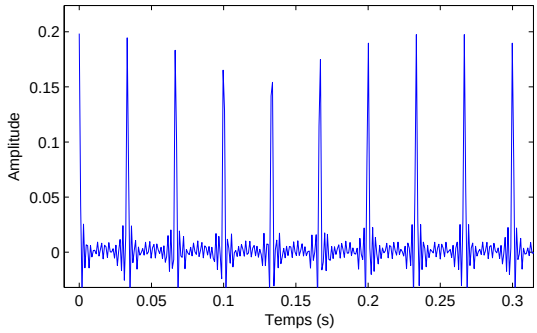


FIGURE 1.12 – Représentation temporelle du signal réfléchi par un rotor de 3 pales ($L = 0,2$ m, $\Omega_r = 10\pi$ rad/s, $\lambda_0 = 3$ cm)

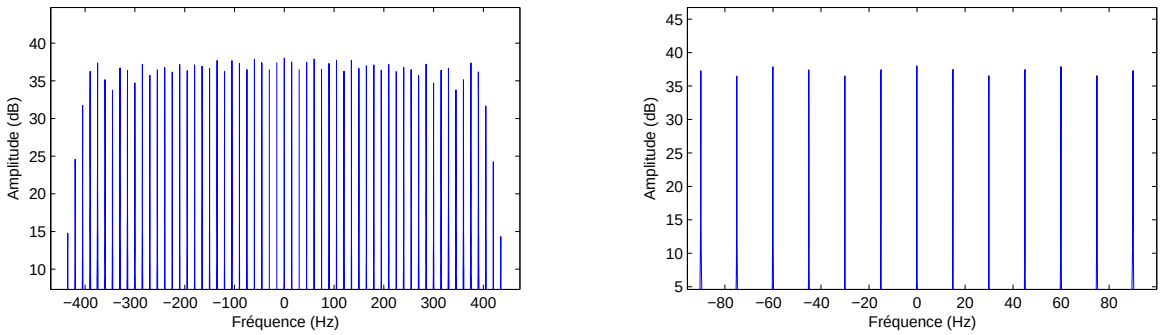


FIGURE 1.13 – Représentation spectrale du signal réfléchi par un rotor de 3 pales ($L = 0,2$ m, $\Omega_r = 10\pi$ rad/s, $\lambda_0 = 3$ cm)

La représentation temporelle (Fig 1.12) montre que la pale du rotor retourne un flash lorsqu'elle est orthogonale à la direction de visée. L'intervalle entre deux flashs est lié à la vitesse de rotation Ω_r et au nombre de pales. La durée du flash est déterminée par la longueur de la pale L, la longueur d'onde λ_0 et la vitesse de rotation Ω_r. Comme il y a 3 pales et que le rotor effectue 10 tours/s, l'intervalle entre deux flashs est de $0,033$ s. La fréquence des impulsions est inversement proportionnelle à cet intervalle. La représentation spectrale (Fig 1.13) met en évidence la fréquence de répétition, ainsi que la fréquence Doppler maximum du phénomène, proportionnelle à la vitesse en bout de pale ($V_{max} = L\Omega_r = 6,3$ m/s)

Même si cette nouvelle approche n'apporte pas plus d'information que la modélisation de la rotation de N réflecteurs, notamment sur la largeur du spectre et l'espace entre les raies, le modèle de Chen s'avère plus précis. Il met en évidence les flashs dues aux pâles et l'amplitude des raies est uniforme sur tout le spectre.
Ce modèle peut s'appliquer pour modéliser une roue à rayons, où L est le rayon de la roue et N le nombre de rayons.
En revanche, il n y a pas de modèle pour représenter une roue pleine. En effet, la première idée est de penser que dans ce cas, le nombre de rayon N tend vers l'infini. Or l'écart entre les raies est proportionnel au nombre de rayons. Cela implique que la largeur entre les raies est infinie, ce qui signifie qu'il n y a pas de représentation spectrale possible.
C'est pour cela que nous proposons dans le chapitre 3 un modèle spécifique de roue pleine.

1.3.5 Travaux autour de l'effet micro-Doppler

Puisque le signal retourné vers le radar provient de structures non stationnaires, les études se sont tournées vers l'analyse du signal dans le domaine temps-fréquence [Chen-00, Chen-02, Li-02, Li-03, Chen-03, Spar-03, Thaya-04, Setl-06, Thaya-07, Thaya-08].

L'effet micro-Doppler provient des micro-mouvements qui viennent s'ajouter au Doppler global de la cible. Une méthode permettant de séparer le Doppler de la cible des micro-Doppler a été faite dans [Stan-06].

Les caractéristiques du micro-Doppler peuvent constituer la signature d'une cible en mouvement et apporter des informations sur sa structure dans le cadre de la reconnaissance et la classification de l'objet. Les articles concernant la classification de cibles à partir de signatures micro-Doppler sont [Chen-05, Lei-05, Smith-06].

Du fait du mouvement des membres, le piéton produit également un effet micro-Doppler. Les premiers premiers travaux concernant l'étude de ce phénomène sont [Geish-01, Geish-02, Otero-05, Dorp-03]. Une description plus exhaustive de ces publications est faite dans le chapitre 6.
Les publications concernant l'analyse de la signature micro-Doppler des piétons se sont multipliées tout récemment : analyse temps-fréquence [Ram-07, Ram2-08, Ram-08], classification [Yang-08, And-07, And-08], extraction de caractéristiques [Dorp-08], analyse en mode bistatique

[Smith-08]. Quant aux publications [Zha-07, Zha2-07], elles proposent une approche acoustique pour analyser le micro-Doppler lié au déplacement humain.

Chapitre 2

Du système de mesure à la formation d'images

Sommaire

2.1 HYCAM : un radar imageur haute résolution 26

2.1.1 Description du système de mesure 26

2.1.2 Forme d'onde du radar HYCAM 28

2.2 Protocole expérimental 30

2.2.1 Géométrie de la scène 31

2.2.2 Configuration du radar 33

2.2.3 Enregistrement du signal 33

2.3 Traitement des données HYCAM 34

2.3.1 Calcul des coefficients de rétrodiffusion 34

2.3.2 Calibrage 35

2.3.3 Étalonnage 35

2.3.4 « Soustraction de chambre » 37

2.3.5 Suppression des échos fixes 37

2.3.6 Formation des images 38

2.4 Apport d'un outil de simulation 39

2.4.1 Hypothèses du modèle 39

2.4.2 Modélisation du signal reçu 40

2.1 HYCAM : un radar imageur haute résolution

2.1.1 Description du système de mesure

Le radar HYCAM (HYperfrequency CAMera) est un dispositif conçu pour mesurer à haute résolution la SER de cibles dites « scintillantes », c'est à dire lorsque leur signature radar évolue au cours du temps. Cette variation rapide peut être induite par des modulations radio-électriques ou des déformations géométriques de l'objet.
Afin d'effectuer une mesure fiable des coefficients de rétrodiffusion de la cible, celle-ci doit être vue comme immobile pendant le temps de la mesure. Ce dernier doit donc être inférieur au temps de stationnarité du phénomène à étudier. De plus, la mesure doit être effectuée sur une très large bande de manière à ce que la résolution spatiale soit suffisante pour construire des images fines de la cible.

D'après les travaux de Yoann Paichard [Paich-07] HYCAM permet de mesurer de manière précise la SER de signaux modulés de fréquence maximale 100 KHz, avec un temps de mesure $T_\mu \leq 2,6\ \mu s$. Pendant ce temps très court, le système de mesure est capable d'émettre et de recevoir l'ensemble des fréquences, pour effectuer une mesure sur des cibles scintillantes.

Un tel dispositif permet d'étudier les modulations produites par des pales d'hélicoptère ou des turbines d'avion. Nous avons choisi pour notre part d'utiliser cet appareil pour étudier les rotations des roues et les mouvements des piétons qui induisent également des modulations du signal radar.

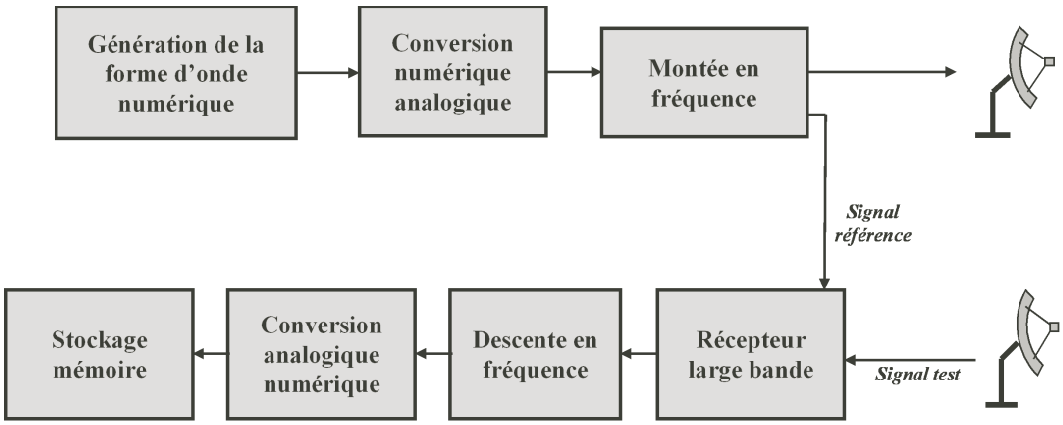


FIGURE 2.1 – Synopsis de la chaîne de mesure du radar HYCAM

La chaîne de mesure HYCAM est représentée sur la figure 2.1. Elle est constituée :
- d'un émetteur numérique large bande associé à un convertisseur digital-analogique. Cet émetteur permet de générer des formes d'ondes numériques entièrement programmées par l'utilisateur ;
- d'un module analogique de montée en fréquence ;
- d'antennes large bande ;

– d'un récepteur large bande associé ;
– d'un numériseur.

La forme d'onde émise est un spectre de raies, où toutes les fréquences sont émises simultanément sur un temps très court ($T_\mu \leq 2,6\ \mu s$). Elle permet d'effectuer une mesure simultanée des coefficients de rétrodiffusion de la cible sur toutes les fréquences. Elle est codée numériquement puis synthétisée par un générateur de fréquence large bande.
Le signal est ensuite transposé en bande X, amplifié et émis dans la polarisation souhaitée. Un coupleur directionnel permet de rediriger une partie du signal émis vers une voie de réception. Ce signal est appelé signal référence, par opposition au signal rétrodiffusé par la cible (signal test).

L'utilisation d'une voie référence permet de compenser les défauts de la chaîne d'émission. En effet la fonction de transfert des composants de la chaîne peut varier au cours du temps. Cette correction est réalisée a posteriori, en effectuant le rapport, dans le domaine fréquentiel, entre les signaux test et référence. Cette opération ne permet cependant pas de calibrer la chaîne de réception, ce qui est réalisé en étalonnant le signal reçu par une cible de SER connue (section 2.3).

Pour ne pas alourdir l'architecture du récepteur, les deux signaux sont entrelacés pour ne former qu'un seul signal (Fig 2.2). Ainsi, une seule voie est nécessaire à la réception pour recevoir le signal référence et le signal rétrodiffusé par la cible. Cet entrelacement en fréquence est rendu possible grâce aux propriétés d'orthogonalité de la forme d'onde. Enfin, le signal reçu est transposé en bande de base, numérisé, puis stocké en mémoire.

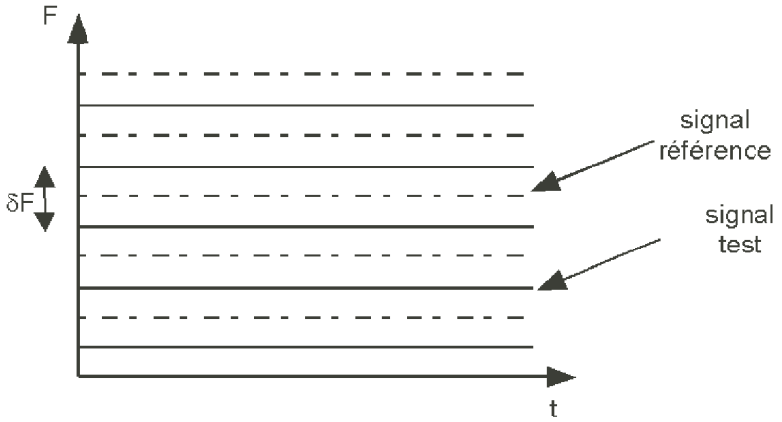


FIGURE 2.2 – Entrelacement fréquentiel des voies test et référence.

2.1.2 Forme d'onde du radar HYCAM

2.1.2.1 Rappel sur les formes d'onde

Le *chirp* linéaire et le *step-frequency* sont les formes d'onde les plus couramment utilisées en imagerie radar.

Le chirp linéaire :
Le signal émis est modulé linéairement en fréquence sur une durée T_c entre les fréquences f_0 et f_1. Il s'écrit :

$$\begin{aligned} s_{chirp}(t) &= rect_{T_c}(t)\ e^{j2\pi\left(f_0 t + \frac{\alpha}{2}t^2\right)} \\ &\text{avec } \alpha = \frac{f_1 - f_0}{T_c} \end{aligned} \tag{2.1}$$

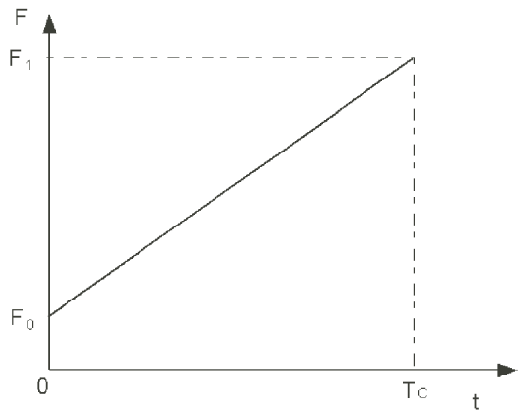


FIGURE 2.3 – Représentation temps-fréquence du *chirp* linéaire

Le step-frequency :
Le signal est composé d'une séquence de sinusoïdes, émises les unes après les autres. Les fréquences des sinusoïdes s'écrivent :

$$\begin{aligned} f_n &= f_0 + n\delta f = (n_0 + n)\delta f,\ (n \in \mathbb{N}) \\ &\text{avec } f_0 = n_0 \delta f, \quad (n_0 \in \mathbb{N}) \end{aligned} \tag{2.2}$$

Sa représentation temps-fréquence est donnée figure 2.4.
Chaque sinusoïde, d'amplitude A, est émise pendant une durée T_s, identique pour chaque sinusoïde. Le signal émis s'écrit analytiquement, à l'aide de la fonction porte :

$$s_{step}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} rect_{T_s}(t - nT_s)\ e^{j2\pi(n_0+n)\delta f\ t} \tag{2.3}$$

Le principal inconvénient du *step-frequency* est l'augmentation du temps d'émission avec le nombre de fréquences.

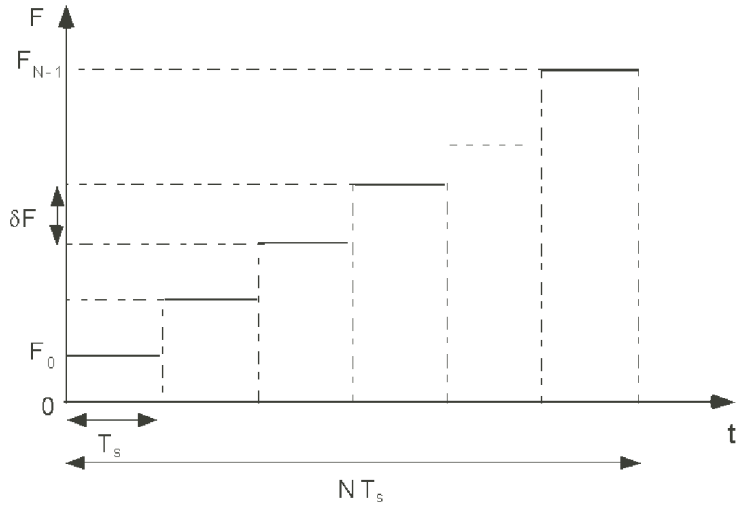


FIGURE 2.4 – Représentation temps-fréquence du *step-frequency*

2.1.2.2 Le spectre de raies

Essentiellement utilisé dans le domaine des communications numériques sous le nom d'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [Chan-70, Wein-71, Floc-95], le spectre de raies est une forme d'onde relativement nouvelle dans le domaine du radar [Garm-06, Paich-07]. Il permet d'émettre et de recevoir l'ensemble des fréquences dans un temps inférieur au temps de stationnarité de la cible dont la réflectivité varie rapidement au cours du temps. De plus la quantité de calcul est moins importante que celle du *chirp* ou du *step-frequency*. Enfin, les voies test et référence peuvent être entrelacées, ce qui simplifie l'architecture du récepteur large bande à concevoir.

Comme pour le *step-frequency*, les sinusoïdes émises ont une fréquence multiple d'un pas δf. La fréquence de la $n^{\text{ième}}$ sinusoïde s'écrit :

$$f_n = (n_0 + n)\delta f,\ (n_0, n \in \mathbb{N}) \tag{2.4}$$

Sa représentation temps-fréquence est donnée figure 2.6.
Le signal, d'amplitude A, est émis sur la durée T_{sp} . Il s'écrit :

$$s_{sp}(t) = \frac{A}{N} rect_{T_{sp}}(t) \sum_{n=1}^{N} e^{j2\pi(n_0+n)\delta f t} \tag{2.5}$$

Les fréquences émises sont orthogonales sur $T_0 = 1/\delta f$, période du signal. Les sinusoïdes devant être émises sur au moins une période, T_0 définit la durée minimale d'émission tel que :

$$T_{sp} \geq T_0$$

Le signal peut donc s'écrire en fonction de T_0 :

$$s_{sp}(t) = \frac{A}{N} rect_{T_{Sp}}(t) \sum_{n=1}^{N} e^{j2\pi \frac{n_0+n}{T_0} t} \tag{2.6}$$

Les figures 2.5 et 2.6 sont respectivement la représentation temporelle et la représentation temps-fréquence du spectre de raies.

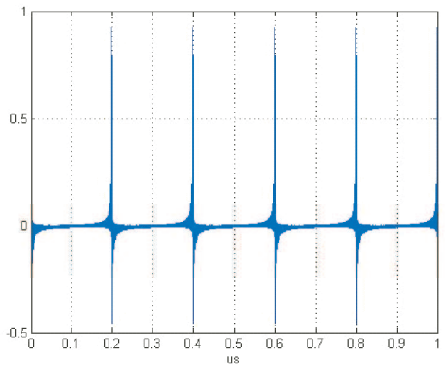


FIGURE 2.5 – Représentation temporelle d'un signal OFDM

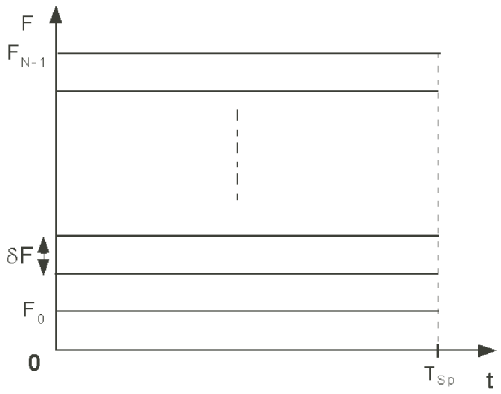


FIGURE 2.6 – Représentation temps-fréquence d'un signal OFDM

En prenant un pas de 5 MHz entre les fréquences (ambiguïté de 30 m), la durée minimale d'émission est $T_0 = 200$ ns, soit un temps très inférieur au temps de stationnarité. Il est donc possible, d'entrelacer les voies test et référence, en multipliant par 2 le temps d'émission.

Un codage en phase des sinusoïdes est utilisé, ce qui permet de diminuer sensiblement le rapport entre la puissance crête et la puissance moyenne du spectre de raies.

2.2 Protocole expérimental

Plusieurs campagnes d'acquisitions ont été organisées durant la thèse. Elles ont permis de constituer une base de données afin d'étudier le comportement de cibles non stationnaires, telles que la roue, le ventilateur, le vélo, la voiture et le piéton.
Le radar étant en phase de développement, son architecture et ses caractéristiques ont évolué

au cours des différentes manipulations. Cette section présente donc un instantané de la version d'HYCAM, utilisée lors de la dernière campagne de mesure.

2.2.1 Géométrie de la scène

Le radar HYCAM est utilisé en extérieur, dans un environnement dégagé. Il est positionné au cinquième étage d'un bâtiment à environ 18 m de hauteur et environ 25 m du centre de la scène (Fig 2.8, 2.8 et 2.9).

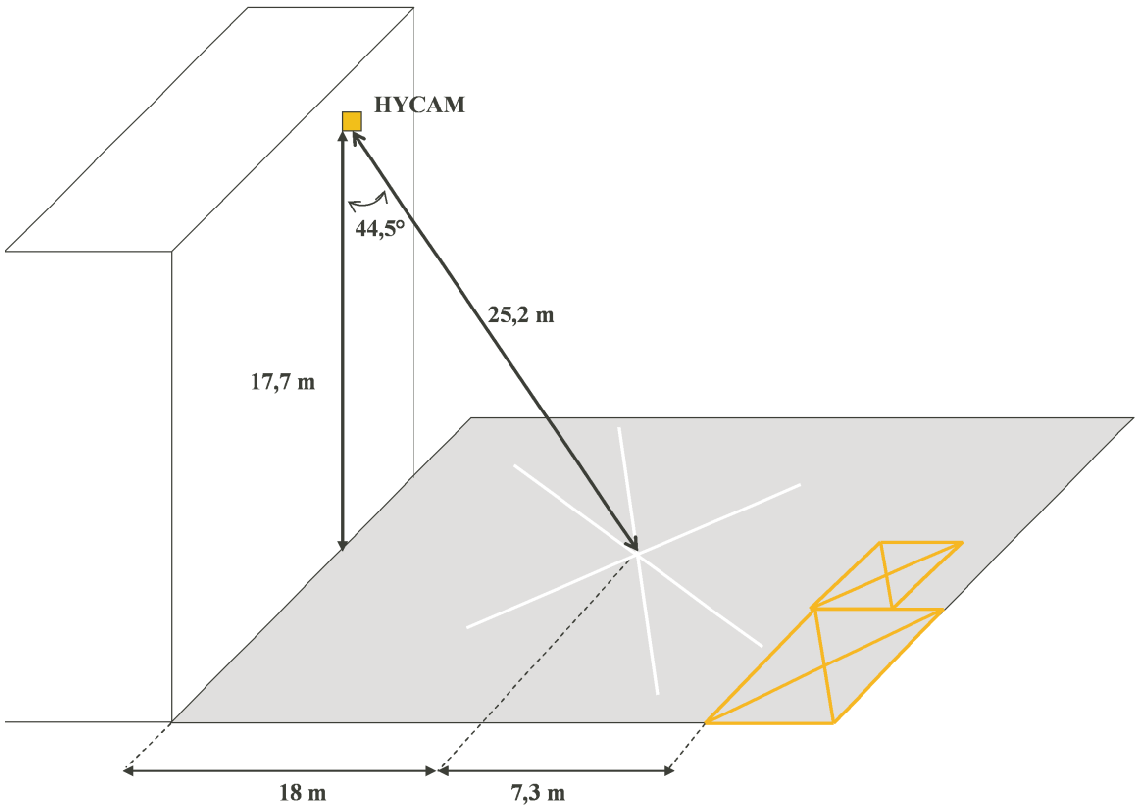


FIGURE 2.7 – Représentation schématique de la scène de mesure

Antennes :
L'émission et la réception se font sur deux antennes séparées. Comme celles-ci sont positionnées très proches l'une de l'autre (environ 50 cm), le radar peut alors être considéré comme monostatique. Chaque antenne est un cornet rectangulaire bande X, de dimensions a et b ($a = 0,136$ m, $b = 0,112$ m). L'intersection du faisceau d'antenne avec le plan de la scène est une ellipse de 10 m sur 8 m, ce qui constitue une tâche suffisamment large pour pouvoir observer une cible comme un piéton, un vélo ou une voiture en mouvement pendant plusieurs secondes. Il faut cependant tenir compte de l'affaiblissement du signal si la cible ne se situe pas au centre du lobe principal de l'antenne.

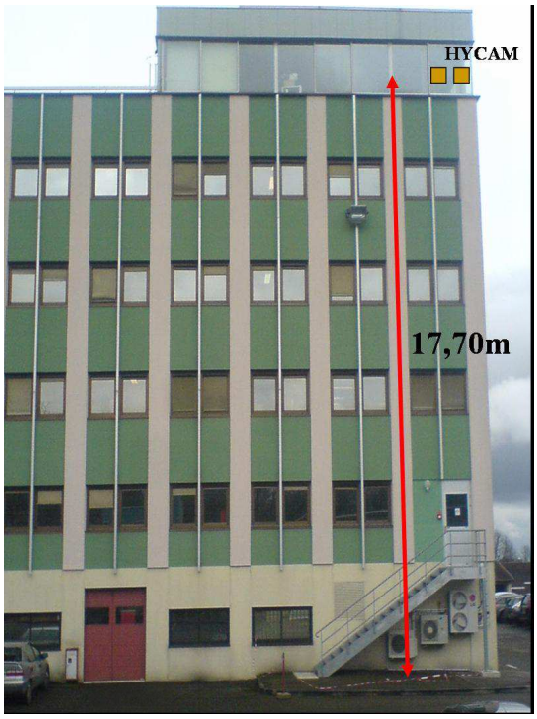


FIGURE 2.8 – Bâtiment dans lequel est positionné HYCAM (vu depuis la scène)

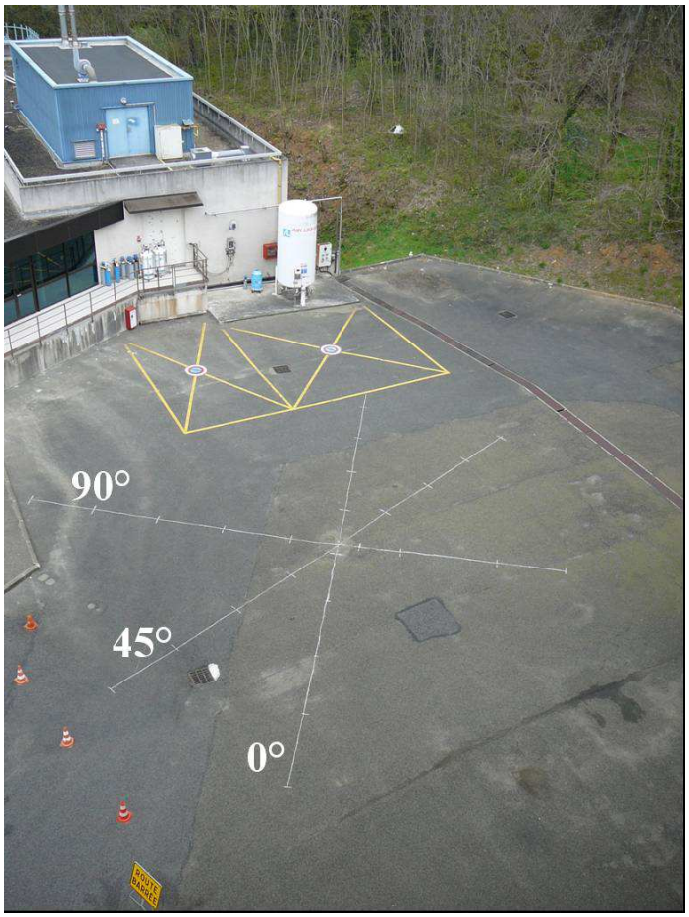


FIGURE 2.9 – Photographie de la scène vue depuis le radar

2.2.2 Configuration du radar

Les paramètres du radar sont décrits dans le tableau 2.1.

Forme d'onde	OFDM
Emission	Continue
Polarisation	VV
Mode	monostatique
Bande de base	$B = 800$ MHz
Pas fréquentiel	$\delta f = 2$ MHz
Nombre de fréquences	$N = 400$
Bande d'émission	[10 - 10,8] GHz
Échantillonnage réception	2 GHz
Échantillonnage Doppler	réglable

TABLE 2.1 – Paramètres du radar HYCAM

Le pas fréquentiel permet de fixer l'ambiguïté en distance (équation 1.27)

$$\Delta x = 75\text{m} \tag{2.7}$$

La bande du signal donne la résolution en distance (équation 1.28).

$$\delta x = 18,5\text{cm} \tag{2.8}$$

L'ambiguïté Doppler est fixée au moment de l'acquisition. Quant à la résolution Doppler, elle est fixée par le temps d'intégration lors du calcul des images.

2.2.3 Enregistrement du signal

L'émission et la réception se font en continu. Pour des raisons technologiques évidentes, il n'est pas possible d'enregistrer tous les échantillons reçus à la fréquence de 2 GHz. En effet, l'enregistrement d'une seconde de signal en continu représente $2.10^9 \times 2$ octets = 4 Go !

Étant donné que l'objectif des acquisitions est de constituer des images distance Doppler, il n'est pas nécessaire d'enregistrer la totalité du signal en continu. Il suffit de séquencer le signal, afin de constituer l'ensemble des profils distance nécessaires au calcul de l'image. Le signal reçu est ainsi découpé en déclenchant la numérisation sur trigger. A chaque instant de déclenchement n_e points sont numérisés. Ce nombre de points doit être suffisant pour calculer une réponse impulsionnelle.
La fréquence de découpage F_{dec} est déterminée par la fréquence d'échantillonnage du Doppler F_e, elle même étant fixée par l'ambiguïté en Doppler requise pour l'expérience (équation 1.29). La fréquence de découpage est donc donnée par :

$$F_{dec} = \Delta f_d \tag{2.9}$$

L'ambiguïté Doppler est fixée par la vitesse maximale de la cible à imager. Cela prend en compte d'une part le Doppler lié au déplacement du centre de la cible ; d'autre part le Doppler lié aux modulations micro-Doppler. Nous verrons dans le chapitre 5 que le Doppler lié au mouvement des bras et de jambes d'un piéton peut représenter plus de trois fois le Doppler du corps.
Si l'ambiguïté est trop petite, autrement dit si le Doppler est sous échantillonné, il peut se produire un phénomène de repliement du Doppler et il devient dans ce cas difficile de quantifier le phénomène observé.

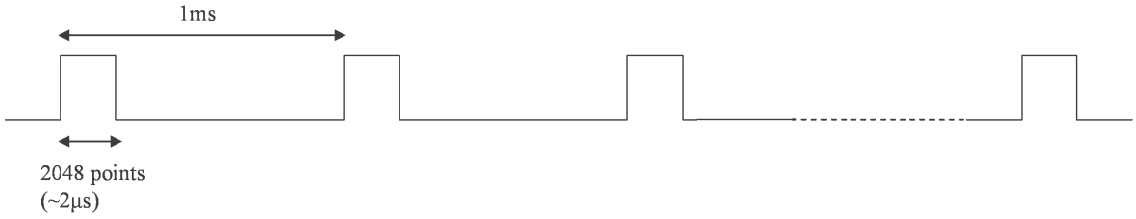


FIGURE 2.10 – Découpe du signal à $F_{trigger} = 1$ KHz

Le nombre d'échantillons par tranche n_e et la fréquence de découpage sont paramétrables par l'utilisateur dans la version actuelle d'HYCAM. Pour notre application (Fig 2.10), 2048 points ont été numérisés pour chaque tranche. La fréquence de découpage varie selon la nature du phénomène observé. Pour l'observation des piétons, un découpage du signal à 1 KHz permet de couvrir une gamme de vitesses comprises entre -7 m/s et 7 m/s, ce qui est suffisant pour la marche. Pour la course, une ambiguïté de 2 KHz peut être nécessaire pour être sûr d'éviter le repliement. Pour étudier la roue et le ventilateur, un découpage du signal compris entre 2 KHz et 4 KHz permet de s'affranchir des phénomènes de repliement.

2.3 Traitement des données HYCAM

Le calcul des images repose sur le principe de l'holographie radar présenté dans la partie 1.2. Puisque le signal émis est un spectre de raies, il est possible de reconstituer l'image distance Doppler de la cible après l'avoir mesurée dans une gamme de fréquences donnée et pendant un intervalle de temps.

Cette partie décrit le traitement effectué sur le signal reçu afin de calculer les coefficients de rétrodiffusion de la cible pour chaque fréquence émise en fonction du temps. Après le calibrage des données, la réponse de la cible est étalonnée par rapport à une cible de référence puis l'image distance Doppler est formée.

2.3.1 Calcul des coefficients de rétrodiffusion

Le traitement adapté permet d'obtenir la réponse en fréquence de chaque réflecteur. Les coefficients de rétrodiffusion $S_{test}(f)$ et $S_{ref}(f)$ sont obtenus sur les voies test et référence en

calculant les produits scalaires entre le signal reçu et les fréquences émises.

Le produit scalaire entre deux signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ est défini sur la durée τ par :

$$< s_1(t), s_2(t) >_\tau = \frac{1}{\tau} \int_\tau s_1(t)\ s_2^*(t)\ dt \tag{2.10}$$

La réponse en fréquence de la voie test s'écrit :

$$\begin{aligned} S_{test}(f) &= < s_r(t), e^{2j\pi ft} >_T \\ &= A_{test} \sum_k c_k e^{4j\pi f X_k/c} \end{aligned} \tag{2.11}$$

où c_k est le coefficient de rétrodiffusion du réflecteur k et X_k la distance entre ce réflecteur et les antennes.

La réponse en fréquence de la voie référence s'écrit :

$$\begin{aligned} S_{ref}(f) &= < s_r(t), e^{2j\pi ft} >_T \\ &= A_{ref} \end{aligned} \tag{2.12}$$

2.3.2 Calibrage

Le rapport entre les voies test et référence permet ensuite de calibrer la chaîne d'émission et d'obtenir la réponse en fréquence de la cible :

$$\begin{aligned} S_{cible}(f) &= \frac{S_{test}(f)}{S_{ref}(f)} \\ &= \frac{A_{test}}{A_{ref}} \sum_k c_k e^{4j\pi f X_k/c} \end{aligned} \tag{2.13}$$

La mesure est renouvelée au cours du temps pour l'ensemble des fréquences afin de constituer la matrice de rétrodiffusion (ou hologramme) $S_{cible}(f,t)$ de la cible. L'analyse en fréquence permet de determiner les profils distance tandis que l'analyse temporelle permet d'analyser le Doppler.

2.3.3 Étalonnage

La procédure d'étalonnage permet de corriger le terme d'amplitude A_{test}/A_{ref} et de déterminer un centre de phase, comme origine des distances. Le procédé consiste à mesurer la réponse en fréquence d'un étalon dont la SER est connue, puis de normaliser en fréquence la réponse de la cible par celle de l'étalon.

$$\begin{aligned} \rho_{cible}(f,t) &= \sqrt{\tau_{etalon}} \times \frac{S_{cible}(f,t)}{S_{etalon}(f)} \\ &= \sum_k c_k e^{4j\pi f x_k/c} \end{aligned} \tag{2.14}$$

où :

- S_{cible} et S_{etalon} sont les réponses de la cible et de l'étalon, en valeur complexe ;
- $\rho_{cible}(f,t)$ est la réponse en fréquence normalisée ;
- σ_{etalon} est la SER de l'étalon ;
- x_k est la distance du réflecteur k au centre de phase, défini par un étalon.

La SER de la cible est alors déterminée par la relation :

$$\sigma_{cible}(f,t) = |\rho_{cible}(f,t)|^2 \tag{2.15}$$

Les étalons les plus fréquemment utilisés sont la sphère, la plaque ou le trièdre. Ce dernier est davantage utilisé pour les mesures en extérieur. Il présente l'avantage d'avoir une SER élevée sur un large secteur angulaire, d'être plus directif que la sphère et d'etre positionnable plus facilement que la plaque métallique. L'étalon utilisé lors de l'expérience est un trièdre d'arête $a = 0,7$ m. La valeur théorique de sa SER est donnée par [Paich-07] :

$$\sigma_{triedre}(f) \;=\; \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2} \;=\; \frac{4\pi f^2 a^4}{3c^2} \tag{2.16}$$

Le trièdre est positionné au centre de la scène de mesure (Fig 2.11) et permet de déterminer le centre de phase de la scène.

FIGURE 2.11 – Étalonnage de la mesure : le trièdre de référence est placé au centre de la scène

2.3.4 « Soustraction de chambre »

Cette opération, usuellement réalisée en chambre anéchoïque, mais que nous appliquons ici à notre scène en plein air, consiste à soustraire la SER de la cible après étalonnage, à la réponse de la chambre (scène à vide).
La réponse en fréquence de la cible, après étalonnage et soustraction de chambre peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\rho_{cible}(f,t) = \sqrt{\sigma_{triedre}(f)} \times \frac{S_{cible}(f,t) - S_{chambre}(f)}{S_{triedre}(f) - S_{chambre}(f)} \tag{2.17}$$

où $S_{chambre}(f)$ est la réponse en fréquence de la scène à vide, $S_{triedre}(f)$ la réponse de la scène avec le trièdre de référence et $S_{triedre}(f)$ la réponse de la cible sans le trièdre.

2.3.5 Suppression des échos fixes

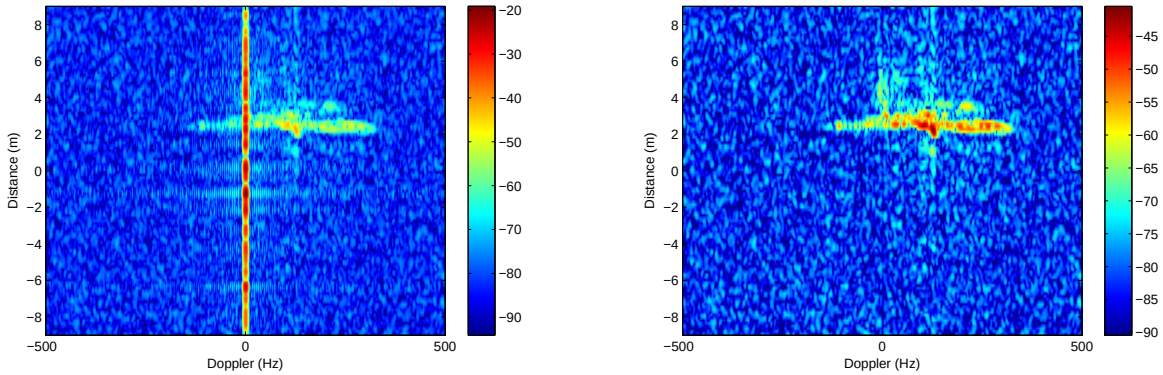
Les échos provenant du clutter sont inhérents à l'imagerie de type ISAR. En effet, c'est le mouvement de la cible par rapport au radar qui permet de calculer son image. Or, le faisceau d'antenne du radar éclaire une scène composée d'une part de la cible mobile et d'autre part des éléments fixes de la scène. Ces derniers renvoient donc vers le radar des échos dont le Doppler est nul, ce qui va se traduire sur l'image distance Doppler par une forte concentration de réflecteurs sur l'axe Doppler pour $f_d = 0$. Dans la littérature, ce phénomène est appelé « Zero-Doppler Clutter » ou ZDC [Haie-93, Show-97, Show-98].

Dans le cas de l'expérience mise en place, le clutter à zéro Doppler est dû principalement aux réflexions sur le sol et dans une moindre mesure aux réflexions et multiréflexions sur les bâtiments qui entourent la scène puisque ces derniers ne sont pas a priori dans le lobe principal de l'antenne.

Pour réduire ce phénomène, deux solutions sont envisageables. La première, d'ordre matérielle, consiste à réduire la largeur du lobe d'antenne de manière à limiter la contribution des échos fixes de la scène. Cette solution n'est pas préconisée puisque réduire le lobe d'antenne limite la zone de détection. La deuxième possibilité, moins contraignante et plus performante, consiste à effectuer un traitement sur les données, avant la formation de l'image, dans la mesure où ces échos fixes ont un comportement stable dans le temps.
La méthode consiste à soustraire la moyenne du signal dans le domaine temporel. Elle est effectuée sur l'ensemble des profils nécessaires au calcul du Doppler, pour chaque fréquence de l'hologramme ρ_{cible}. Cela revient à supprimer sa composante continue pour ne garder que la partie variable au cours du temps. La réponse en fréquence de la cible s'écrit :

$$\rho(f,t) \quad = \quad \rho_{cible}(f,t) - \frac{1}{\Delta T}\int_0^{\Delta T} \rho_{cible}(f,t)\ dt \tag{2.18}$$

La figure 2.12, représentant deux images distance Doppler d'un piéton en mouvement, montre que le traitement permet d'améliorer la dynamique de l'image en filtrant la composante continue du signal.



(a) (b)

FIGURE 2.12 – Image distance Doppler d'un piéton : sans filtrage des échos fixes (a) et avec un filtrage des échos fixes (b)

Comme les réflecteurs fixes ne varient pas d'une image à l'autre, ll est également possible d'effectuer la moyenne sur une période plus longue (plusieurs secondes) afin d'affiner le calcul de la moyenne. Cette alternative, qui nécessite de connaître l'historique des acquisitions et demande plus de temps de calcul, n'apporte dans notre cas aucune amélioration.

2.3.6 Formation des images

Le traitement effectué sur le signal reçu a permis de calculer les coefficients de rétrodiffusion de la cible pour l'ensemble des fréquence émises. Renouvelé au cours du temps, le calcul de ces coefficients a pour but de constituer la matrice de rétrodiffusion de la cible $\rho_{cible}(f,t)$:

$$\rho(f,t) \quad = \quad \sum_k c_k \; e^{4j\pi f x_k/c} \tag{2.19}$$

L'analyse en fréquence permet de déterminer les profils distance tandis que l'analyse temporelle permet d'analyser le Doppler.

2.3.6.1 Imagerie distance-temps

La relation 2.19 représente une transformée de Fourier inverse dont les variables duales sont f et $2x_k/c$. La réponse en distance de la cible $\hat{\rho}$ est obtenue par transformée de Fourier :

$$\hat{\rho}(x,t) \quad = \quad \sum_f \rho(f,t) \; e^{-2j\pi f(2x/c)} \tag{2.20}$$

L'analyse de la réponse en distance au cours du temps permet d'accéder au Doppler de la cible. En posant $t = 2x/c$, l'expression 2.20 devient :

$$\hat{\rho}(x,t) \quad = \quad \sum_f \rho(f,t) \; e^{-2j\pi f t} \tag{2.21}$$

L'image distance temps $\hat{I}(x,t)$ est obtenue en prenant le module de l'expression 2.20 :

$$\hat{I}(x,t) = \left| \sum_f \rho(f,t)\ e^{-4j\pi fx/c} \right|^2 \tag{2.22}$$

2.3.6.2 Imagerie distance-Doppler

La relation 2.21 représente une transformée de Fourier dont les variable duales sont t et f. La réponse distance-Doppler $\tilde{\rho}$ est obtenue par une transformée de Fourier inverse de la réponse en distance de la cible :

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}(x,f_d) &= \sum_t \hat{\rho}(x,t)\ e^{2j\pi f_d t} \\ &= \sum_f \sum_t \rho(f,t)\ e^{-4j\pi fx/c}\ e^{-2j\pi f_d t} \end{aligned} \tag{2.23}$$

L'image distance Doppler $\tilde{I}(x,f_d)$ est obtenue en prenant le module de l'expression 2.23 :

$$\tilde{I}(x,f_d) = \left| \sum_f \sum_t \rho(f,t)\ e^{-4j\pi fx/c}\ e^{-2j\pi f_d t} \right|^2 \tag{2.24}$$

Les deux images sont obtenues à partir d'un algorithme de type FFT (*Fast Fourier Transform*).

2.4 Apport d'un outil de simulation

Cette approche présente un double intérêt. Elle permet d'une part de comprendre le phénomène étudié à partir d'un modèle connu ; d'autre part de valider les résultats obtenus à partir d'HYCAM.

2.4.1 Hypothèses du modèle

Hypothèses sur la cible :
- la cible est constituée d'un ensemble de réflecteurs ponctuels ;
- le signal émis est entièrement réfléchi par le réflecteur en direction de l'antenne de réception ;
- le coefficient de rétrodiffusion ne dépend pas de la fréquence du signal émis ;
- chaque réflecteur a une phase initiale aléatoire ;
- la cible est transparente, autrement dit tous les réflecteurs sont visibles pendant toute la durée de l'acquisition.

2.4.2 Modélisation du signal reçu

2.4.2.1 Approche théorique

Le signal émis, est un spectre de raies (Figure 2.13), connu sous le nom d'OFDM. Il est défini par une somme de sinusoïdes et s'écrit de la façon suivante :

$$s_e(t) = \sum_{n=1}^{N_f} e^{2j\pi(f_0+n\delta f)t} \tag{2.25}$$

où f_0 est la fréquence de la première raie et N_f est le nombre de raies.

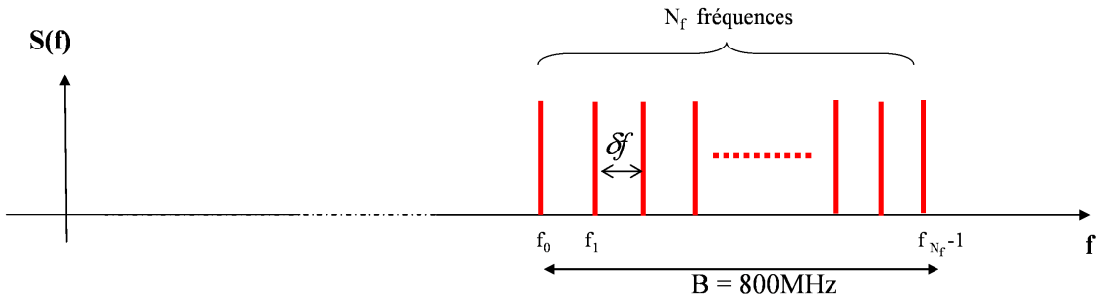


FIGURE 2.13 – Représentation du spectre du signal émis

Pour un réflecteur, le signal reçu est donc la somme de ces sinusoïdes déphasées par la distance aller et retour qui sépare le réflecteur du radar. Le signal total reçu par le radar est la somme des signaux réfléchis par chacun des réflecteurs.
Pour plusieurs réflecteurs, le signal renvoyé par la cible est la superposition de l'ensemble des signaux retardés du fait de la distance qui sépare chaque réflecteur du radar.

$$s_r(t) = \sum_{k=1}^{N} c_k \; s_e(t - t_k) \tag{2.26}$$

avec c_k le coefficient de rétrodiffusion du réflecteur k et t_k le retard correspondant au trajet aller retour de l'onde entre les antennes et le réflecteur k.

$$t_k = \frac{2D_k}{c} \tag{2.27}$$

où D_k est la distance entre le réflecteur k et le radar.

En reprenant les équations 2.25, 2.26 et 2.27, le signal reçu peut ainsi s'écrire :

$$s_r(t) = \sum_{k=1}^{N} \sum_{n=1}^{N_f} c_k \; e^{2j\pi(f_0+n\delta f)(t-2D_k(t)/c)} \tag{2.28}$$

2.4.2.2 Approche simplifiée

Afin d'alléger le temps de calcul, le modèle a été simplifié. Le signal reçu est remis en bande de base et projeté sur chacune des fréquences du signal émis. Il peut s'écrire directement en

fonction de la fréquence f et du pas de temps n. Pour chaque fréquence du spectre de raies, le spectre du signal reçu s'écrit comme la somme des exponentielles déphasées par la distance aller-retour qui sépare l'ensemble des réflecteurs du radar. L'opération est répétée à chaque pas de temps défini par l'échantillonnage Doppler $T_e = 1/F_e$.

$$S(f,t) = \sum_{k=1}^{N} c_k \; e^{j\Phi_k(f,t)} \tag{2.29}$$

avec N le nombre de réflecteurs défini dans la simulation, c_k le coefficient de rétrodiffusion du réflecteur k et $\Phi_k(f,t)$ sa phase à l'instant t définie par :

$$\Phi_k(f,t) = \frac{4\pi f D_k(t)}{c} \tag{2.30}$$

où $D_k(t)$ est la distance entre le radar et le réflecteur k

Cette approche permet d'obtenir l'hologramme puis de calculer les images distance-Doppler par double transformée de Fourier, selon la formulation 2.24.

Les paramètres de la simulation reprennent les caractéristiques du signal utilisé par HYCAM à savoir :

Bande de base	$B = 800$ MHz
Pas fréquentiel	$\delta f = 2$ MHz
Nombre de raies	$N_f = 400$

TABLE 2.2 – Paramètres du signal simulé

Chapitre 3

Analyse du mouvement d'une roue

Incessamment ma destinée tourne :
Comme une roue, et jamais ne séjourne ...

Démétrios

Sommaire

3.1 Trajectoire des points d'une roue 44
3.1.1 Histoire de la cycloïde 44
3.1.2 Equation paramétrique de la cycloïde 44
3.2 Vitesse absolue 45
3.2.1 Rotation sans roulement 48
3.2.2 Roulement sans glissement 48
3.3 Vitesse radiale 49
3.3.1 Changement de repère 50
3.3.2 Vitesse radiale 51
3.3.3 Etude analytique des vitesses radiales extrêmes 55
3.4 Extraction de caractéristiques 58

La roue est une entité omniprésente dans les cibles mobiles. Étant donné que son mouvement n'est pas le même que celui du reste de la cible, la roue va produire une signature en distance et en Doppler qui peut fournir des informations sur ses caractéristiques géométriques.
Ce chapitre est dédié à l'étude de la roue, depuis sa trajectoire jusqu'au Doppler.

3.1 Trajectoire des points d'une roue

3.1.1 Histoire de la cycloïde

Lorsqu'un point est situé sur une roue en mouvement, la trajectoire décrite est une courbe cycloïdale. La cycloïde, aussi appelée roue d'Aristote ou roulette de Pascal, est par définition engendrée par un point de la circonférence d'un cercle roulant sans glissement sur une droite. Cette courbe, étudiée au 17 ème siècle, est aussi appelée « Hélène des mathématiciens » car elle a provoqué de nombreuses et vives discussions chez les mathématiciens de toute l'Europe. C'est Blaise Pascal (1623 – 1662) qui s'y est intéressé le plus : « *La roulette est une ligne si commune, qu'après la droite et la circulaire, il n'y en a point de si fréquente* » (*Histoire de la roulette*, 1658).

3.1.2 Equation paramétrique de la cycloïde

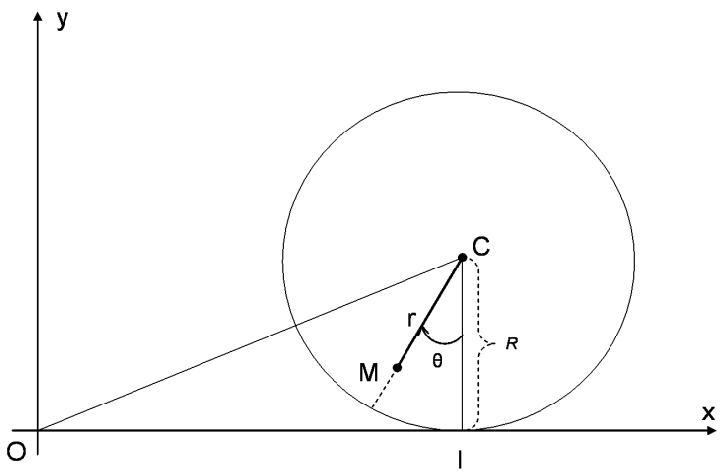


FIGURE 3.1 – Modélisation de la roue.

La roue est modélisée par un disque de centre C et de rayon R (Fig 3.1). Son mouvement se décompose en :

– un mouvement de translation uniforme selon l'axe (Ox),de vitesse V_0.

– un mouvement de rotation d'angle $\theta(t)$ défini par :

$$\theta(t) \quad = (\overrightarrow{CI}, \overrightarrow{CM}(t)) = \frac{V_0 t}{R} = \Omega t$$

$$\text{où } \Omega = \frac{V_0}{R} \text{ est la vitesse de rotation de la roue.}$$

Pour alléger les notations, on notera l'angle de rotation θ (au lieu de $\theta(t)$).
On suppose que la roue roule sans glissement c'est à dire que le point de contact I entre le sol et la roue a toujours une vitesse nulle.

La trajectoire du point M d'un disque roulant sans glissement sur une droite est définie dans le repère $(O, \overrightarrow{i}, \overrightarrow{j})$ par :

$$\overrightarrow{OM} = \begin{cases} R\theta - r\sin\theta \\ R - r\cos\theta \end{cases} \tag{3.1}$$

où r la distance du point M au centre de la roue ($0 \leq r \leq R$).

Démonstration :
Dans le repère $(O, \overrightarrow{i}, \overrightarrow{j})$, le centre de la roue C effectue une translation :

$$\overrightarrow{OC}(r, \theta) = \begin{cases} R\theta \\ R \end{cases}$$

Dans le repère de la roue le point M effectue une rotation :

$$\overrightarrow{CM} = \begin{cases} -r\sin\theta \\ -r\cos\theta \end{cases}$$

En écrivant :

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CM}$$

On obtient :

$$\overrightarrow{OM} = \begin{cases} R\theta - r\sin\theta \\ 2R - r\cos\theta \end{cases}$$

Sur la figure 3.2, la courbe rouge est une cycloïde au sens mathématique du terme. Elle correspond à un point qui appartient au contour du disque. Le point de rebroussement signifie que la vitesse s'annule. Les deux autres courbes (noir et rouge) sont des cycloïdes raccourcies, lorsque le point considéré est à l'intérieur du cercle.

3.2 Vitesse absolue

La deuxième étape consiste à calculer la vitesse absolue des points, c'est à dire la vitesse par rapport au sol. Elle peut être obtenue de deux manières :

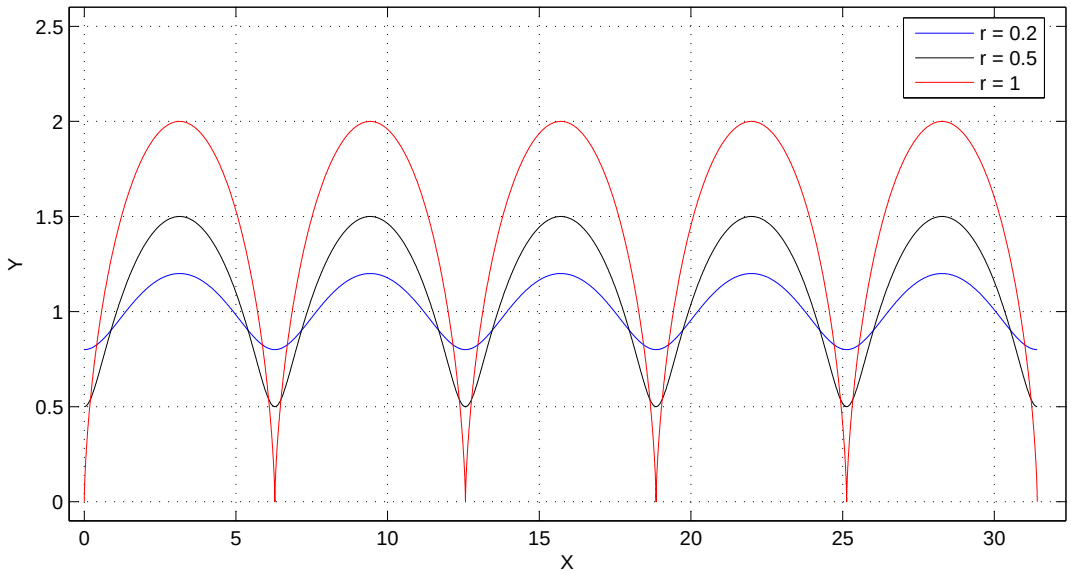


FIGURE 3.2 – Trajectoire de points d'une roue de rayon ($R = 1$, $V_0 = 1$)

– En dérivant l'équation 3.1 par rapport au temps :

$$\overrightarrow{V} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{\partial\overrightarrow{OM}}{\partial\theta}.\frac{\partial\theta}{\partial t} = \Omega.\frac{\partial\overrightarrow{OM}}{\partial\theta} = \frac{V_0}{R}.\frac{\partial\overrightarrow{OM}}{\partial\theta}$$

– En décomposant la vitesse résultante comme étant la somme d'une translation et d'une rotation :

$$\overrightarrow{V} = \overrightarrow{V}_{trans} + \overrightarrow{V}_{rot}$$

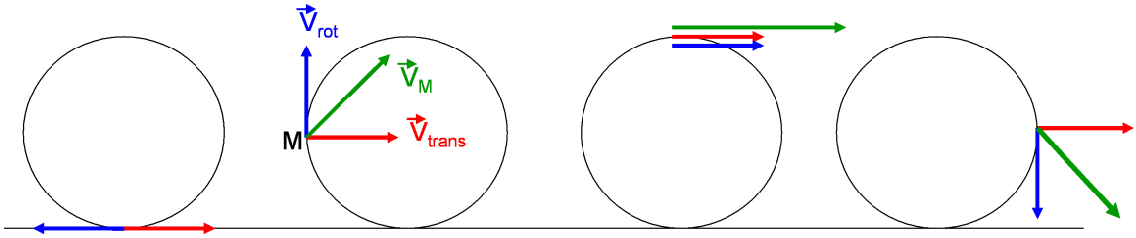


FIGURE 3.3 – Décomposition du vecteur vitesse.

Sans glissement de la roue, le point de contact de la roue avec le sol est à vitesse nulle, alors que le point diamétralement opposé se déplace à $2V_0$ (où V_0 est la vitesse du centre de la roue).

Nous avons choisi de calculer la vitesse de manière vectorielle. Cela nous permet d'envisager le cas simplifié d'une rotation sans roulement (sans point de contact), et le cas du roulement sans glissement.
Pour cela, nous définissons le repère [R1] (O, $\overrightarrow{i}$, $\overrightarrow{j}$, $\overrightarrow{k}$), centré sur la roue (figure 3.4).

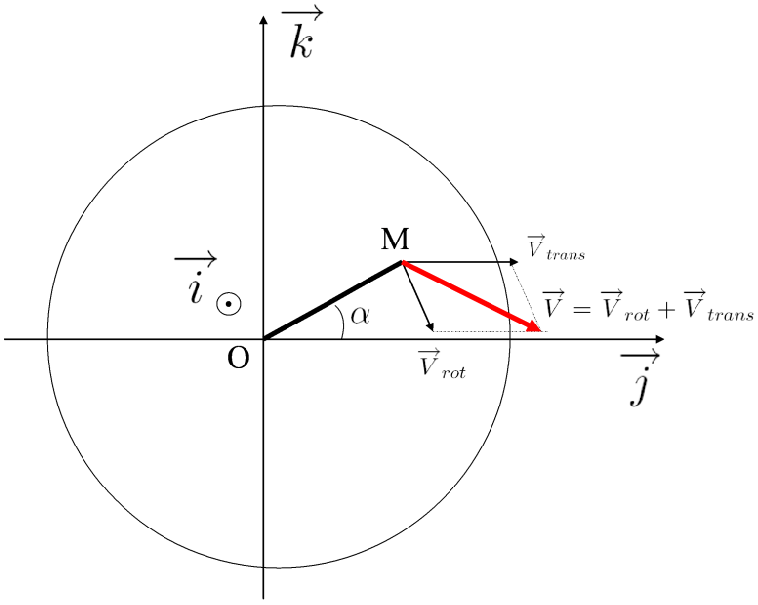


FIGURE 3.4 – Repère de la roue

Considérons le mouvement d'un point M de la roue de coordonnées $(0, y, z)$. Dans le repère [R1], le vecteur rotation $\overrightarrow{V}_{rot}$ et le vecteur de translation $\overrightarrow{V}_{trans}$ s'écrivent :

$$\overrightarrow{V}_{rot} = \frac{V_0}{R} \begin{cases} 0 \\ r \sin\alpha \\ -r\cos\alpha \end{cases} \qquad \overrightarrow{V}_{trans} = \begin{cases} 0 \\ V_0 \\ 0 \end{cases} \tag{3.2}$$

où :

- R est le rayon de la roue ;
- r est la distance entre le point M et le centre de la roue ;
- V_0 est la vitesse de translation ;
- α est l'angle $(\overrightarrow{j}, \overrightarrow{OM})$.

Sachant que les coordonnées du point M dans le repère [R1] s'écrivent :

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = r\cos\alpha \\ z = r\sin\alpha \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} 0 \leq r \leq R \\ 0 \leq \alpha \leq 2\pi \end{cases}$$

le système 3.2 devient :

$$\overrightarrow{V}_{rot} = \frac{V_0}{R} \begin{cases} 0 \\ z \\ -y \end{cases} \qquad \overrightarrow{V}_{trans} \begin{cases} 0 \\ V_0 \\ 0 \end{cases} \tag{3.3}$$

3.2.1 Rotation sans roulement

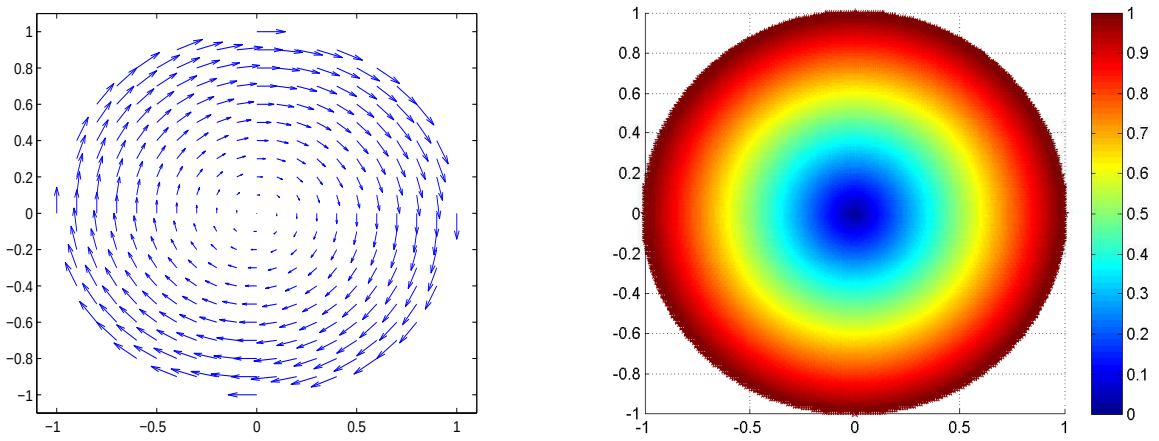
Le mouvement de tout point de la roue est une simple rotation. Le vecteur vitesse résultante $\overrightarrow{V}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{V}(y,z) = \overrightarrow{V}_{rot} = \frac{V_0}{R}\begin{cases} 0 \\ z \\ -y \end{cases} \tag{3.4}$$

La norme du vecteur vitesse s'écrit :

$$\left\|\overrightarrow{V}(y,z)\right\| = \frac{V_0}{R}\sqrt{y^2+z^2} \tag{3.5}$$

Le vecteur vitesse est orthogonal au rayon et la norme de la vitesse d'un point varie propor-



(a) (b)

FIGURE 3.5 – Rotation uniforme : vecteur (a) et norme (b) des points de la roue ($V_0 = 1$ et $R = 1$).

tionnellement avec sa distance au centre du cercle.

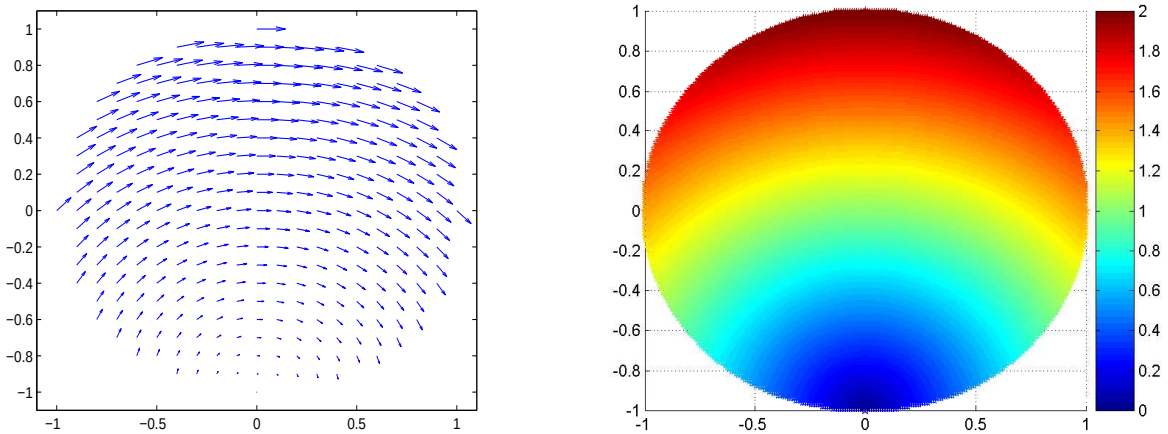
3.2.2 Roulement sans glissement

Le mouvement est la composition d'une translation et d'une rotation. Le vecteur vitesse résultante $\overrightarrow{V}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{V}(y,z) = \overrightarrow{V}_{rot} + \overrightarrow{V}_{trans} = V_0\begin{cases} 0 \\ 1+\dfrac{z}{R} \\ -\dfrac{y}{R} \end{cases} = \frac{V_0}{R}\begin{cases} 0 \\ R+z \\ -y \end{cases} \tag{3.6}$$

La norme du vecteur vitesse s'écrit :

$$\left\|\overrightarrow{V}(y,z)\right\| = \frac{V_0}{R}\sqrt{R^2+2Rz+y^2+z^2} \tag{3.7}$$



(a) (b)

FIGURE 3.6 – Rotation + translation : vecteur (a) et norme (b) des points de la roue ($V_0 = 1$ et $R = 1$).

Lorsque le point est situé sur la circonférence ($y^2 + z^2 = R$), la norme de la vitesse devient :

$$V(z) = \frac{V_0}{R}\sqrt{2R(R+z)} \tag{3.8}$$

Les résultats confirment que le point de contact de la roue avec le sol ($z = -R$) est à vitesse nulle (hypothèse de roulement sans glissement), alors que le point diamétralement opposé ($z = R$) se déplace à $2V_0$.

Lieu des iso-vitesses

Il est définit par :

$$\|\overrightarrow{V}\| = kV_0 \qquad k \in [0, 2]) \tag{3.9}$$

En utilisant 3.7, l'équation 3.9 s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{V_0}{R}\sqrt{R^2 + 2Rz + y^2 + z^2} &= kV_0 \\ \Leftrightarrow \qquad y^2 + (z+R)^2 &= k^2R^2 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Le lieu des iso-vitesses est un cercle centré sur le point de contact de la roue avec le sol $I(0, 0, -R)$ et de rayon kR ($k \in [0, 2]$). Pour vérification, la courbe (Fig 3.6.b) correspondant à la vitesse de translation de la roue V_0 passe bien par le centre du cercle.

3.3 Vitesse radiale

La troisième étape consiste à calculer la vitesse radiale de chacun des points de la roue par rapport à un observateur fixe. Ce calcul permet de connaître la répartition des Doppler réfléchis par l'ensemble des points qui constituent la roue, en fonction de son orientation par rapport à l'axe de visée.

3.3.1 Changement de repère

Rappelons que la vitesse radiale est définie comme la projection du vecteur vitesse sur un vecteur de visée. Pour effectuer ce calcul, nous avons choisi un nouveau repère afin de définir ces deux vecteurs dans le même référentiel. Soit [R2] le repère $(O, \overrightarrow{I}, \overrightarrow{J}, \overrightarrow{K})$, tel qu'il ait comme origine le centre de la roue, comme le repère [R1] et tel que l'axe des z soit commun (Fig 3.7).

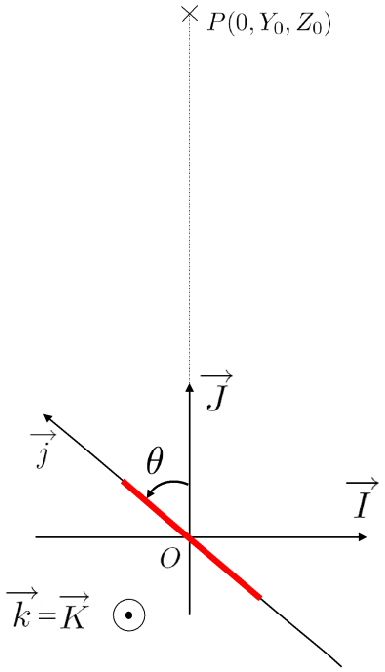


FIGURE 3.7 – Orientation de la roue par rapport à la direction de visée

La matrice de passage de [R1] à [R2] est s'écrit alors :

$$R_{12} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

où θ est l'angle formés par les plans $(0, \overrightarrow{J}, \overrightarrow{K})$ et $(0, \overrightarrow{j}, \overrightarrow{K})$.

Soit $\overrightarrow{a}$ un vecteur exprimé dans [R1] et $\overrightarrow{A}$ ce même vecteur exprimé dans [R2]. Le passage de $\overrightarrow{a}$ à $\overrightarrow{A}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{A} = R_{12}\overrightarrow{a} \tag{3.12}$$

Soit M un point de la roue, de coordonnées $(0, y, z)$ dans le repère [R1]. Dans [R2], le vecteur $\overrightarrow{OM}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{OM} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y\sin\theta \\ y\cos\theta \\ z \end{pmatrix} \tag{3.13}$$

De la même manière, exprimons dans [R2] le vecteur vitesse d'un point de la roue, dans les deux cas évoqués précédemment :

Rotation :
En utilisant 3.12 et l'équation 3.4, le vecteur vitesse résultante $\overrightarrow{V}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{V} = \frac{V_0}{R}\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 \\ z \\ -y \end{pmatrix} = \frac{V_0}{R}\begin{pmatrix} -z\sin\theta \\ z\cos\theta \\ -y \end{pmatrix} \tag{3.14}$$

Rotation + translation :
En utilisant 3.12 et l'équation 3.6 le vecteur vitesse résultante $\overrightarrow{V}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{V} = \frac{V_0}{R}\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 \\ R+z \\ -y \end{pmatrix} = \frac{V_0}{R}\begin{pmatrix} -(R+z)\sin\theta \\ (R+z)\cos\theta \\ -y \end{pmatrix} \tag{3.15}$$

3.3.2 Vitesse radiale

La vitesse radiale d'un point M s'écrit :

$$V_{rad} = -\overrightarrow{V}.\overrightarrow{U} \tag{3.16}$$

où $\overrightarrow{U}$ est le vecteur de visée normalisé.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi $P(0, Y_0, Z_0)$ comme point d'observation (Fig 3.7).
L'expression 3.16 devient :

$$V_{rad} = \frac{-\overrightarrow{V}.\overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|} \tag{3.17}$$

Pour chaque point M de la roue, le vecteur visée s'écrit :

$$\overrightarrow{PM} = \overrightarrow{OM} - \overrightarrow{OP} = \begin{cases} -y\sin\theta \\ y\cos\theta - Y_0 \\ z - Z_0 \end{cases} \tag{3.18}$$

et sa norme :

$$\|\overrightarrow{PM}\| = \sqrt{y^2 - 2yY_0\cos\theta + Y_0^2 + z^2 - 2zZ_0 + Z_0^2} \tag{3.19}$$

En champ lointain, les dimensions de la roue sont négligeables devant la distance entre la roue et le point d'observation :

$$\overrightarrow{OM} \ll \overrightarrow{PO} \Rightarrow \overrightarrow{PM} \simeq \overrightarrow{PO}$$

donc

$$\overrightarrow{PM} \simeq \begin{cases} 0 \\ -Y_0 \\ -Z_0 \end{cases} \tag{3.20}$$

et

$$\|\overrightarrow{PM}\| \simeq \sqrt{Y_0^2 + Z_0^2} \tag{3.21}$$

Exprimons la vitesse radiale, dans les deux cas :

Rotation :

$$V_{rad}(y,z) = \frac{V_0}{R\sqrt{Y_0^2 + Z_0^2}} \left(Y_0 z \cos\theta - Z_0 y\right) \tag{3.22}$$

Rotation + translation :

$$V_{rad}(y,z) = \frac{V_0}{R\sqrt{Y_0^2 + Z_0^2}} \left(Y_0 (R+z) \cos\theta - Z_0 y\right) \tag{3.23}$$

En posant :

$$\cos\phi = \frac{Y_0}{Y_0^2 + Z_0^2} \quad \text{et} \quad \sin\phi = \frac{Z_0}{Y_0^2 + Z_0^2}$$

l'expression 3.22 devient :

$$V_{rad}(y,z) = \frac{V_0}{R} \left[z \cos\phi \cos\theta - y \sin\phi\right] \tag{3.24}$$

et l'expression 3.23 devient :

$$V_{rad}(y,z) = \frac{V_0}{R} \left[(R+z) \cos\phi \cos\theta - y \sin\phi\right] \tag{3.25}$$

Récapitulatif :

Généralisons le résultat pour les deux cas :

$$V_{rad}(y,z) = \frac{V_0}{R} \left[(trans\ R + z) \cos\phi \cos\theta - y \sin\phi\right] \tag{3.26}$$

avec :

$$\begin{cases} trans = 0 & \text{si la roue est en rotation sans roulement} \\ trans = 1 & \text{si la roue roule sans glissement} \end{cases}$$

y et z sont exprimés dans le repère $[R1]$ de la roue tels que :

$$\begin{cases} -R \leq y \leq R \\ -R \leq z \leq R \\ y^2 + z^2 \leq R^2 \end{cases}$$

où R est le rayon de la roue.

Les figures 3.8 (rotation sans roulement) 3.9 (roulement sans glissement) mettent en évidence la répartition des vitesses radiales des différents points de la roue, en fonction des angles θ et ϕ. La variation de θ influe sur les valeurs des vitesses des points de la roue ; la variation de ϕ influe sur la position des vitesses radiales sur la roue.

Supposons que la roue se déplace en direction de l'observateur (la vitesse radiale du centre de gravité est positive). Pour une valeur de θ donnée, la vitesse radiale maximale est au sommet de la roue lorsque $\theta = 0$. Pour une valeur de ϕ donnée, l'étendue des vitesses est maximale lorsque

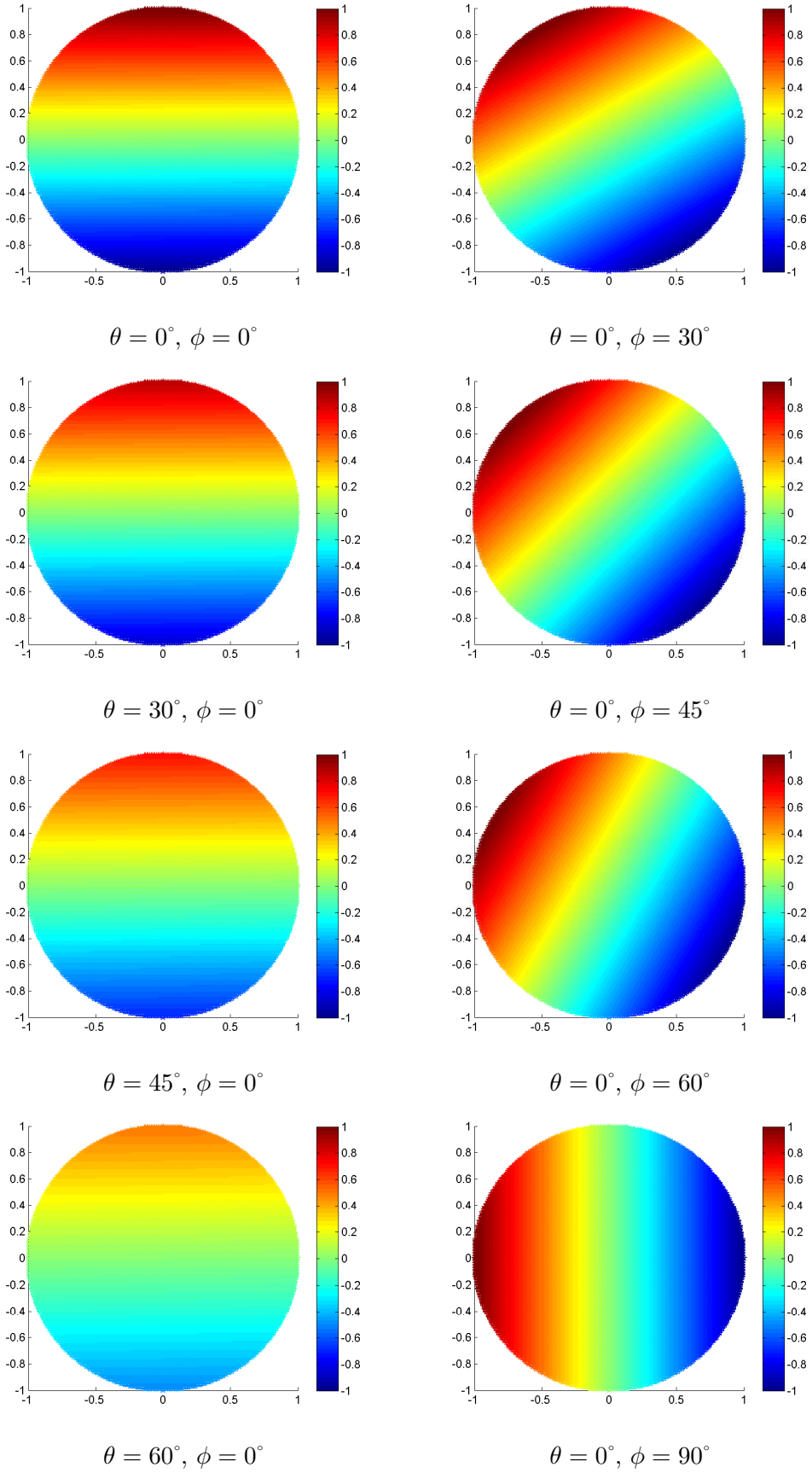


FIGURE 3.8 – Rotation sans roulement : variation de la vitesse radiale en fonction de ϕ et θ

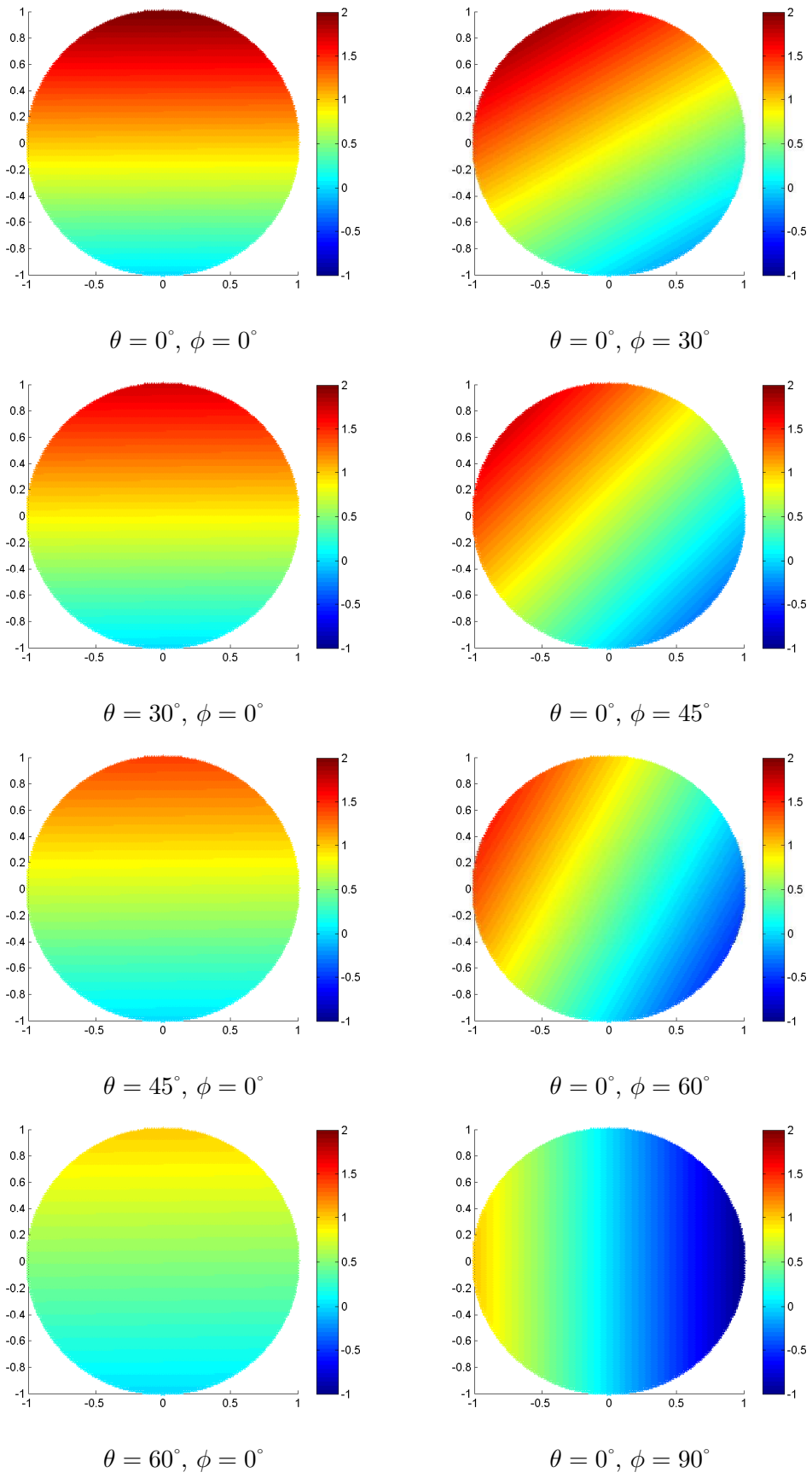


FIGURE 3.9 – Roulement sans glissement : variation de la vitesse radiale en fonction de ϕ et θ

$\theta = 0$, minimale lorsque $\theta = 90^\circ$.
Le choix de ces angles θ et ϕ se justifiera au chapitre 4 en fonction de l'orientation du radar (voir figure 4.3 par exemple).

Les tableaux 3.1 et 3.2 récapitulent les valeurs des vitesses maximum de la roue selon les angles θ et ϕ.

ϕ \ θ	0°	30°	45°	60°	90°
0°	-1 / 1	$-0,86$ / $0,86$	$-0,7$ / $0,7$	$-0,5$ / $0,5$	0 / 0
30°	-1 / 1	$-0,9$ / $0,9$	$-0,8$ / $0,8$	$-0,6$/ $0,6$	$-0,5$ / $0,5$
45°	-1 / 1	$-0,93$ / $0,93$	$-0,86$ / $0,86$	$-0,8$ / $0,8$	$-0,7$ / $0,7$
60°	-1 / 1	$-0,96$ / $0,96$	$-0,93$ / $0,93$	$-0,9$ / $0,9$	$-0,86$ / $0,86$
90°	-1 / 1	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$

TABLE 3.1 – Rotation ($V_0 = 1$ et $R = 1$) : V_{min} / V_{max} en m/s

ϕ \ θ	0°	30°	45°	60°	90°
0°	0 / 2	0 / $1,73$	0 / $1,41$	0 / 1	0 / 0
30°	$-0,14$ / $1,86$	$-0,15$ / $1,65$	$-0,18$ / $1,4$	$-0,2$ / $1,1$	$-0,5$ / $0,5$
45°	$-0,3$ / $1,7$	$-0,32$ / $1,54$	$-0,37$ / $1,36$	$-0,4$ / $1,1$	$-0,7$ / $0,7$
60°	$-0,5$ / $1,5$	$-0,53$ / $1,4$	$-0,58$ / $1,29$	$-0,65$ / $1,15$	$-0,87$ / $0,87$
90°	$-1/1$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$

TABLE 3.2 – Roulement sans glissement ($V_0 = 1$ et $R = 1$) : V_{min} / V_{max} en m/s

3.3.3 Etude analytique des vitesses radiales extrêmes

Nous nous intéressons ici aux valeurs extrêmes des vitesses radiales d'une roue en mouvement. Les extrema de la vitesse se situent sur la circonférence de la roue (r=R). M_1 est le point de la roue où la vitesse radiale est maximale, M_2 celui où elle est minimale (Fig 3.10).

Les coordonnées d'un point de la circonférence, dans le repère [R1] $(0, \overrightarrow{i}, \overrightarrow{j}, \overrightarrow{k})$, s'expriment :

$$M \begin{cases} 0 \\ R\cos\alpha \\ R\sin\alpha \end{cases} \tag{3.27}$$

où R est le rayon de la roue et $\alpha = (\overrightarrow{j}, \overrightarrow{OM})$.

Sur la circonférence de la roue, la vitesse radiale s'exprime alors en fonction de α :

$$V_{rad}(\alpha) = \frac{V_0}{R}\left[(trans\ R + R\sin\alpha)\cos\phi\cos\theta - R\cos\alpha\sin\phi\right]$$

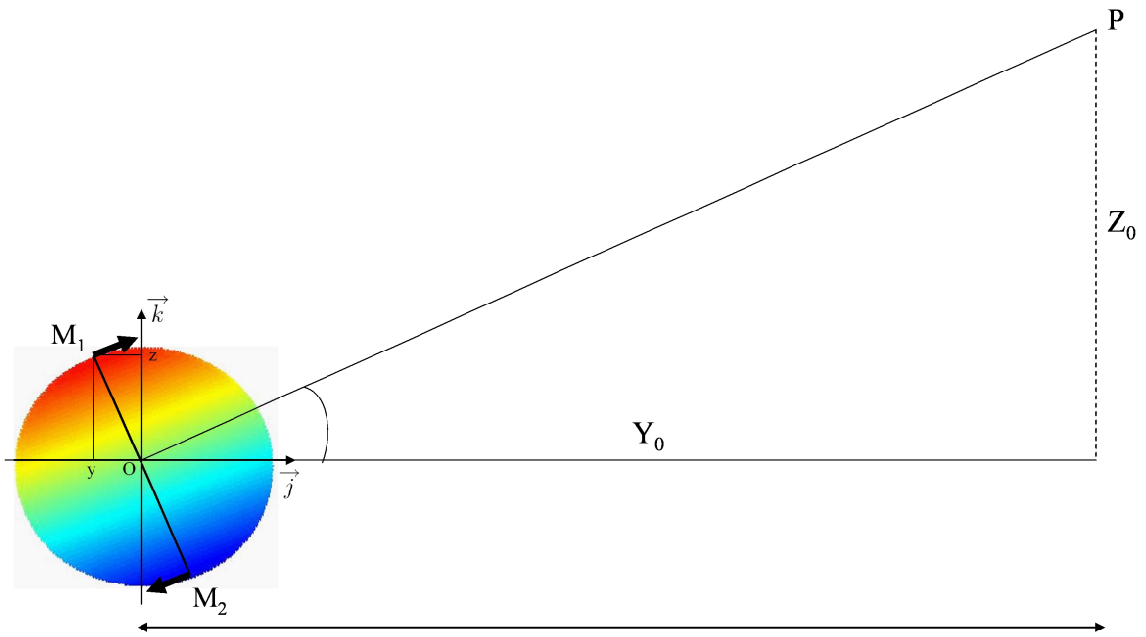


FIGURE 3.10 – Position des vitesses extrêmes de la roue

En divisant par R, la vitesse radiale sur la circonférence ne dépend plus du rayon de la roue :

$$V_{rad}(\alpha) = V_0 \left[(trans + \sin\alpha)\cos\phi\cos\theta - \cos\alpha\sin\phi\right] \tag{3.28}$$

Cherchons les valeurs de α où les vitesses sont extrêmes. Pour cela calculons la dérivée de la vitesse :

$$\frac{dV_{rad}(\alpha)}{d\alpha} = V_0 \left[\cos\alpha\cos\phi\cos\theta + \sin\alpha\sin\phi\right] \tag{3.29}$$

$$V_{rad}(\alpha) = 0 \Leftrightarrow \tan\alpha = -\frac{\cos\theta}{\tan\phi} \tag{3.30}$$

La dérivée s'annule pour :

$$\alpha_1 = \arctan\left(-\frac{\cos\theta}{\tan\phi}\right) \quad \text{et} \quad \alpha_2 = \arctan\left(-\frac{\cos\theta}{\tan\phi}\right) + \pi \tag{3.31}$$

avec $\phi \neq \dfrac{\pi}{2}$.

Nous nous plaçons dans la configuration où la roue se dirige vers un observateur situé au dessus de celle-ci ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ et $0 < \phi < \pi/2$). Dans ce cas, la vitesse minimum est obtenue pour l'angle α_1, la vitesse minimum pour l'angle $\alpha_2 = \alpha_1 + \pi$, soient :

$$\begin{cases} V_{min} = V_0 \left[(trans + \sin\alpha_1)\cos\phi\cos\theta - \cos\alpha_1\sin\phi\right] \\ V_{max} = V_0 \left[(trans - \sin\alpha_1)\cos\phi\cos\theta + \cos\alpha_1\sin\phi\right] \end{cases} \tag{3.32}$$

avec

$$\alpha_1 = \arctan\left(-\frac{\cos\theta}{\tan\phi}\right)$$

Les formulaires de trigonométrie permettent d'écrire :

$$\begin{cases} \cos\left(\arctan(u)\right) = \dfrac{1}{\sqrt{1+u^2}} \\ \\ \sin\left(\arctan(u)\right) = \dfrac{u}{\sqrt{1+u^2}} \end{cases} \tag{3.33}$$

En posant

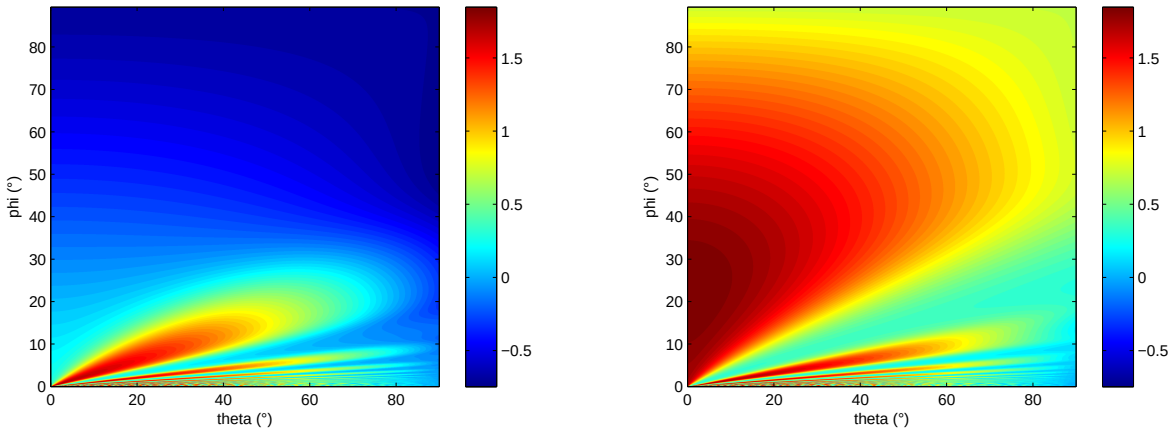
$$u = -\frac{\cos\theta}{\tan\phi}$$

le système devient :

$$\begin{cases} V_{min} = V_0 \left[\left(trans + \dfrac{u}{\sqrt{1+u^2}} \right) \cos\phi\cos\theta - \dfrac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin\phi \right] \\ \\ V_{max} = V_0 \left[\left(trans - \dfrac{u}{\sqrt{1+u^2}} \right) \cos\phi\cos\theta + \dfrac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin\phi \right] \end{cases} \tag{3.34}$$

Dans le cas de la rotation sans roulement ($trans = 0$), $V_{min} = V_{max}$.

La figure 3.11 montre l'évolution V_{min} et V_{max} en fonction des orientations θ et ϕ de la roue.



$V_{min}(\theta, \phi)$ $\qquad$ $V_{max}(\theta, \phi)$

FIGURE 3.11 – Roulement sans glissement : minimum et du maximum de la vitesse radiale en fonction des angles ϕ et θ ($V_0 = 1$ et $R = 1$)

Cas particuliers :

Lorsque $\phi = 0$

$$\begin{cases} V_{min} = V_0(trans - 1)\cos\theta \\ V_{max} = V_0(trans + 1)\sin\theta \end{cases} \tag{3.35}$$

Lorsque $\phi = \dfrac{\pi}{2}$

$$\begin{cases} V_{min} = -trans V_0 \cos\theta \\ V_{max} = \ trans V_0 \sin\theta \end{cases} \tag{3.36}$$

Vitesse moyenne : $V_{moy} = (V_{min} + V_{max})/2$
Cette valeur correspond à la vitesse du centre de la roue.
Dans le cas de la rotation sans roulement ($trans = 0$), $V_{max} = -V_{min}$: la vitesse moyenne est nulle.

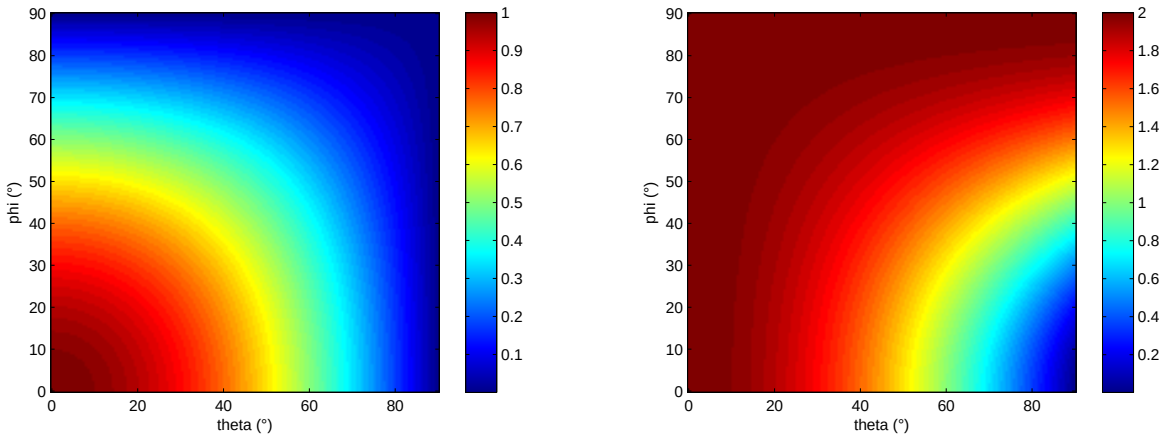
Dans le cas du roulement sans glissement ($trans = 1$)

$$V_{moy}(\theta, \phi) = V_0 \cos\phi \cos\theta \tag{3.37}$$

Étendue des vitesses : $\Delta V = V_{max} - V_{min}$
Dans le cas de la rotation sans roulement comme pour le roulement sans glissement :

$$\Delta V(\theta, \phi) = 2V_0 \frac{-u \cos\phi \cos\theta + \sin\phi}{\sqrt{1+u^2}} \tag{3.38}$$

La figure 3.12 montre l'évolution de la moyenne et de l'étendue des vitesses en fonction de l'orientation de la roue.



$V_{moy}(\theta, \phi)$ $\Delta V(\theta, \phi)$

FIGURE 3.12 – Variation de la moyenne et de l'étendue des vitesses radiales en fonction des angles ϕ et θ ($V_0 = 1$ et $R = 1$)

3.4 Extraction de caractéristiques

Nous avons calculé la vitesse radiale des points d'une roue en fonction de son orientation par rapport à un axe de visée, défini entre un observateur et le centre de la roue.
Nous abordons cette fois le problème en sens inverse. Étant donné qu'il est possible de définir les vitesses en fonction de l'orientation et la dimension de la roue, pourquoi ne pas chercher à extraire ces paramètres à partir de relevés de vitesses.
Compte tenu que nous projetons notre étude en imagerie radar, nous serons amenés à analyser des fréquences Doppler, proportionnelles aux vitesse radiales. En particulier, l'analyse des bornes du spectre peut fournir des informations sur les caractéristiques géométriques de la roue.

Dans l'étude, nous partons de l'hypothèse que ϕ est connu. En effet dans la relation :

$$\cos\phi = \frac{Z_0}{D}$$

D, la distance entre l'observateur et la roue, et Z_0, la hauteur du point d'observation par rapport à la roue, sont supposés connus.

D'après le système 3.34, les extrema des vitesses radiales s'écrivent :

$$V_{min} = V_0 \left[\left(trans + \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \right) \cos\phi\cos\theta - \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin\phi \right] \tag{3.39a}$$

$$V_{max} = V_0 \left[\left(trans - \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \right) \cos\phi\cos\theta + \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin\phi \right] \tag{3.39b}$$

avec :

$$u = -\frac{\cos\theta}{\tan\phi}$$

En additionnant (3.39a) à (3.39b), nous obtenons :

$$V_{min} + V_{max} = 2V_0 trans \cos\theta \tag{3.40}$$

Dans le cas de la rotation sans roulement ($trans = 0$), l'équation 3.40 devient :

$$V_{min} + V_{max} = 0 \tag{3.41}$$

Dans le cas du roulement sans glissement ($trans = 1$)

$$V_{min} + V_{max} = 2V_0 \cos\phi\cos\theta \tag{3.42}$$

ce qui permet d'écrire :

$$\cos\theta = \frac{V_{min} + V_{max}}{2V_0 \cos\phi} \tag{3.43}$$

En ôtant (3.39a) à (3.39b), nous obtenons, dans le cas de la rotation sans roulement comme pour le roulement sans glissement :

$$V_{max} - V_{min} = 2V_0 \frac{\sin\phi - u\cos\phi\cos\theta}{\sqrt{1+u^2}} \tag{3.44}$$

Dans le cas de la rotation sans roulement, le système comporte une seule équation et trois inconnues. La connaissance de V_0 et ϕ permet de déduire θ.

Dans le cas du roulement sans glissement, le système 3.45 comporte deux équations et trois inconnues :

$$\begin{cases} V_{min} + V_{max} = 2V_0 \cos\phi\cos\theta \\ \\ V_{max} - V_{min} = 2V_0 \dfrac{\sin\phi - u\cos\phi\cos\theta}{\sqrt{1+u^2}} \end{cases} \tag{3.45}$$

avec :

$$u = -\frac{\cos\theta}{\tan\phi}$$

Connaissant ϕ (grâce à la hauteur et la distance de l'observateur à la cible), il est possible de retrouver θ (au signe près) et V_0.

Pour cela, nous exprimons V_0 dans la première équation et nous l'injectons dans la deuxième, pour trouver.

$$\frac{V_{min}+V_{max}}{V_{max}-V_{min}} = \frac{\sin\phi\cos\theta}{\tan\phi+\cos\phi\cos^2\theta}\sqrt{1+\frac{\cos^2\theta}{\tan^2\phi}} \tag{3.46}$$

Après développement et simplification, l'équation 3.46 devient :

$$(A^2C - C)\ cos^4\theta + (A^2E - B)\ cos^2\theta + A^2D = 0 \tag{3.47}$$

avec :

$$\begin{cases} A = \dfrac{V_{min}+V_{max}}{V_{max}-V_{min}} \\ B = \tan^4\phi\cos^2\phi \\ C = \sin^2\phi \\ D = \tan^4\sin^2\phi \\ E = 2\tan^3\phi\cos\phi\sin\phi \end{cases}$$

En posant :

$$\begin{cases} a = (A^2C - C) \\ b = (A^2E - B) \\ c = A^2D \end{cases}$$

l'équation 3.47 devient :

$$a\ cos^4\theta + b\ cos^2\theta + c = 0 \tag{3.48}$$

En posant $X = cos\theta$, cela devient une équation bicarrée :

$$aX^4 + bX^2 + c = 0 \tag{3.49}$$

dont les racines réelles sont :

$$X_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{-b-\sqrt{\Delta}}{2a}} \tag{3.50}$$

avec $\Delta = b^2 - 4ac$

Finalement, l'angle θ recherché s'exprime :

$$\theta_{1,2} = \pm\arccos\left(\sqrt{\frac{-b-\sqrt{\Delta}}{2a}}\right) \tag{3.51}$$

L'angle θ peut donc être connu au signe près, ce qui permet d'exprimer la vitesse de translation de la roue :

$$V_0 = \frac{V_{min}+V_{max}}{2\cos\phi\cos\theta} \tag{3.52}$$

Chapitre 4

Imagerie radar de la roue

Cette roue sur laquelle nous tournons est pareille à une lanterne magique.
Le soleil est la lampe ; le monde, l'écran ; nous sommes les images qui passent.

Omar Khayyâm

Sommaire

4.1 Données réelles et données simulées 62
4.1.1 Acquisitions de données réelles 62
4.1.2 Données simulées 63
4.2 Analyse des résultats 64
4.2.1 Rotation sans roulement 65
4.2.2 Roulement sans glissement 73

Dans ses travaux, V.Chen a proposé une modélisation mathématique du signal réfléchi par une structure tournante. Cela a permis d'analyser les caractéristiques du spectre micro-Doppler dans le cas d'une structure de type rotor (section 1.3).
L'étude du chapitre 3 apporte un complément sur ces travaux en analysant les vitesses d'une roue pleine en fonction des conditions de visée. Cette approche permet de retrouver l'orientation et la vitesse de translation de la roue, dans le cas d'un roulement sans glissement.

Le radar HYCAM, développé par l'ONERA, a permis de mettre en évidence sur des données réelles l'effet micro-Doppler de cibles mobiles. Nous avons ainsi effectué des mesures d'une part sur des objets tournant sur un support fixe (ventilateur et roue de vélo : rotation sans roulement) et d'autre part sur des cibles composées d'entités tournantes (voiture et vélo : roulement sans glissement).
Parallèlement nous avons développé un outil permettant de calculer des images radar à partir de données simulées.

4.1 Données réelles et données simulées

4.1.1 Acquisitions de données réelles

La campagne d'acquisitions réalisée au mois d'Avril 2008 a permis de constituer une base de données afin de mettre en évidence les micro-Doppler induits par le mouvement de structure tournantes dans différentes configurations. La géométrie du terrain d'observation, les caractéristiques du radar et les paramètres de la mesure sont spécifiés dans la section 2.2.

Pour isoler et analyser le comportement de structures tournantes vis à vis du radar, nous avons utilisé une roue de bicyclette que nous avons fixée sur un support et mise en rotation.
La roue est de type « Vélo Tout Terrain », de rayon $R = 33$ cm. La jante est composée de $N = 36$ rayons, fixés de part et d'autre du moyeu. La roue a été équipée d'un tachymètre, relié à un compteur, afin de connaître sa vitesse de rotation.

En parallèle, des mesures ont été effectuées sur un ventilateur, de manière à comparer les résultats pour deux types de structures tournantes. Le ventilateur est composé de $N = 4$ pales métalliques de rayon $R = 15$ cm. Il dispose de trois vitesses de rotation qui, contrairement à la roue, n'ont pas pu être mesurées [1]. L'avantage de ce système est de pouvoir conserver une vitesse de rotation constante d'une acquisition à l'autre.

Nous aurions également voulu effectuer des mesures sur une roue de voiture montée sur un support fixe mais l'expérience n'a pas pu être réalisée pour des raisons techniques.

Après avoir étudié le comportement d'une roue isolée, l'étape suivante a consisté à mesurer les effets de la roue en tant qu'élément d'un véhicule. Nous avons donc choisi d'effectuer des acquisitions sur une bicyclette et sur une voiture. Étant en contact avec le sol, la roue effectue

1. En analysant le son produit par le ventilateur, il aurait été possible de retrouver cette vitesse

FIGURE 4.1 – Ventilateur et roue utilisés pour la mesure

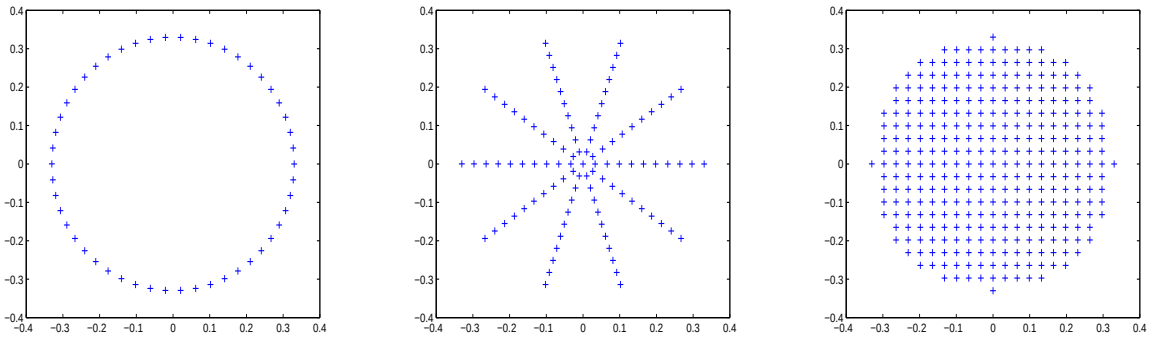
alors un roulement sans glissement.

4.1.2 Données simulées

L'outil de simulation, présenté dans la section 2.4, permet de calculer l'image radar d'un objet en mouvement, en connaissant l'évolution de la distance $D_k(t)$ entre le radar et chacun des réflecteurs k qui composent la cible.

Dans le cadre de cette étude, nous avons donc modélisé la trajectoire des points d'une roue pour différents types de roue et trajectoires.
Les types de roue sont (Fig 4.2) :

- la roue circulaire : réflecteurs sur la circonférence
- la roue à rayons : réflecteurs concentriques
- la roue pleine : quadrillage régulier des réflecteurs



(a) (b) (c)

FIGURE 4.2 – Répartition des réflecteurs sur la roue : circonférence (a), rayons (b), pleine (c)

Les trajectoires proposées sont :

- rotation sans roulement (cas de la roue de vélo uniquement)

– déplacement sur un cercle
– déplacement sur une ligne droite

Il est également possible de modéliser simplement des véhicules (bicyclette et voiture) en assemblant plusieurs roues autour d'une carcasse. De cette manière, il a ainsi été possible de reproduire les configurations des expérimentations afin de comparer les mesures réelles et les données simulées.

4.2 Analyse des résultats

Dimensions de l'image :
La résolution en distance ($\delta x = 18,5$ cm) et l'ambiguïté en distance ($\Delta x = 75$ m) sont fixées respectivement par la largeur de la bande et le pas entre les fréquences émises.
La détermination de l'ambiguïté Doppler se fait au moment de l'acquisition alors que la résolution Doppler est fixée par le temps d'intégration lors du traitement Doppler. Le choix de l'échantillonnage Doppler dépend donc de l'étendue des vitesses à mesurer. Dans le cas de l'expérience sur la roue, le vélo et la voiture, un échantillonnage à 2 KHz ($T_r = 0,5$ ms) permet d'obtenir une ambiguïté vitesse de 28 m/s, ce qui permet de ne pas replier les vitesses mesurées. Concernant le ventilateur, nous avons choisi un échantillonnage à 4 KHz ($T_r = 0,25$ ms) de manière à éviter le repliement pour les vitesses élevées.
Les images présentées dans ce chapitre ont été calculées en prenant un temps d'intégration $\Delta T = 0,2$ s, ce qui correspond à une résolution Doppler $f_d = 5$ Hz et une résolution en vitesse de $\delta V = 0,05$ m/s.
Le tableau 4.1 récapitule les paramètres définissant les dimensions de l'image :

Bande du signal	$B = 800$ MHz
Pas fréquentiel	$\delta f = 2$ MHz
Nombre de fréquences	$N = 400$
Bande d'émission	[10 - 10,8] GHz
Échantillonnage Doppler	$T_r = 0,25$ ms ou $0,5$ ms
Temps d'intégration	$\Delta T = 0,2$ s

TABLE 4.1 – Paramètres définissant les dimensions de l'image

Orientation de la roue par rapport au radar :
Comme cela a été expliqué dans le chapitre 3, la roue est orientée par rapport au radar selon deux angles, l'azimut θ et l'élévation ϕ, représentés sur la figure 4.3. L'élévation augmente avec la hauteur du radar. L'azimut est nul lorsque la roue se déplace dans la direction du radar et vaut 90° lorsque le déplacement est orthogonal.

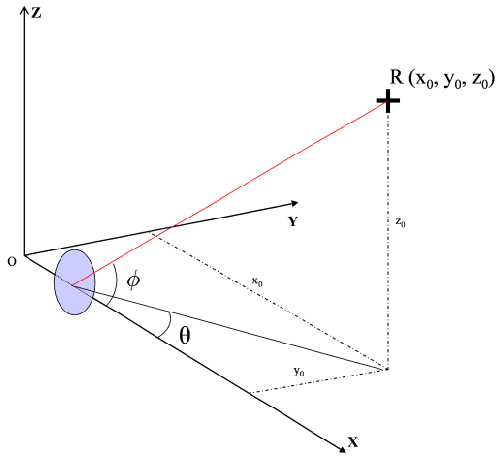


FIGURE 4.3 – Orientation de la roue par rapport au vecteur de visée

4.2.1 Rotation sans roulement

$\theta = 0^\circ$ $\theta = 45^\circ$ $\theta = 90^\circ$

FIGURE 4.4 – Rotation d'une roue de bicyclette

Lors des acquisitions, la roue du vélo et le ventilateur ont été tour à tour positionnés au centre de la scène d'acquisition, à environ 25 m des antennes du radar, comme le montre la figure 4.4. La roue est positionnée de telle sorte que le plan de rotation soit perpendiculaire au sol. De cette manière, l'axe de rotation de la roue et l'axe de visée du radar forment un angle $\phi = 45^\circ$.
Dans le cas du ventilateur, la situation est différente puisqu'il est monté sur un support orientable. Il est alors possible de le positionner de façon à ce que le plan de rotation des pales soit perpendiculaire à l'axe de visée du radar. De cette manière, l'élévation ϕ est nulle.
Pour la roue comme pour le ventilateur, les mesures ont été effectuées en faisant varier la vitesse de rotation et l'azimut θ.
Quant aux images simulées, elles ont été réalisées dans les mêmes conditions géométriques et pour les mêmes vitesses de rotation que les données réelles.

En s'appuyant sur des résultats issus de données réelles et de données simulées, nous avons analysé la signature Doppler d'une roue et d'un ventilateur. Les résultats obtenus ne concordent pas toujours exactement avec les valeurs attendues mais il n'y a pas non plus de contradiction.

Variation de la vitesse de rotation :

Tout d'abord, nous avons mis en évidence la variation de l'étendue du spectre micro-Doppler lorsque la vitesse de rotation varie. Les figures 4.5 et 4.6 sont respectivement les images des données simulées et réelles d'une roue située dans l'axe du radar ($\theta = 0^\circ$) pour deux vitesses de rotation. L'orientation de la roue est identique entre les deux acquisitions.

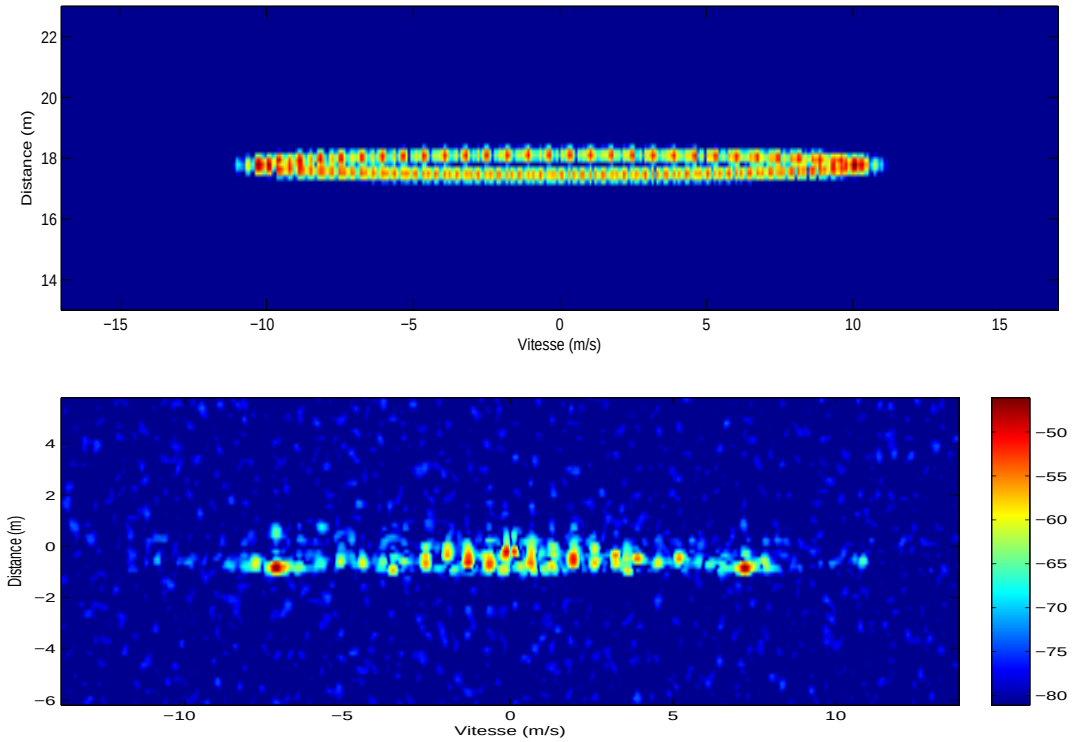


FIGURE 4.5 – Données simulées et réelles ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$) pour $V_1 = 10,6$ m/s

Les résultats des simulations montrent que pour $\theta = 0^\circ$, la hauteur du radar n'influe pas sur l'étendue du spectre. La vitesse estimée par le Doppler est égale à la vitesse réelle. En effet, la position des réflecteurs de la roue qui réfléchissent la vitesse maximale varie avec la hauteur du radar (c'est à dire l'angle ϕ) qui conditionne donc l'analyse Doppler de la roue comme nous l'avons vu au chapitre 3.

Concernant les données expérimentales, les vitesses maximales estimées ne concordent pas avec les vitesses réelles. Ici, les vitesses mesurées sont de $7,8$ m/s et $11,9$ m/s pour des vitesses effectives de $10,6$ m/s et $16,1$ m/s. Le rapport entre la vitesse estimée et la vitesse réelle reste cependant constant entre les deux mesures : $\dfrac{V_{estime}}{V_{reelle}} \simeq 0,74$

Plusieurs hypothèses sont émises quant à l'erreur commise. Tout d'abord, il est probable que la roue ne soit pas exactement positionnée dans l'axe de visée. Il est effectivement difficile d'évaluer l'angle θ avec précision. Il est également possible que tous les réflecteurs de la roue ne soient pas visibles par le radar, notamment ceux dont la vitesse est la plus élevée. En outre, il est difficile de savoir quelles parties de la roue réfléchissent. Plus particulièrement, il est possible que seuls les rayons de la roue rétrodiffusent vers le radar, ce qui corrobore le fait que la vitesse mesurée par le radar soit plus faible que la vitesse réelle, mesurée à l'extrémité du pneu.

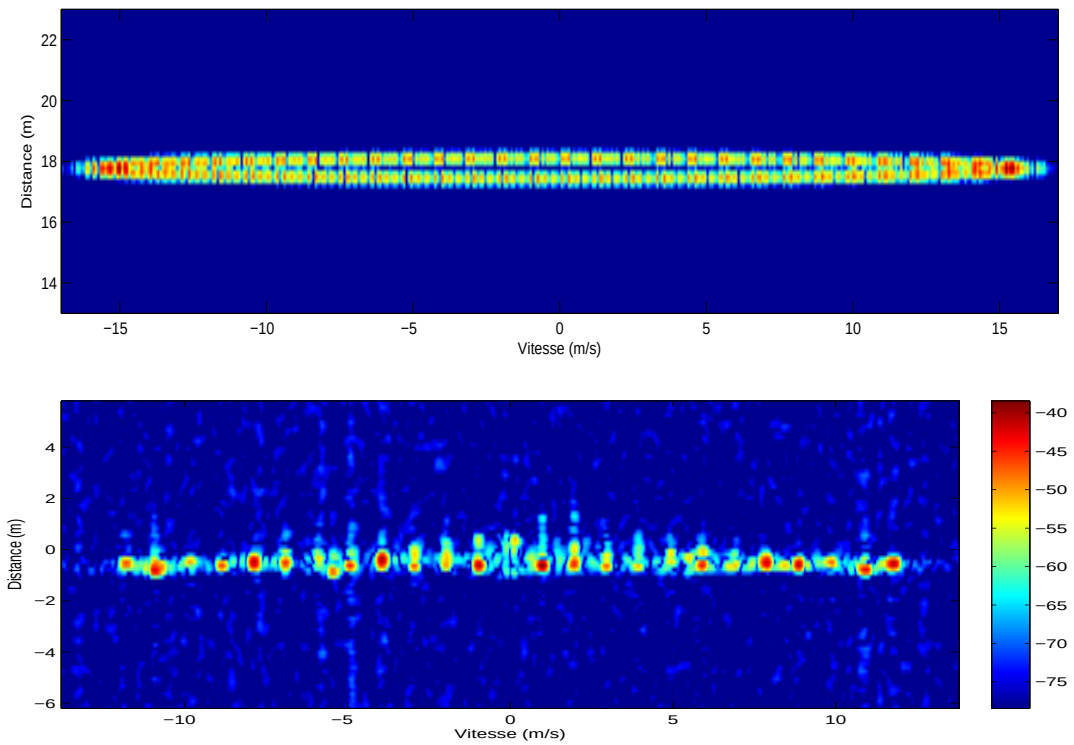


FIGURE 4.6 – Données simulées et réelles ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$) pour $V_1 = 16,1$ m/s

Dans le cas simulé comme dans le cas réel, l'étendue du spectre varie proportionnellement à la vitesse :

$$\frac{V_{estime_1}}{V_{estime_2}} = \frac{V_{reel_1}}{V_{reel_2}} \simeq 0,66$$

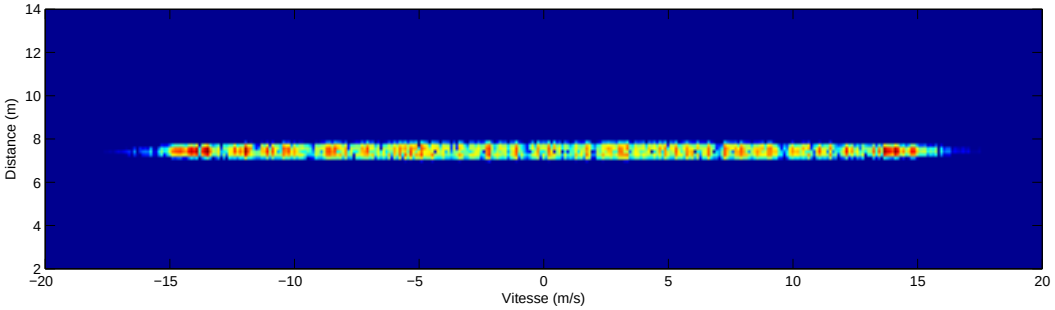
En conclusion, l'étendue des vitesses estimée sur les données réelles ne reflète pas la réalité mais elle varie dans les mêmes proportions que la vitesse réelle. Cela signifie qu'il est possible d'étalonner la mesure effectuée par une mesure référence pour retrouver la valeur attendue. Ce constat conforte l'hypothèse que la vitesse mesurée n'est pas celle de l'extrémité de la roue.

Variation de l'azimut θ :

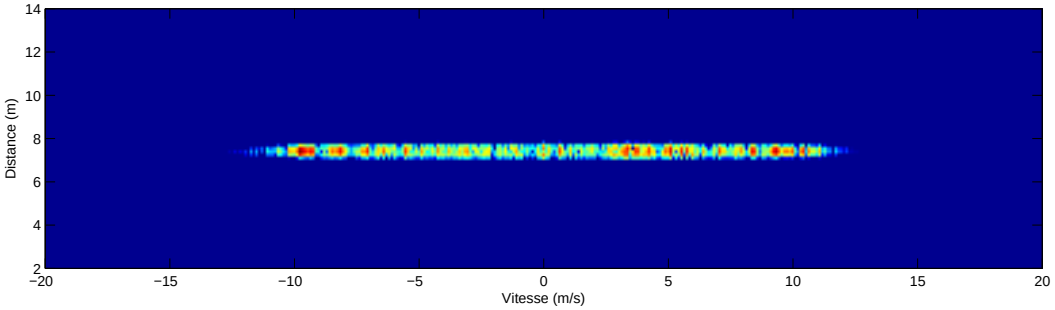
Après avoir mis en évidence la variation de l'étendue du spectre micro-Doppler avec la vitesse réelle, nous avons choisi d'étudier les effets de l'orientation en azimut θ de la roue par rapport au radar. Nous avons analysé les effets du ventilateur et de la roue en comparant les données réelles et les données simulées.

Tout d'abord, commençons par les cas du ventilateur, lorsque l'élévation ϕ est nulle.
Les images issues des données simulées (Fig 4.7) montrent que l'étendue du spectre Doppler varie avec avec le cosinus de l'angle θ puisque la vitesse radiale est la projection du vecteur vitesse. Il apparaît donc logique que l'étendue du spectre soit nulle lorsque le plan de rotation est perpendiculaire au vecteur de visée puisque tous les vecteurs vitesse appartiennent à ce plan.

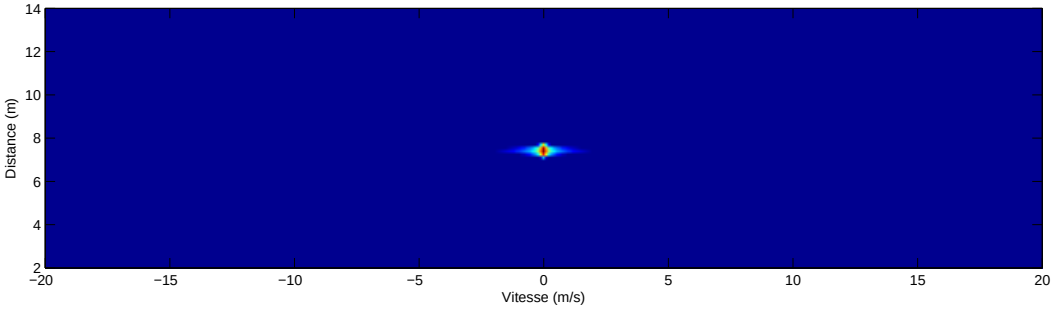
$$\frac{V_{estime}}{V_0} = cos\ \theta$$



$\theta_1 = 0^\circ$



$\theta_2 = 45^\circ$



$\theta_3 = 90^\circ$

FIGURE 4.7 – Simulation du ventilateur ($\phi = 0^\circ$, $V_0 = 15$ m/s) : variation de l'étendue de la vitesse mesurée den fonction de θ

Les images issues des données réelles (Fig 4.8) vont dans le même sens que le modèle. La vitesse de rotation du ventilateur, qui malheureusement n'est pas connue, est identique pour les trois acquisitions. Soit ΔV l'étendue des vitesses mesurées. Lorsque $\theta = 0^\circ$, $\Delta V = 30,2$ m/s ; lorsque $\theta = 45^\circ$, $\Delta V = 22,8$ m/s. Le ratio entre les deux mesures vaut $\cos(41^\circ)$, ce qui correspond quasiment à l'angle θ, sachant qu'il est difficile de mesurer précisément l'angle entre les deux mesures.
Concernant l'acquisition à $\theta = 90^\circ$, il est très difficile de tirer des conclusions sur l'image obtenue. Selon toute vraisemblance, l'étendue du Doppler est nulle, même s'il est possible d'observer des échos parasites. Ces échos apparaissent certainement du fait que le ventilateur n'est pas parfaitement positionné à $\theta = 90^\circ$. Il est également envisageable que des réflexions multiples puissent se produire et induire des échos Doppler parasites.

Dans le cas de la roue, l'analyse est différente puisque l'élévation est fixe ($\phi = 45^\circ$). Cette

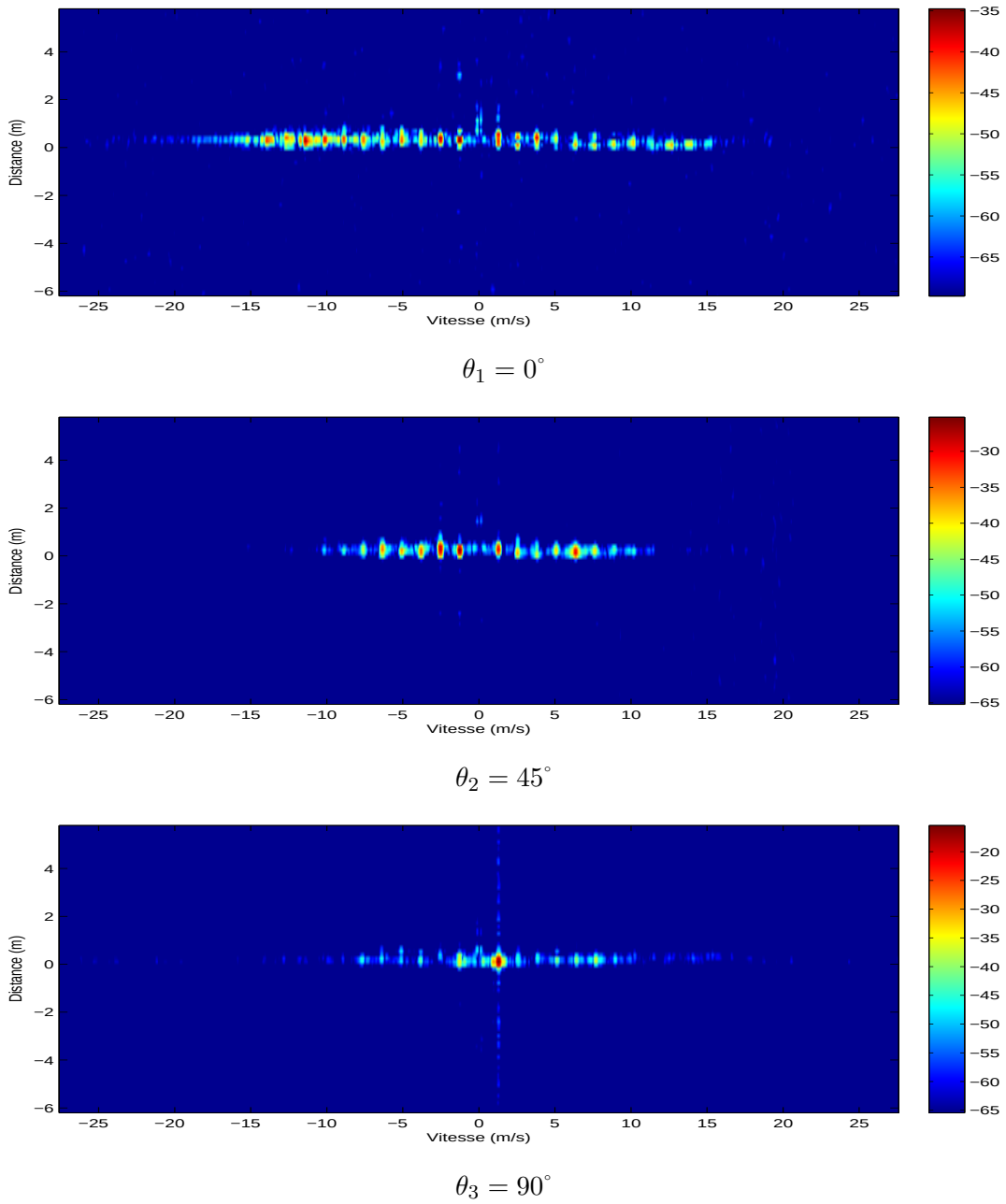
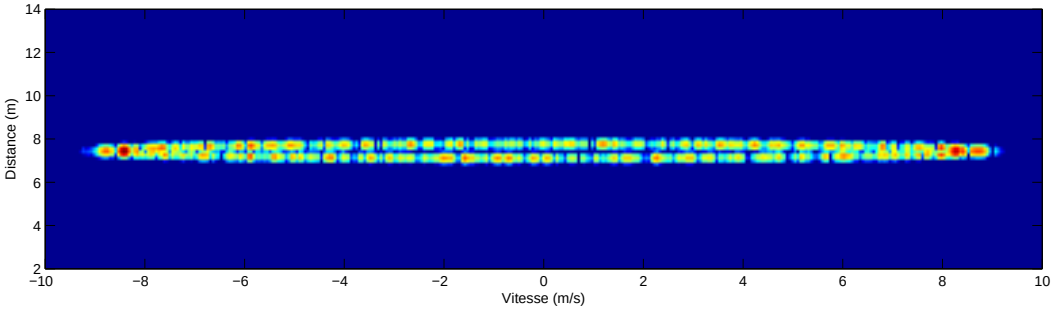


FIGURE 4.8 – Données réelles du ventilateur ($\phi = 0^\circ$, vitesse de rotation constante) : variation de l'étendue de la vitesse mesurée de fonction de θ

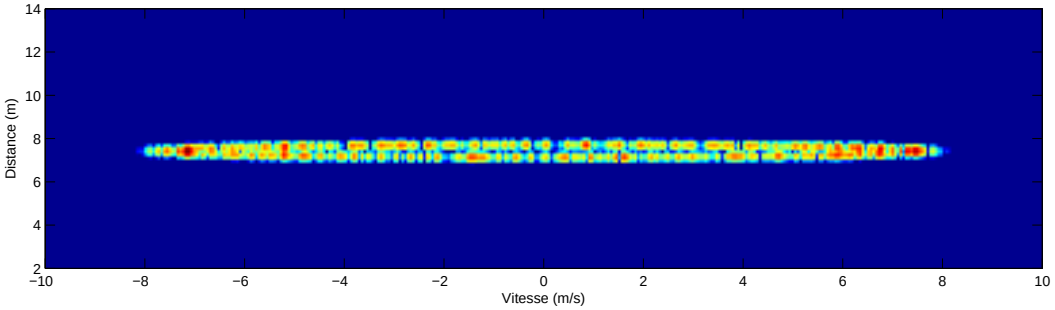
considération est importante puisqu'elle intervient dans le calcul de l'étendue Doppler. Le modèle analytique développé dans le chapitre 3 stipule que :

$$\begin{aligned} \Delta V(\theta, \phi) &= 2V_0 \frac{\sin\phi - u\cos\phi\cos\theta}{\sqrt{1+u^2}} \\ \text{avec} \quad u &= -\frac{\cos\theta}{\tan\phi} \end{aligned} \tag{4.1}$$

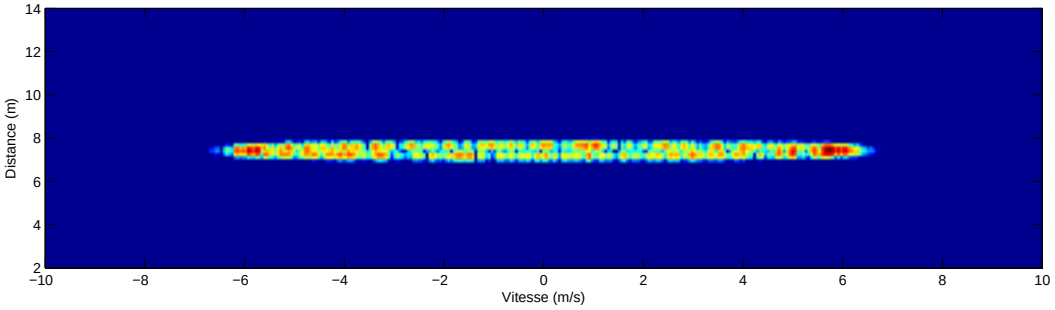
Les images de la figure 4.9 sont simulées, en prenant $V_0 = 9$ m/s et $\phi = \pi/4$ et en faisant varier θ. A partir de l'équation 4.1, nous avons calculé l'étendue de la vitesse $\Delta V(\theta, \phi)$, en reprenant



$\theta_1 = 0^\circ$



$\theta_2 = 45^\circ$



$\theta_3 = 90^\circ$

FIGURE 4.9 – Simulation de la roue en rotation sans roulement ($\phi = 45^\circ$, $V_0 = 9$ m/s) : variation de l'étendue de la vitesse en fonction de θ

les paramètres de la simulation :

$$\begin{cases} \Delta V(0, \pi/4) = 18 \text{ m/s} \\ \Delta V(\pi/4, \pi/4) = 15,36 \text{ m/s} \\ \Delta V(\pi/2, \pi/4) = 12,72 \text{ m/s} \end{cases}$$

Ces valeurs correspondent à l'étalement en vitesse constaté sur les images des données simulées (Fig 4.8), ce qui permet de valider le modèle vis à vis du simulateur.
L'interprétation des données réelles (Fig 4.10) pose quant à elle beaucoup plus de problèmes puisque l'étendue des vitesses reste constante quelque soit l'angle θ. Ce constat ne va pas dans le sens du modèle. Il est normal qu'il y ait du Doppler quelle que soit l'orientation puisque l'élévation ϕ est de 45°. Dans l'exemple, nous avons vérifié la relation suivante :

$$\forall\theta \qquad \frac{V_{estime}}{V_{reel}} = 0,67 = \cos(48^\circ)$$

Malheureusement, nous ne disposons pas de données lorsque le ventilateur se situe dans la même configuration que la roue ($\phi = 45^\circ$) ; de même il n'y a pas d'acquisition de la roue pour $\phi = 0^\circ$. Cela aurait permis de comparer les données du radar et du ventilateur dans les mêmes conditions de visée.

La raison pour laquelle la roue ne se comporte pas comme dans la simulation vient certainement du fait que le modèle de réflexion d'une roue de vélo (composée de rayons) n'est pas le même qu'une roue pleine. Or, c'est à partir de ce dernier que l'analyse du chapitre 3 a été faite. A priori, ce sont les rayons qui réfléchissent vers le radar, compte tenu du caractère échantillonné du spectre. Vraisemblablement, les rayons de la roue sont directifs et ne flashent que dans une direction précise.
La question reste donc ouverte pour comprendre pourquoi l'étendue du spectre Doppler ne varie pas, pour une vitesse de rotation donnée.

Écart entre les raies :
Sur les données réelles de la roue de vélo et du ventilateur, le spectre Doppler du signal reçu apparaît comme échantillonné, pourvu que la vitesse de rotation soit suffisamment élevée.
Le simulateur d'images radar que nous avons développé ne nous permet pas de mettre en évidence l'échantillonnage des raies Doppler. En effet la modélisation du signal est effectuée en calculant le déphasage des points brillants qui constituent la roue en fonction de leur position par rapport au radar. L'image radar permet simplement de calculer la distance et le Doppler (ou la vitesse). Pour mettre en évidence ce phénomène, il faut utiliser la modélisation de Chen (section 1.3). Ce dernier a proposé une formulation mathématique de l'effet micro-Doppler induit par une cible en rotation. La représentation fréquentielle de ce modèle est un spectre de raies. L'écart entre les raies δf et l'étendue du spectre Δf sont définis par :

$$\begin{cases} \delta f = \dfrac{N\Omega}{2\pi} \\ \\ \Delta f = \dfrac{4R\Omega}{\lambda_0} \end{cases} \tag{4.2}$$

où N est le nombre de pales ou de rayons et Ω la vitesse de rotation.

Exprimons le nombre de rayon à partir de la relation 4.2 :

$$N = \frac{2\pi\delta f}{\Omega} = \frac{4\pi\delta v}{\lambda_0\Omega} \tag{4.3}$$

où δv est le pas entre deux raies exprimées en vitesse radiale.

L'écart entre les fréquences δf représente la fréquence des impulsions, à savoir le nombre de pales ou de rayons, vus par seconde. Cette fréquence étant la même, quelle que soit l'orientation de la roue, il faut donc utiliser la vitesse de rotation effective et non la vitesse mesurée par le radar.

Nous avons essayé de vérifier cette relation sur les données réelles.
Dans le cas de la roue, nous avons mesuré la vitesse de la roue V_0 avec un compteur. La vitesse

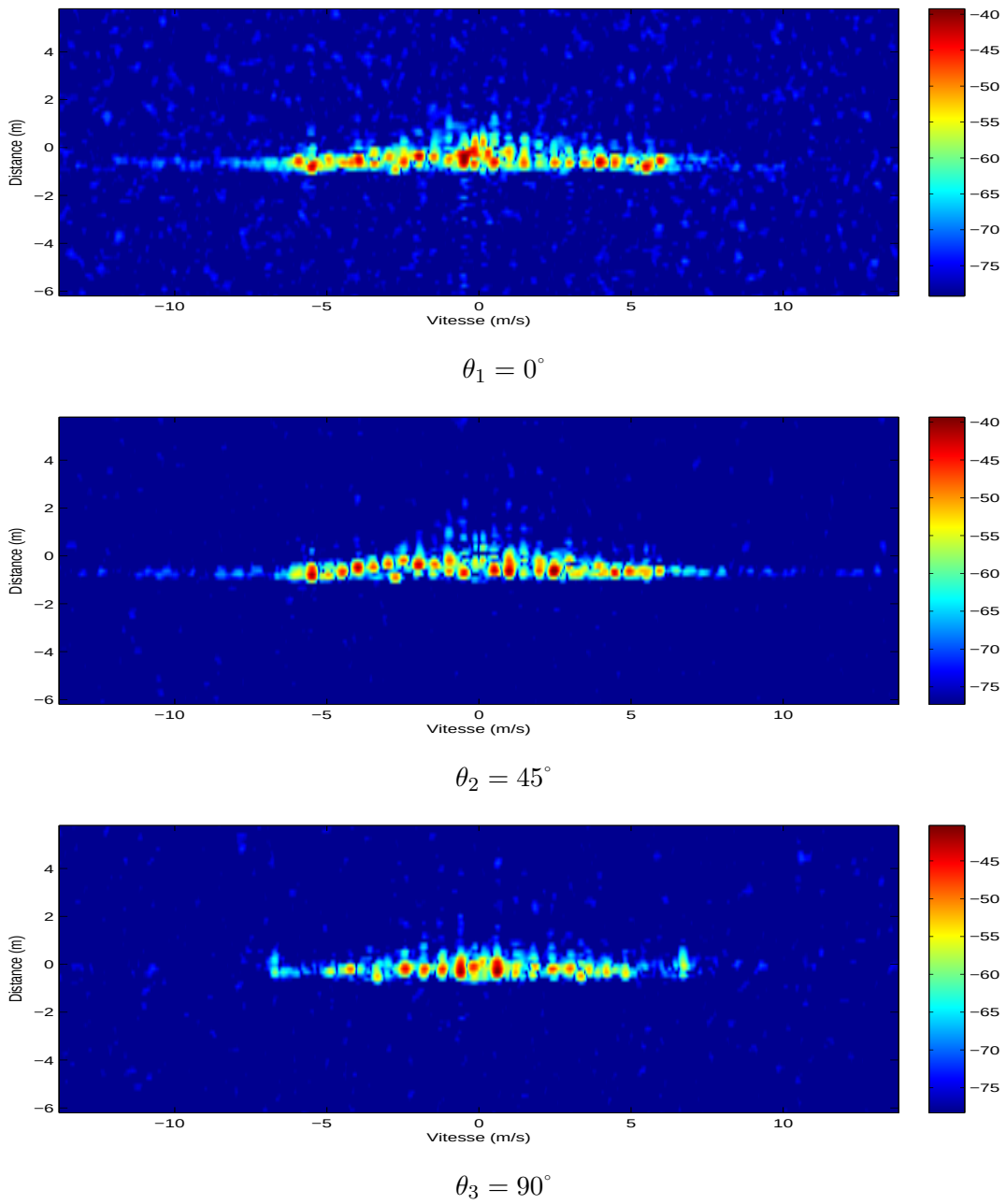


FIGURE 4.10 – Données réelles de la roue sans roulement ($\phi = 45^\circ$, $V_0 = 9$ m/s) : variation de l'étendue de la vitesse mesurée de fonction de θ

de rotation s'écrit :

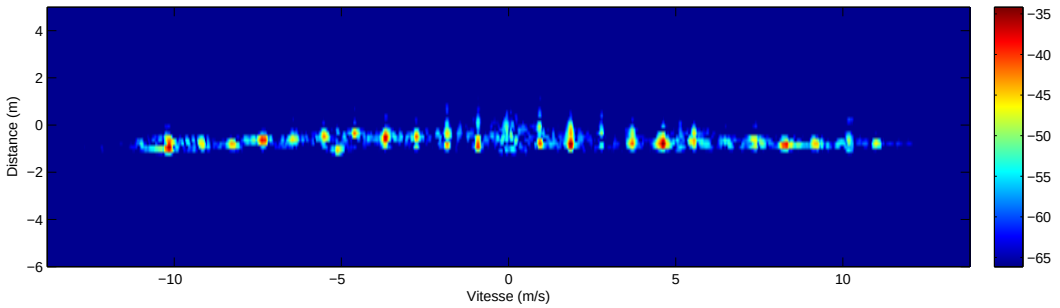
$$\Omega = \frac{V_0}{R}$$

où le rayon de la roue $R = 0,33$ m. Sur l'exemple de la figure 4.11.a, la vitesse relevée sur le compteur donne $V_0 = 15$ m/s. L'écart entre les raies est $\delta v = 0,92$ m/s ce qui permet d'obtenir $N = 9,1$. Ce nombre ne correspond pas à la quantité effective de rayon (la roue en comporte 36). Cette valeur laisse à penser que seul un quart des rayons est visible par le radar. Et en observant plus finement la structure de la roue, il apparaît que pour un point de passage de la roue, seul un quart des rayons a la même orientation. Cela explique que les rayons ne réfléchissent que pour une orientation donnée.

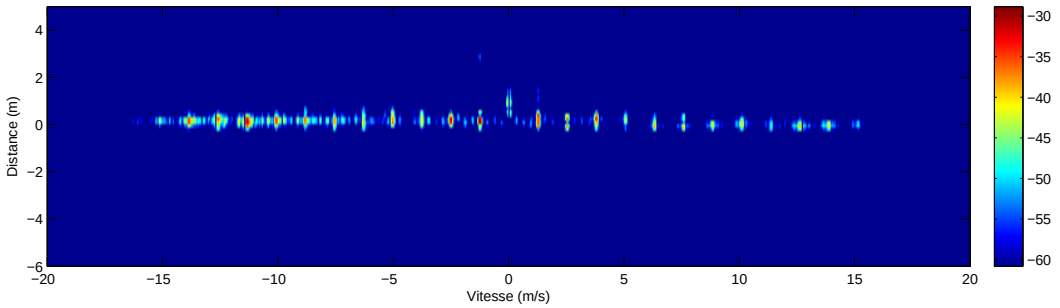
Dans le cas du ventilateur, la vitesse mesurée n'est pas la vitesse réelle. En supposant que la vitesse mesurée soit celle provenant de l'extrémité de l'hélice, il faut pondérer cette vitesse par l'angle entre les hélices et l'axe de visée pour obtenir la vitesse effective. La vitesse de rotation s'écrit :

$$\Omega = \frac{V_{estime}}{R\cos\theta}$$

Sur l'exemple de la figure 4.11.b, les pales du ventilateur ($R = 0,15$ m) sont dans l'axe de visée du radar ($\phi = 0^\circ$ et $\theta = 0^\circ$). La vitesse estimée, correspondant à la valeur maximum du spectre est $V_{estime} = 15,1$ m/s ; l'écart mesuré entre les raies est $\delta v = 1,25$ m/s ce qui permet d'obtenir $N = 5,6$. En réalité le ventilateur comporte $N = 4$ hélices, mais il est probable que l'écho renvoyé ne provienne pas de l'extrémité de l'hélice. En effet, chaque pale est en partie orienté vers l'intérieur (pour ventiler). En prenant $N = 4$ et $V_{estime} = 15,1$ m/s, la relation 4.3 permet d'obtenir $R = 0,11$ m. L'erreur provient également du fait que l'hélice n'est pas exactement positionnée dans l'axe de visée du radar ce qui augmenterait la vitesse estimée.



(a) Roue ($V_0 = 15$ m/s)



(b) Ventilateur

FIGURE 4.11 – Estimation de l'étendue des vitesses et de l'écart entre les raies

4.2.2 Roulement sans glissement

Après avoir étudié le comportement d'une roue isolée, l'étape suivante a été de mesurer les effets de la roue en tant qu'élément d'un véhicule. Nous avons donc choisi d'effectuer des acquisitions sur un vélo et sur une voiture.

4.2.2.1 Imagerie radar d'un vélo

Dans un premier temps, le vélo effectue une trajectoire rectiligne, sur l'axe $\theta = 45^{\circ}$, en se rapprochant du radar ; dans un second temps, il effectue une trajectoire circulaire. La photo (Fig 4.12) illustre les conditions de l'acquisition. Les images radar résultantes sont présentées sur la figure 4.13.

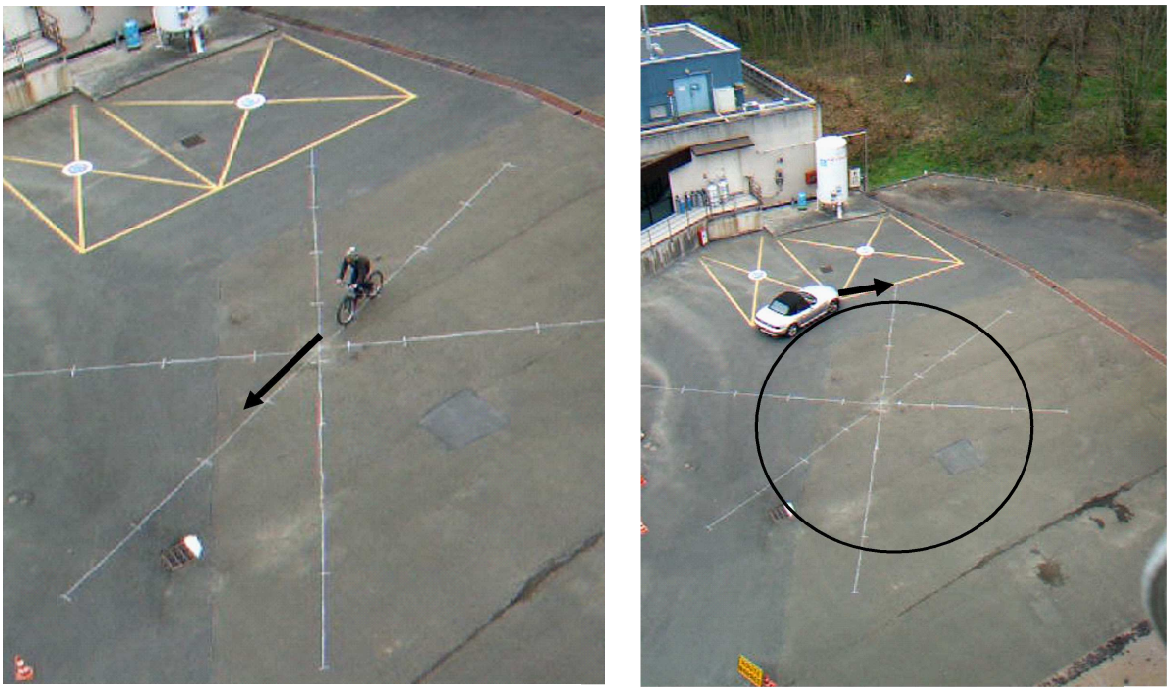
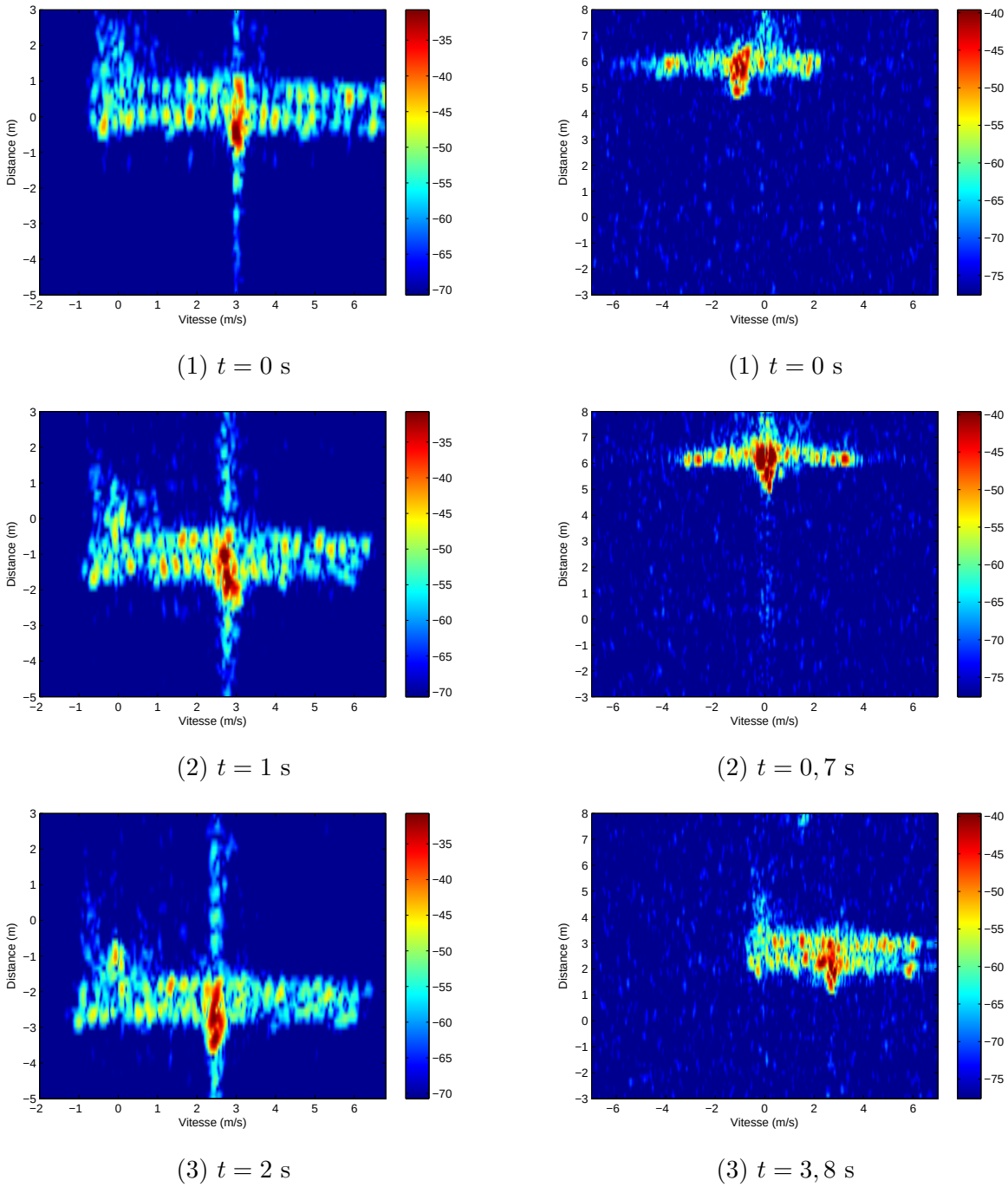


FIGURE 4.12 – Trajectoire rectiligne ou circulaire

Trajectoire rectiligne :
Analysons tout d'abord le cas de la trajectoire rectiligne. Le vélo se déplace vers le radar, le long d'une ligne désaxée de $\theta = 45^{\circ}$ par rapport à la projection de la ligne de visée sur le sol. De cette manière, les roues sont visibles durant toute l'acquisition. Le vélo se déplace à la vitesse de $4,7$ m/s (relevé du compteur de vitesse).

L'onde radar est réfléchie d'une part par la partie rigide du vélo (cycliste et cadre) qui effectue un mouvement de translation, d'autre part par les roues dont les points effectuent une rotation combinée à une translation.
La partie la plus brillante de l'image, correspondant à la partie rigide, se situe autour de 3 m/s. Cette vitesse correspond à la projection du vecteur de translation du vélo sur l'axe de visée du radar. L'angle entre les deux vecteurs, correspondant à l'angle d'élévation du radar ϕ, étant de 45°, le rapport entre la valeur de la vitesse réelle et la vitesse mesurée est respecté, à une erreur près liée à l'estimation de l'angle ϕ. En outre, plus le vélo se rapproche du radar, plus la vitesse correspondant à la partie rigide de la cible diminue. En effet, l'angle d'élévation diminue lorsque la cible se rapproche donc la vitesse radiale diminue.

Le phénomène micro-Doppler lié au mouvement des deux roues est remarquable dans cette série d'image. L'ensemble des fréquences Doppler correspondant à la rotation des roues est



(1) $t = 0$ s

(1) $t = 0$ s

(2) $t = 1$ s

(2) $t = 0,7$ s

(3) $t = 2$ s

(3) $t = 3,8$ s

FIGURE 4.13 – Imagerie radar (données réelles) d'un vélo ($V_0 = 4,7$ m/s) : trajectoire rectiligne (gauche), trajectoire circulaire (droite)

réparti autour du Doppler central de la cible, lié au mouvement de translation. L'étalement des vitesses reste constant ($\Delta V = 7$ m/s) mais les bornes du spectre varient en raison du Doppler central.

Grâce à la bonne résolution du radar HYCAM ($\delta x = 18,5$ cm), il est possible de distinguer les deux roues, puisque ces dernières sont espacées d'un mètre environ.

On constate également que le spectre micro-Doppler est un ensemble de raies, comme cela a été vu dans le cas de la rotation sans roulement. Ce phénomène d'échantillonnage est cependant

plus difficilement quantifiable. Ceci est notamment dû au fait que la vitesse de la roue n'est pas très élevée. Les raies ont donc tendance à se confondre alors qu'il est beaucoup plus facile de les distinguer lorsque la vitesse augmente. De plus, il peut y avoir des phénomènes de masquage des roues, de rebonds multiples, inhérents à l'imagerie radar et qui peuvent avoir des effets néfastes sur la quantification de l'échantillonnage.

Trajectoire circulaire :
Cette expérience permet d'analyser la signature d'un vélo, en situation réelle, en fonction de l'orientation des roues et du vecteur de déplacement. Le vélo se déplace à la vitesse de $4,7$ m/s.

Le Doppler lié au déplacement du cadre et du cycliste varie selon l'orientation du vecteur de déplacement par rapport au vecteur de visée. Le Doppler est négatif lorsque que le vélo s'éloigne, positif lorsqu'il se rapproche et nul lorsque le déplacement est perpendiculaire à l'axe de visée. Comme, cela avait été constaté lors des expérience sur support fixe, l'étalement du Doppler induit par le mouvement des roues varie très peu. L'amplitude des vitesses estimée reste compris entre 6 m/s et 7 m/s.
Lorsque les deux roues ne sont pas dans la même cellule de résolution en distance, il est possible de les discerner sur l'image radar. Sur la première image, la distinction est presque impossible. Sur la deuxième, les deux roues sont strictement équidistantes du radar puisque l'axe du vélo est perpendiculaire à l'axe de visée. Sur la troisième image, les deux roues sont discernables et distantes d'un mètre environ puisque le vélo se situe dans l'axe de visée.

4.2.2.2 Imagerie radar d'une voiture

Cette expérimentation est intéressante puisque le type de roue est différent des autres cas étudiés. La mesure s'est effectuée dans les mêmes conditions que celles sur le vélo ($V_0 = 4,7$ m/s).

L'interprétation est un peu plus délicate puisque le Doppler de la carcasse s'étale en distance en Doppler et vient se superposer au micro-Doppler induit par les roues. Concernant la dimension en Doppler, cela vient du fait que le véhicule effectue une rotation (dans le plan de la scène) donc tous les points de la carcasse ne vont pas à la même vitesse. Les points situés à l'extérieur du cercle sont plus rapides que ceux de l'intérieur, permettant ainsi de reconstituer la voiture en deux dimensions.

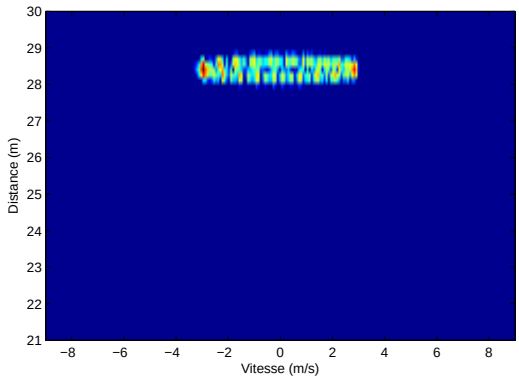
Le radar ne peut voir qu'un coté de la voiture à la fois. Ce sont donc, tantôt les roues du coté droit, tantôt celles du coté gauche qui sont mesurées. En outre, les roues ne sont pas visibles pendant toute la durée de l'acquisition. A certains moments, les roues peuvent être masquées par la carrosserie de la voiture (pare-choc), notamment lorsque le radar vise la voiture de face ou de dos.

Contrairement au cas de la roue, l'étendue du Doppler n'est pas constante durant toute la durée de l'acquisition.

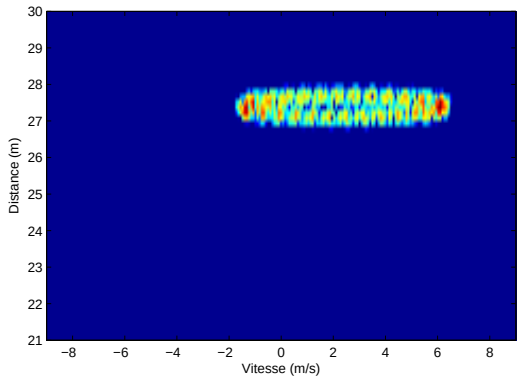
Nous avons vu que le Doppler de la roue n'est pas nul lorsque la direction de la voiture est perpendiculaire à l'axe de visée puisque la roue est vue par la radar avec de la hauteur ($\phi = 45^\circ$). Pour illustrer ce propos, nous avons calculé, à partir des données simulées, les images d'une roue qui roule sans glissement sur la même trajectoire circulaire de la voiture ($V_0 = 4,7$ m/s) et dans les mêmes conditions géométriques que l'expérience (Fig 4.14). L'orientation de la roue (ϕ, θ) varie, en fonction de la position de la roue sur le cercle. Ainsi, l'élévation est maximale lorsque la roue se situe au fond de la scène et minimale lorsque la roue se situe au premier plan. Pour $\theta = 0^\circ$, il est donc logique que l'étendue du Doppler soit plus importante lorsque ϕ augmente.

Sur les données réelles, l'interprétation est moins évidente mais nous voyons (Fig 4.15) que l'étendue du Doppler augmente entre l'image (2) et l'image (5). Il faut néanmoins porter une attention spéciale à l'interprétation de l'image (5) puisque l'étendue des vitesses regroupe en fait le micro-Doppler des deux roues visibles par le radar, centré autour du Doppler de la roue. Comme les deux roues sont presque dans la même case distance, les micro-Doppler ont tendance à se superposer. Sur les autres images, il est possible de distinguer les deux roues puisqu'elles ne se situent pas dans la même case distance.

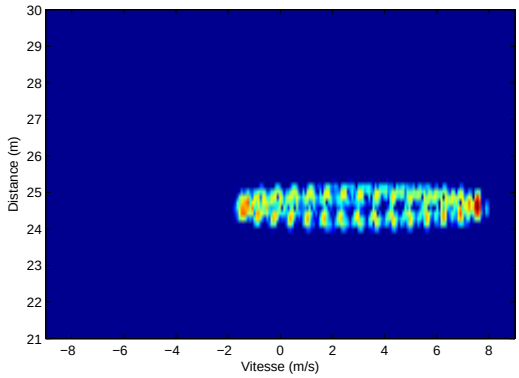
La figure 4.16 permet de se faire une représentation plus précise de l'image d'une voiture, constituée à partir de données simulées, pour une trajectoire circulaire. Grâce à cette représentation, il est possible de visualiser le micro-Doppler des 4 roues de la voiture simultanément, ce qui n'est pas possible sur les données réelles puisqu'au moins la moitié des roues sont masquées par la carrosserie à chaque instant.



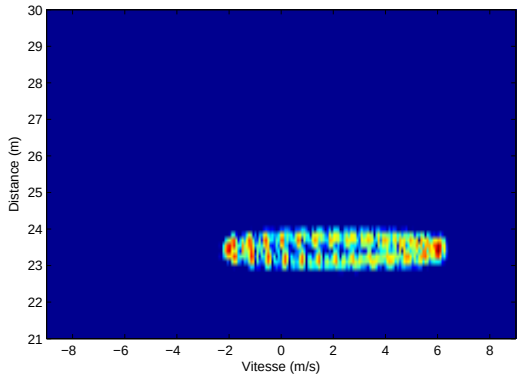
(1) $x = 28$ m, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 39^\circ$



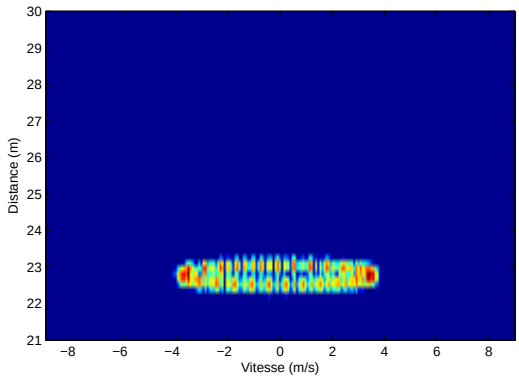
(2) $x = 27$ m, $\theta = 45^\circ$, $\phi = 41^\circ$



(3) $x = 25$ m, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 46^\circ$

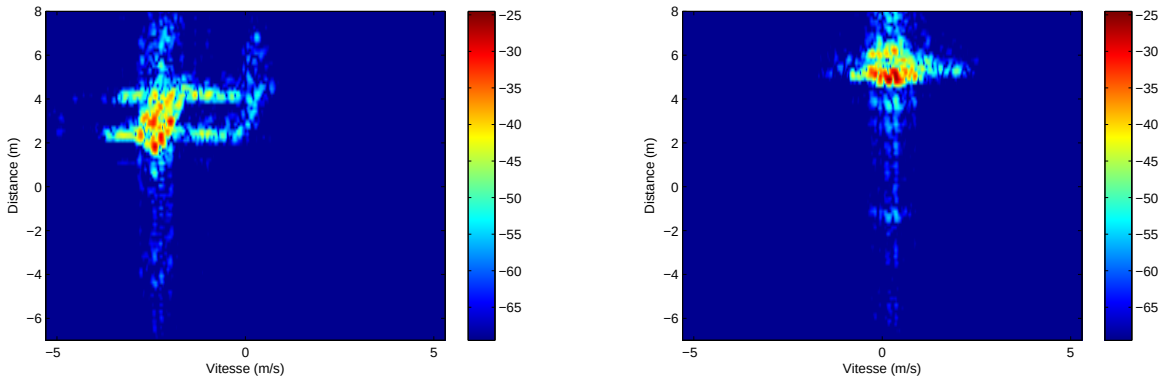


(4) $x = 24$ m, $\theta = 45^\circ$, $\phi = 49^\circ$



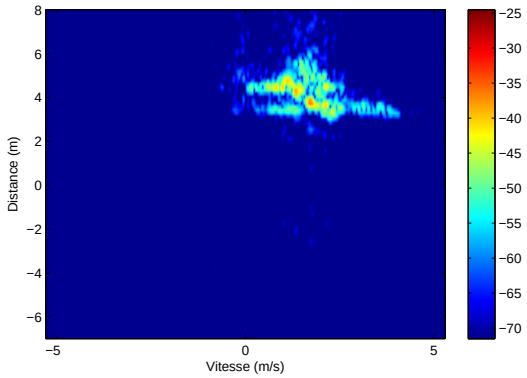
(5) $x = 23$ m, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 52^\circ$

FIGURE 4.14 – Imagerie radar (données simulées) d'une roue en mouvement circulaire ($V_0 = 4,7$ m/s)

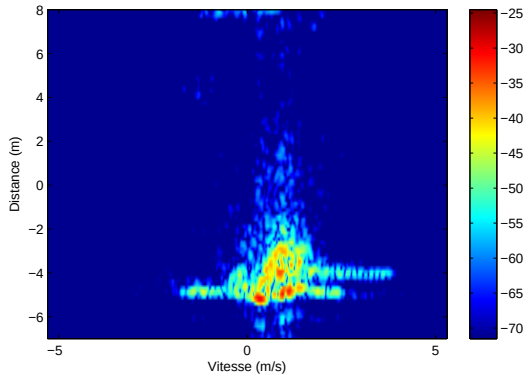


(1) $t = 0$ s

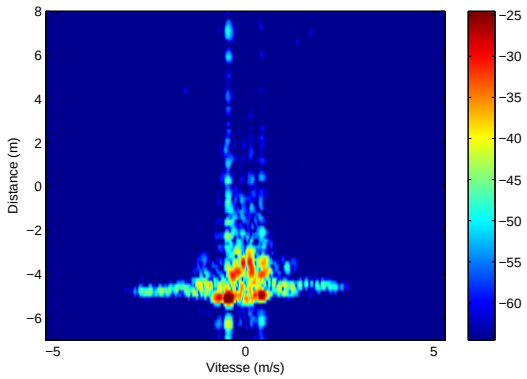
(2) $t = 2$ s



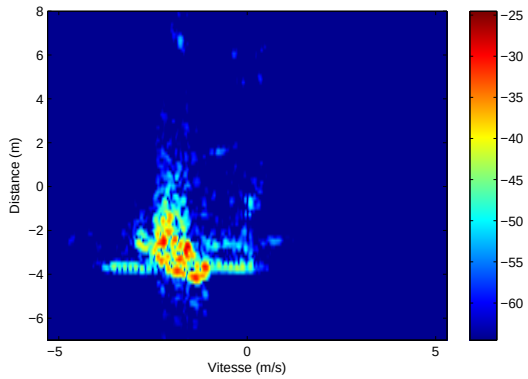
(3) $t = 3$ s



(4) $t = 6$ s



(5) $t = 7$ s



(6) $t = 8$ s

FIGURE 4.15 – Imagerie radar (données réelles) d'une voiture en mouvement circulaire ($V_0 = 4,7$ m/s)

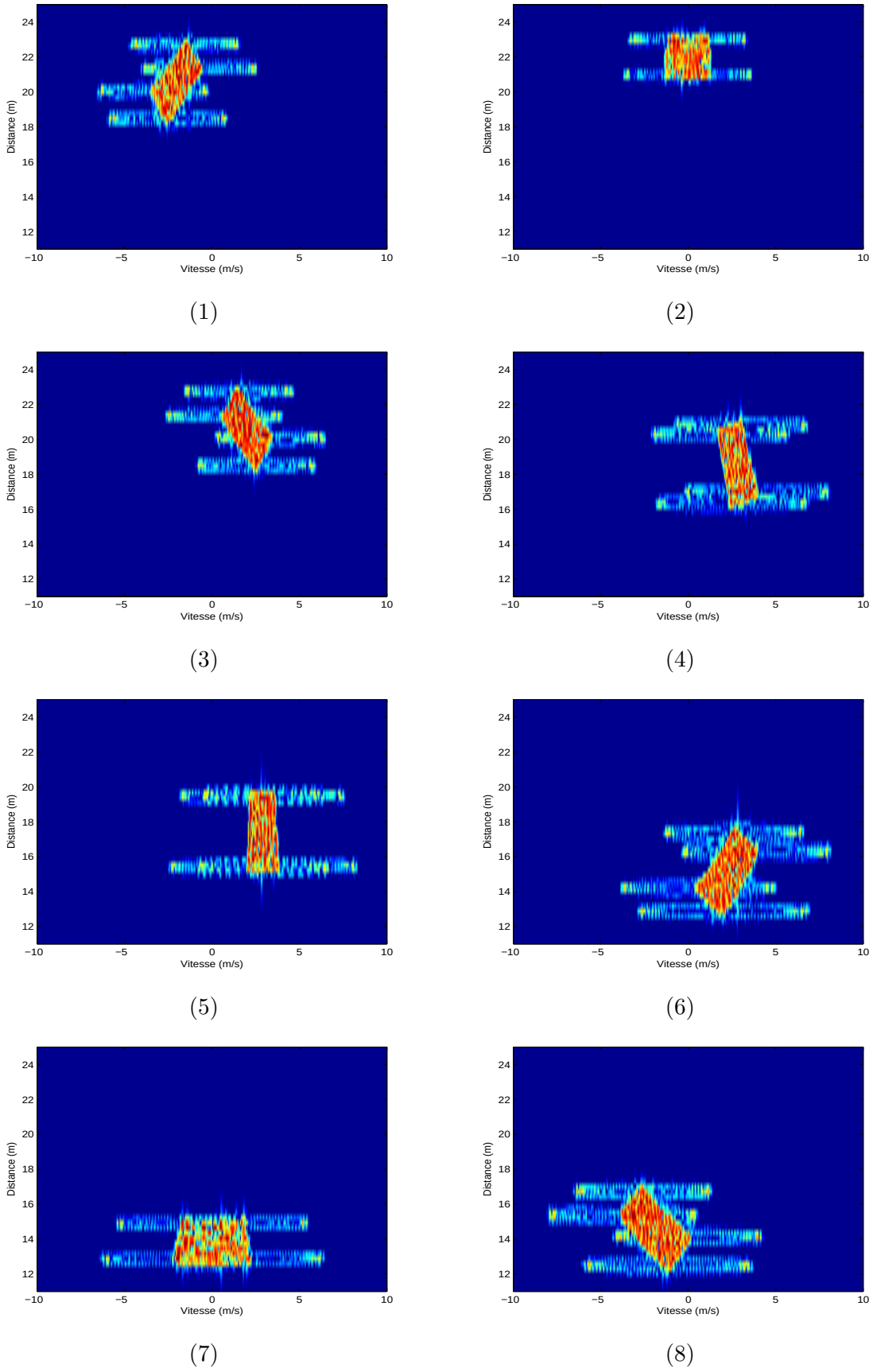


FIGURE 4.16 – Imagerie radar (données simulées) d'une voiture en mouvement circulaire ($V_0 = 4,7$ m/s)

Chapitre 5

Analyse du mouvement d'un piéton

Les attitudes, gestes et mouvements du corps humain sont risibles dans l'exacte mesure où ce corps nous fait penser à une simple mécanique.

Henri Bergson

Sommaire

5.1 Définitions et caractéristiques du mouvement 82

5.1.1 Phases du mouvement 82

5.1.2 Caractéristiques du cycle de locomotion 84

5.2 Synthèse du mouvement d'un piéton 85

5.2.1 Historique 85

5.2.2 Utilisation d'un système de capture de mouvement 87

5.3 Analyse cinématique du mouvement 90

5.3.1 Position 91

5.3.2 Vitesse 92

5.3.3 Accélération du pied 94

5.3.4 Dispersion des vitesses à un instant donné 95

5.4 Modélisation empirique du mouvement 96

5.4.1 Marche 97

5.4.2 Course 100

5.4.3 Remarques sur la modélisation 101

Pour pouvoir analyser l'image radar d'un piéton en mouvement, il est important de comprendre comment l'onde électromagnétique interagit avec les différentes parties de son corps. Cela nécessite de connaître le mouvement de chacune d'elles, ce dont s'efforce la biomécanique, qui est la mécanique physique appliquée au vivant. La science du mouvement humain est un domaine très actif et les applications pratiques sont nombreuses, notamment en médecine, en sport et en image de synthèse.

Dans ce chapitre nous détaillons d'abord les principes de la marche et la course, ce qui permet de comprendre les bases du mécanisme et de définir les principaux termes utilisés dans les études sur le déplacement humain.
Nous abordons ensuite la problématique de la synthèse du mouvement et expliquons les choix qui nous ont amenés à choisir un modèle de points dont les données sont fournies par un système de capture de mouvement.
Grâce à ce modèle, nous étudions la cinématique des différentes parties du corps puis nous proposons une modélisation empirique du mouvement.

5.1 Définitions et caractéristiques du mouvement

5.1.1 Phases du mouvement

L'homme possède deux modes de locomotion naturels :
- **la marche** est une succession de foulées en ayant toujours au moins un point d'appui en contact avec le sol. Elle comporte une phase de double appui durant laquelle les deux pieds touchent le sol.
- **la course** est une succession de foulées bondissantes à partir d'appuis effectués alternativement sur chaque pied. Contrairement à la marche elle comporte une phase de suspension durant laquelle aucun des deux pieds ne touche le sol.

La marche et la course sont des processus complexes qui ont toujours fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Pour chacune des allures, chaque être humain possède sa propre démarche mais il est possible de dégager certaines caractéristiques communes.
Un déplacement à allure régulière peut être caractérisé par un cycle de jambes qui se répète à l'identique. Ce cycle est défini par l'intervalle de temps et d'espace séparant deux positions successives identiques. Il peut être lui-même décomposé en deux foulées symétriques droite et gauche correspondant au passage de l'appui d'un pied sur l'autre.
Chaque cycle peut se diviser en deux phases : la phase d'appui et la phase d'oscillation. La durée et la composition de ces phases varient selon l'allure empruntée.

La marche :
La phase d'appui représente environ 60% du cycle et peut être divisé en deux :
- une phase de simple appui où un seul pied est en contact avec le sol pendant que l'autre se

balance ;
- une phase de double appui où les deux pieds sont en contact avec le sol pendant que le corps avance. Cette phase représente environ 20% du cycle de marche et diminue avec l'augmentation de la vitesse pour disparaître en cas de course.

La phase d'oscillation représente environ 40% du cycle et se décompose en trois :
- une phase initiale (accélération) lorsque le pied quitte le sol ;
- une phase intermédiaire lorsque le pied est aligné avec le pied au sol ;
- une phase finale (décélération) avant d'atteindre à nouveau le sol.

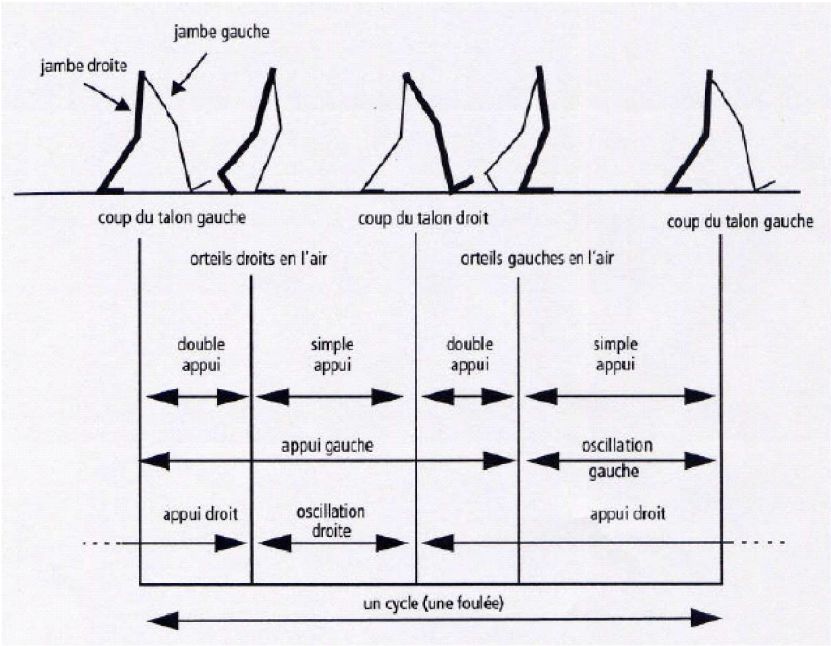


FIGURE 5.1 – Cycle de la marche.

La course :

La course est un enchaînement de foulées. Elle se compose aussi d'une phase d'appui et d'une phase d'oscillation que l'on appelle phase de suspension (ou de vol) :
- la phase d'appui correspond au moment où le pied du coureur est en contact avec le sol. Elle est plus courte que celle de la marche. Cette phase se divise en trois moments : l'amortissement, le soutien et la poussée.
- la phase de suspension commence au moment où le pied de poussée (c'est à dire le pied en stade final de phase d'appui) quitte le sol et se termine au moment où l'athlète reprend appui sur l'autre pied.

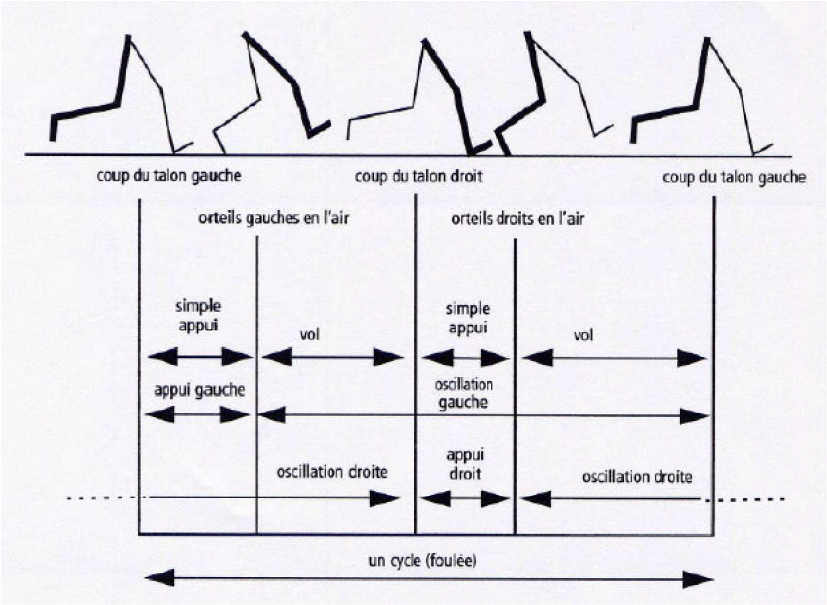


FIGURE 5.2 – Cycle de la course.

5.1.2 Caractéristiques du cycle de locomotion

Lorsque le piéton se meut à une allure régulière, il est possible de caractériser le cycle de locomotion par une durée T_c et une longueur L_c, reliés entre eux par la vitesse moyenne de déplacement V_0 :

$$L_c = V_0 T_c = \frac{V_0}{F_c} \tag{5.1}$$

où F_c est la fréquence du cycle.

Vérification de l'énonce de Boulic :
La longueur du cycle peut ainsi varier en amplitude (longueur) et en fréquence selon l'allure et la morphologie du piéton.
Pour le cas de marche, Boulic [Boul-90] a énoncé, en se basant sur des considérations empiriques, que la longueur d'un cycle L_c et la vitesse moyenne de déplacement V_0 d'une personne de taille standard sont reliées par la relation :

$$L_c = 1.346\sqrt{V_0} \tag{5.2}$$

En combinant les équations 5.2 et 5.1, cela permet d'obtenir :

$$T_c = \frac{1,346^2}{L_c} \tag{5.3}$$

Si la fréquence du cycle ne satisfait pas cette équation, cela signifie que la personne accélère ou décélère.

Nous avons organisé une série de tests sur des piétons pour vérifier cette relation. Les résultats sont inscrits dans le tableau 5.1.

	1	**2**	**3**
Taille du piéton (m)	1,80	1,76	1,98
Distance parcourue (m)	17,40	17,40	17,40
Temps de parcours (s)	9,5	14,25	12,5
Vitesse (m/s)	1,83	1,22	1,39
Longueur de foulée réelle (m)	1,88	1,51	1,76
Longueur de foulée selon Boulic (m)	1,82	1,48	1,59
Erreur(%)	3,3	2	10,7

TABLE 5.1 – Vérification de l'énoncé de Boulic

Il en ressort que la relation n'est valable que pour un piéton de taille standard (1m70-1m80). La relation peut être modifiée en effectuant une normalisation par une taille moyenne. Elle s'écrit alors :

$$L_c = 1.346\sqrt{V_0} \times \frac{H}{1,77} \tag{5.4}$$

où H est la taille du piéton.

5.2 Synthèse du mouvement d'un piéton

5.2.1 Historique

Le déplacement du piéton est donc un phénomène complexe et sa synthèse présente un grand intérêt dans le cadre de cette thèse. Beaucoup de travaux existent sur ce sujet car le mouvement de l'homme a toujours fasciné. L'évolution de la technologie a été un catalyseur, en commençant par l'invention de la photographie par Daguerre en 1839. Étienne-Jules Marey (1830 – 1904) et Eadweard Muybridge (1830-1904) ont ainsi pu mettre au point la chronophotographie, une technique permettant de décomposer le mouvement humain dans le temps et dans l'espace. Ce procédé consiste à superposer sur le même support photographique une succession de vues à intervalle de temps fixé afin d'étudier le mouvement d'un objet (Fig 5.3).

A partir des années 60 – 70, les progrès technologiques ont favorisé le développement d'outils permettant de simuler et de mesurer le mouvement. Les études ont été encouragées par d'importants investissements compte tenu du vaste champ d'applications. D'abord modélisés par quelques points effectuant de simples mouvements dans une scène en deux dimensions, les mouvements des personnages sont devenus de plus en plus complexes grâce aux progrès réalisés dans l'animation.
Les techniques de synthèse de mouvement peuvent se diviser en trois catégories :

Les méthodes manuelles :
Elles ont été développées au debut des années 80 pour la création d'animations [Stur-85]. L'animateur dessine des images clés où le personnage apparaît dans différentes postures et définit les

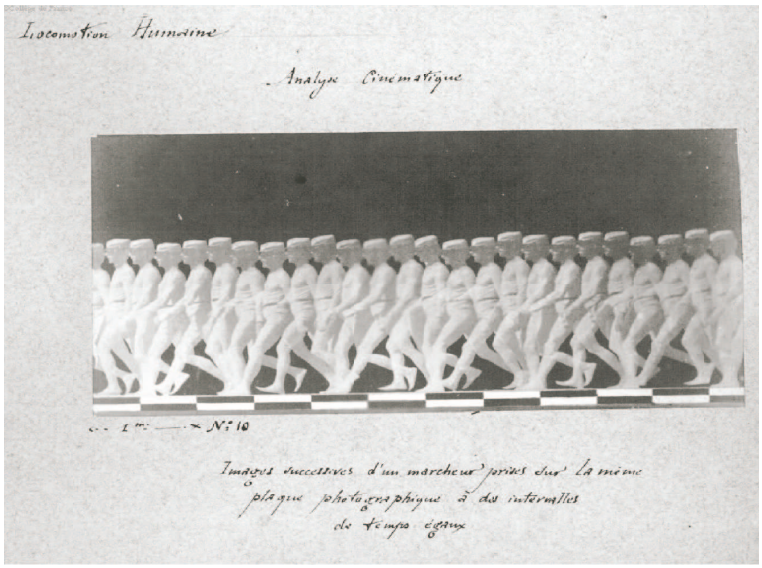


FIGURE 5.3 – Images successives d'un marcheur prises sur la même plaque photographique à des intervalles de temps égaux (Étienne-Jules Marey, 1886).

positions et les orientations de parties du corps à des moments spécifiques. Le mouvement final est obtenu en interpolant les images. Cette technique est laborieuse compte tenu du nombre de postures possibles et requiert un talent artistique indéniable.

La modélisation cinématique et dynamique :
La plupart de ces méthodes reposent sur des connaissances en biomécaniques [Wint-90]. Elles se focalisent principalement sur la cinématique (position, vitesse et accélération) des parties rigides du corps humain [Mult-99].
Le modèle global de mouvement de Boulic et al. [Boul-90, Boul-04], basé sur des considérations empiriques, permet d'animer un personnage virtuel. Il est destiné à produire à chaque instant les valeurs des paramètres spatiaux, temporels et articulaires de la marche pour un sujet répondant aux proportions moyennes. Néanmoins, il est difficile dans ces conditions d'animer toutes les parties du personnage, notamment quand le mouvement se complexifie.

Les systèmes de capture du mouvement :
A partir des années 80, l'avènement des systèmes de capture de mouvement a permis de faire d'importants progrès dans la synthèse du mouvement humain. Cette technique permet d'enregistrer la position en trois dimensions des différentes parties du corps afin de recréer fidèlement le mouvement de personnages virtuels. Il existe des systèmes vidéos, optiques, magnétiques, mécaniques et ultra-sonores (Fig 5.4).

Le principal défaut des systèmes de capture du mouvement est leur manque de flexibilité. Le mouvement n'est pas facilement modifiable et n'est valable que pour des individus de même gabarit. De plus, le matériel est onéreux, ce qui rend difficile l'accès à ce type de données.
Les principaux domaines d'applications qui profitent de cette technologie sont la médecine (étude de la marche, rééducation, conception de prothèses, performances sportives), l'animation de

FIGURE 5.4 – Systèmes d'acquisition. A gauche, un système mécanique. A droite, un système optique (« Motion tracking »).

synthèse (films, jeux vidéos...), l'industrie (robotique, sécurité). Compte tenu de l'essor de ces disciplines, de nombreuses entreprises se sont mis à développer et commercialiser des systèmes d'acquisition de plus en plus performants.

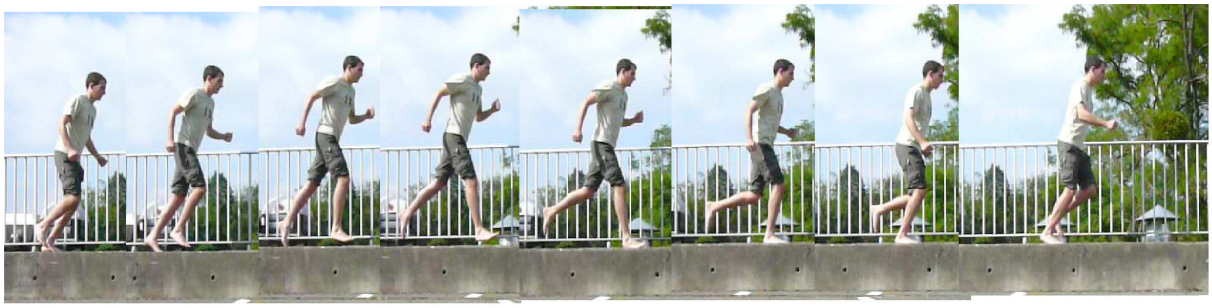
5.2.2 Utilisation d'un système de capture de mouvement

Nous avons vu qu'il existe divers moyens de recréer le mouvement humain. Quelle que soit la solution envisagée, la modélisation ne se fait pas sans difficulté. Nous avons néanmoins retenu la solution d'utiliser un système de capture de mouvement. Compte tenu du coût du matériel d'acquisition, nous avons d'abord essayé de créer notre propre système d'acquisition, en relevant la position des points du corps à partir d'un support vidéo. Cette méthode quelque peu artisanale a finalement été abandonnée puisque nous avons eu accès librement à des données provenant d'un système d'acquisition.

5.2.2.1 Capture du mouvement à partir d'une caméra vidéo

Plusieurs jeux d'images ont été acquis avec un caméscope, le déplacement s'effectuant devant une rambarde (grille régulière). Cette méthode a permis de recréer le mouvement des principales parties du corps, notamment celui des pieds et des mains. Nous nous sommes inspirés des expériences de Étienne-Jules Marey et Eadweard Muybridge (Fig 5.3) pour calculer les trajectoires des principales composantes d'un piéton à partir d'un flux d'images. Une routine a été créée pour sélectionner manuellement et enregistrer la position de points caractéristiques sur chaque image. La décomposition du mouvement pour la marche et la course est visible sur la figure 5.5.
Cette méthode n'est évidemment pas très précise, compte tenu des problèmes liés à la perspectives et au masquage de certains points au cours de l'acquisition. Elle permet cependant de modéliser en deux dimensions le mouvement des différentes parties du corps, sans utiliser de système coûteux. Cette première approche a permis d'effectuer les premières mesures pour

(a)



(b)

FIGURE 5.5 – Décomposition du mouvement : marche (a) et course (b)

caractériser la marche et la course.

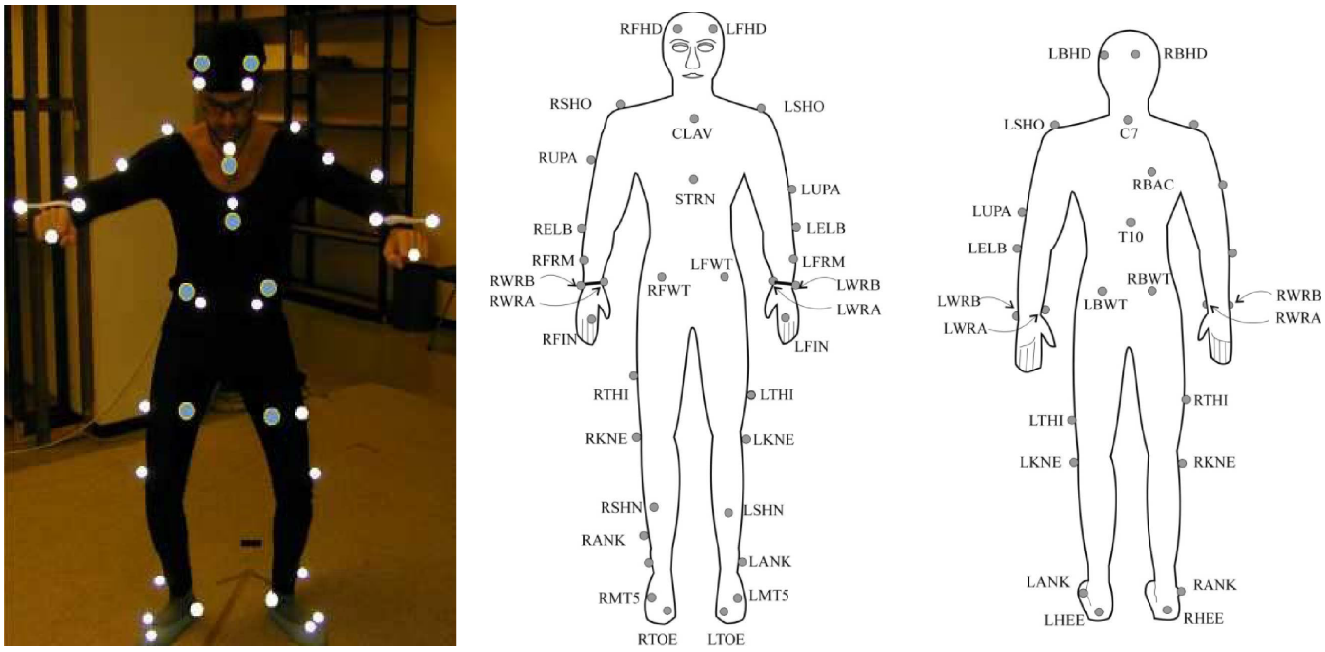
5.2.2.2 Analyse du mouvement sur fichiers de points

Nous avons aussi choisi de travailler sur des fichiers de points obtenus par un système de capture de mouvement. Ce dernier effectue à partir de caméras, des mesures tri-dimensionnelles de marqueurs externes positionnés sur un individu.

Nous avons opté pour ce type de données parce qu'il permet de restituer le mouvement du piéton avec beaucoup de fidélité. En outre, certains fichiers de données ont été rendus accessibles librement sur le site web de la Carnegie Mellon University (`mocap.cs.cmu.edu`) au sein de laquelle l'équipe « Carnegie Mellon Graphics » a constitué une base de données regroupant divers scénarios de mouvement de piétons (CMU Graphics Lab Motion Capture Database).

Le mouvement a été enregistré par un système optique (*Vicon Motion System*) qui fonctionne avec 12 caméras infrarouges fournissant 120 images par seconde. Les acquisitions ont été réalisées sur un sujet muni d'une combinaison recouverte de 41 marqueurs réfléchissants. Ces derniers sont répartis sur les parties stratégiques du corps afin de restituer fidèlement le mouvement de toutes les articulations (Fig 5.6).

Format des fichiers :
Les données sont fournies dans un format standard (*.c3d*). Ce fichier binaire comporte les coordonnées au cours du temps des 41 marqueurs, mais également des informations concernant les paramètres de l'acquisition. La standardisation du format permet aux utilisateurs des différentes



(a) (b)

FIGURE 5.6 – **(a)** : Sujet muni de la combinaison réfléchissante - **(**b) : Localisation des marqueurs (guide d'utilisation du système Vicon - `www.vicon.com`).

communautés d'échanger librement des données, de confronter leurs interprétations et de comparer les différents systèmes d'acquisition entre eux.

Un certain nombre de logiciels de lecture de fichiers *c3d* ont été développés mais ne sont pas toujours accessibles gratuitement. Nous avons cependant pu utiliser une version d'évaluation de *MLSviewer* développée par *Motion Lab*, disponible en libre accès sur le web (`www.c3d.org`). L'en tête du fichier comporte, entre autres, des informations sur le nombre et le nom des marqueurs, le nombre d'échantillons, la fréquence d'échantillonnage de l'acquisition. Il existe également des routines dans les principaux langages de programmation permettant d'accéder aux données du format *c3d*.

Les données fournies sont donc directement utilisables et il est facile d'étudier indépendamment les différentes parties du piéton. Cependant les données sont bruitées en raison des erreurs de mesures du système d'acquisition. Il est donc nécessaire d'effectuer au préalable un filtrage passe-bas afin de lisser les données.

Description des scénarios :
Le choix de cette solution nous rend dépendants des scénarios existants. Les sujets d'étude, la trajectoire et la vitesse sont imposés par l'instigateur des mesures. Parmi les divers scénarios proposés dans la base de données, nous nous sommes focalisés sur l'étude de mouvement simples : la marche et la course en ligne droite à vitesse constante.
Le fichier fournit les coordonnées des 41 marqueurs au cours du temps. La trajectoire du piéton est définie dans un repère $(O, \overrightarrow{X}, \overrightarrow{Y}, \overrightarrow{Z})$. L'origine du repère est fixée au point de départ du piéton (Fig 5.7)

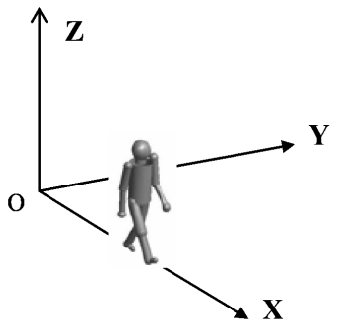


FIGURE 5.7 – Position du piéton dans le repère de la scène

5.3 Analyse cinématique du mouvement

Nous avons choisi d'analyser la position et la vitesse des différentes parties du corps. Parmi les 41 réflecteurs répartis sur toutes les parties du corps (Fig 5.6), nous nous sommes concentrés sur 5 marqueurs représentatifs du mouvement. Leur nom et la couleur associée sur les courbes sont indiqués dans le tableau 5.2.

Marqueur	**Légende**
torse	noir
main gauche	bleu
main droite	rouge
pied gauche	rose
pied droit	vert

TABLE 5.2 – Nom et légende des marqueurs

Nous nous sommes intéressés à l'évolution de la position et de la vitesse de chacun des réflecteurs sélectionnés. Cela nous a permis d'analyser séparément le déplacement des différentes parties du corps et de comprendre comment se fait la répartition des vitesses par rapport à la vitesse moyenne. Nous avons ensuite étudié plus spécifiquement l'accélération du pied lors de sa phase de balancement. Enfin nous avons analysé la dispersion des vitesses de l'ensemble des vitesses des 41 marqueurs à un instant donné.

Caractéristiques du cycle :
Les caractéristiques du cycle du piéton, relevés à partir des courbes qui suivent, sont récapitulées dans le tableau 5.3. La longueur L_c et la période du cycle T_c et la vitesse du piéton sont reliés par la formule 5.1.

	Marche	**Course**
V_0 **(m/s)**	1,18	3,55
T_c **(s)**	1,10	0,75
L_c **(m)**	1,30	2,66

TABLE 5.3 – Caractéristiques du cycle de la marche et de la course

5.3.1 Position

La trajectoire du piéton étant rectiligne selon l'axe (OX), la position des réflecteurs selon (OY) est supposée invariante. La variation de la hauteur des réflecteurs est quant à elle négligeable devant la distance parcourue selon (OX). Nous avons donc choisi de seulement mettre en évidence pour chacun des marqueurs l'évolution de l'abscisse qui est équivalente à la distance parcourue.

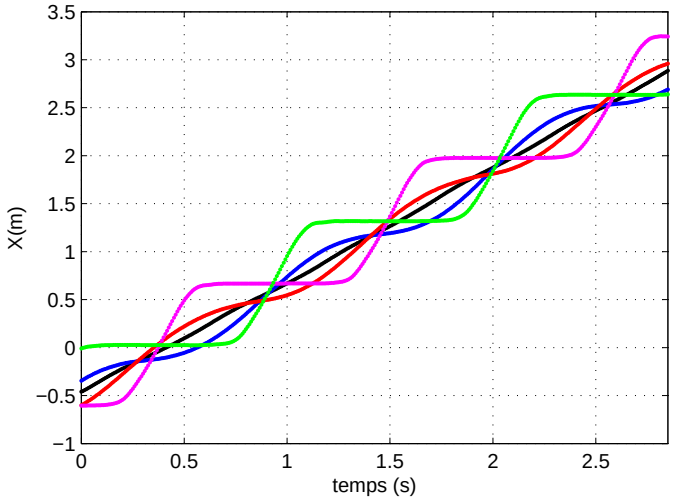


FIGURE 5.8 – **Marche** : Evolution de l'abscisse au cours du temps. (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

Les figures 5.8 et 5.9 montrent l'évolution de la distance parcourue. On peut mettre en évidence la symétrie entre la partie gauche et la partie droite du corps qui effectuent le même mouvement déphasé d'un demi cycle.
Tandis que le torse et les mains sont en permanence en mouvement, les pieds marquent un temps d'arrêt pendant une partie du cycle. Le temps de pose est plus long pour la marche que pour la course. Au final tous les points parcourent la même distance durant un cycle. Il est possible de retrouver les valeurs du cycle indiquées dans le tableau 5.3.

Marche :
Durant un cycle de déplacement, les deux pieds progressent alternativement. Pendant qu'un pied reste immobile pendant plus de la moitié du cycle, l'autre accélère pour atteindre sa vitesse maximale puis décélère jusqu'à l'arrêt total. Sur le graphe la figure 5.8, on peut mettre en évidence le temps de double appui durant lequel les deux pieds sont statiques.

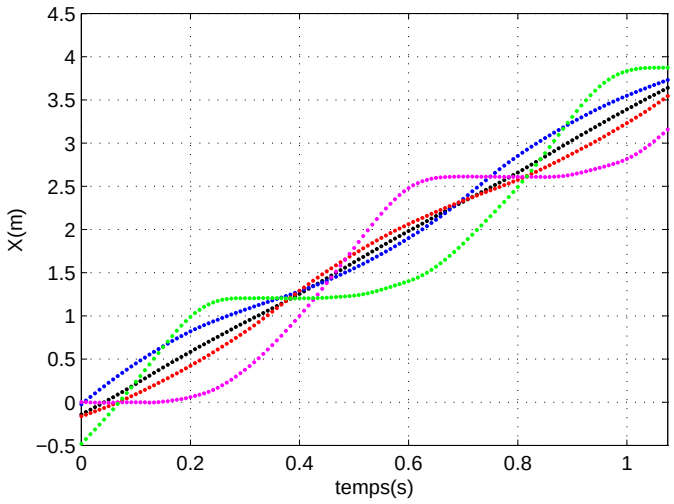


FIGURE 5.9 – **Course** : Evolution de l'abscisse au cours du temps (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

Course :
Contrairement à la marche, on peut constater que les deux pieds ne se posent jamais en même temps. Le graphe de la figure 5.9 confirme que la course est une allure sautée puisqu'il existe une phase où les deux pieds sont en mouvement. On remarque également que le temps de pose du pied est plus court que pour la marche.

5.3.2 Vitesse

Connaissant la position des points et le pas de temps entre deux échantillons, nous avons pu calculer la vitesse de chaque point au cours du temps. Les graphes sont représentées sur les figures 5.10 et 5.11. Chaque partie du corps a sa propre caractéristique de vitesse.

Le torse :
Au cours du déplacement, le centre de gravité du piéton effectue des oscillations résultant de l'impulsion donnée par le piéton pour avancer. Cela se traduit par une légère variation de la vitesse du torse autour de sa vitesse moyenne.

Les bras :
Les bras se balancent pour équilibrer le mouvement des jambes et stabiliser le piéton. Cela se traduit par une variation quasi sinusoïdale de la vitesse des deux mains, en opposition de phase, autour de la vitesse moyenne.

Les pieds :
Ce sont les deux points parties du corps où la variation en vitesse est la plus significative. Durant le cycle, le pied passe de la vitesse nulle à sa vitesse maximale pour revenir à l'arrêt.
Dans le cas de la marche la vitesse peut atteindre $3,5$ fois la vitesse moyenne de déplacement V_0. Cela s'explique par le fait que le pied passe un peu plus de temps à l'arrêt qu'en mouvement.

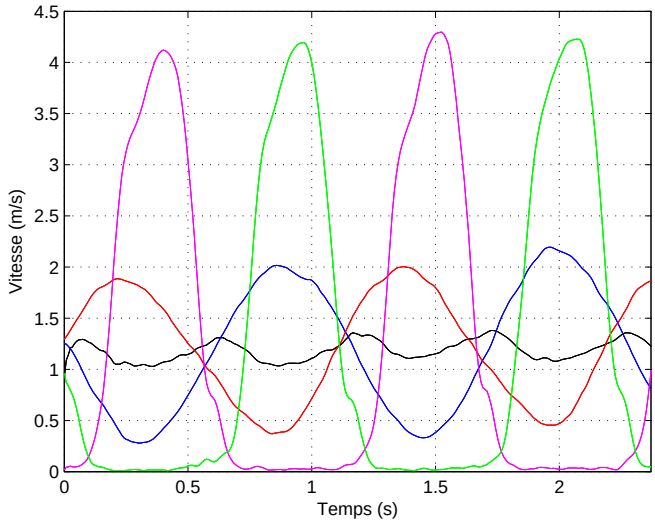


FIGURE 5.10 – **Marche** : Variation de la vitesse (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

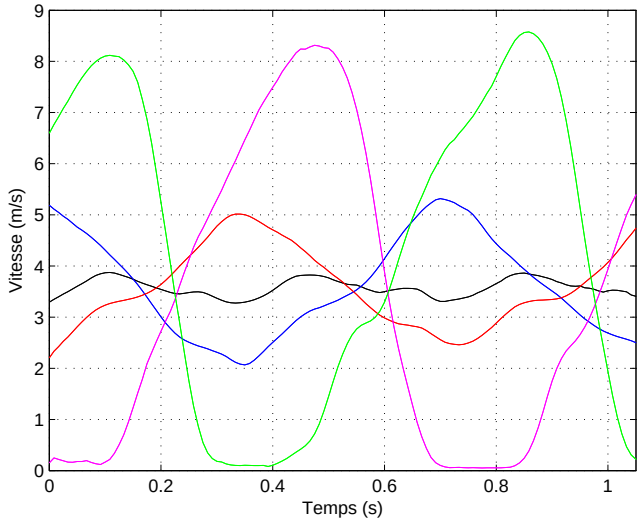


FIGURE 5.11 – **Course** : Variation de la vitesse (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

Pour compenser ce retard, le pied devrait avoir une vitesse deux fois plus élevée que la vitesse de déplacement pendant tout la phase de balancement. Comme il n'atteint pas cette vitesse instantanément (de même il ne s'arrête pas instantanément) il est obligé de compenser ce retard. En faisant la moyenne de la vitesse durant la phase de balancement, on s'apercevrait qu'elle est environ égale au double de la vitesse de déplacement V_0.
Dans le cas de la course, la rapport entre le temps de balancement et le temps de pose est plus important que pour la marche. C'est pour cela que la variation de sa vitesse est moins brutale. Le rapport entre la vitesse maximale du pied et la vitesse moyenne de déplacement est d'environ $2,3$. Le pied dispose donc de plus de temps pour effectuer son mouvement.

Les tableaux 5.4 et 5.5 donnent des informations sur la variation des vitesses. La moyenne a été réalisée sur un nombre entier de cycles (deux pour la marche, un pour la course). Il est notable que la moyenne des vitesses est proche de la vitesse de déplacement, ce qui est logique vu que tous les points du corps parcourent la même distance pendant un cycle complet.

	V_{min}	V_{max}	**Moyenne**	**Écart type**
Torse	0.92	1.37	1.17	0.10
Main gauche	0.27	2.19	1.19	0.63
Main droite	0.37	2.00	1.19	0.53
Pied gauche	0.01	4.29	1.24	1.57
Pied droit	0.01	4.22	1.24	1.58

TABLE 5.4 – **Marche** : variation de la vitesse sur un cycle

	V_{min}	V_{max}	**Moyenne**	**Écart type**
Torse	3.27	3.87	3.55	0.18
Main gauche	2.06	5.31	3.63	1.05
Main droite	2.20	5.01	3.61	0.82
Pied gauche	0.05	8.31	3.77	3.10
Pied droit	0.08	8.57	3.76	2.97

TABLE 5.5 – **Course** : variation de la vitesse sur un cycle

5.3.3 Accélération du pied

Le pied est la partie du corps qui enregistre la plus importante variation de vitesse. Alors qu'il est à l'arrêt pendant près de la moitié du cycle, il subit successivement une accélération puis une décélération.

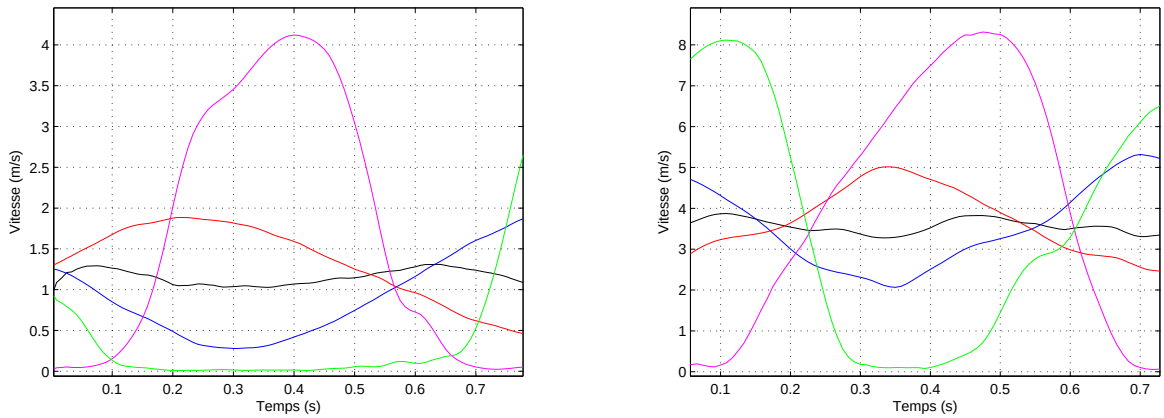
- Marche (Fig 5.12.a) :
  Le pied passe d'une vitesse nulle à sa vitesse maximale (4,3 m/s) en $\Delta T = 0,3$ s. L'accélération moyenne est alors de :

$$a = \frac{V_{max} - V_{min}}{\Delta T} = 13.3\ m.s^{-2}$$

- Course (Fig 5.12.b) :
  Le pied passe d'une vitesse nulle à sa vitesse maximale (8,5 m/s) en $\Delta T = 0,4$ s. L'accélération moyenne est alors de :

$$a = \frac{V_{max} - V_{min}}{\Delta T} = 20\ m.s^{-2}$$

Si le pied conservait la même accélération pendant 2 secondes, il atteindrait la vitesse de 100 km/h pour la marche et 145 km/h pour la course !



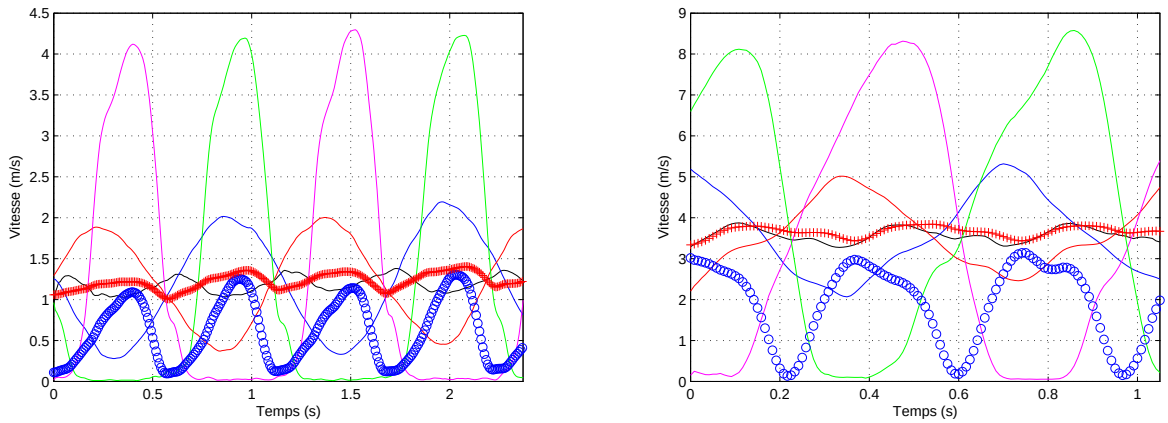
(a) Marche (b) Course

FIGURE 5.12 – Illustration de l'accélération du pied.

Les variations de la vitesse doivent être prises en considération lors de la formation des images radar. Ces dernières risquent d'être défocalisées en Doppler si le temps d'intégration est trop long par rapport au phénomène observé.

5.3.4 Dispersion des vitesses à un instant donné

La répartition de la vitesse des points varie selon l'instant du cycle. Lorsqu'un des pieds a atteint sa vitesse maximale, la vitesse s'étale entre 0 et V_{max}.
L'écart type ainsi que la moyenne ont été calculés à chaque instant de la simulation, en prenant l'ensemble des 41 marqueurs du modèle. La figure 5.13 permet d'illustrer ce phénomène en décrivant la variation de la distribution des vitesses au cours du temps.



(a) Marche (b) Course

FIGURE 5.13 – Répartition des vitesses au cours du temps. En rouge foncé, la moyenne ; en bleu foncé, l'écart-type

5.4 Modélisation empirique du mouvement

L'observation du mouvement du piéton a permis de comprendre les mécanismes des différentes parties du corps dans le cas de la marche et de la course. Cependant, l'utilisation d'un modèle de mouvement obtenu à partir de données expérimentales limite les possibilités d'étude. Comme nous ne possédons pas de système d'acquisition, nous avons ainsi été contraints d'utiliser des données décrivant le mouvement d'un individu. La vitesse, la trajectoire et le gabarit du piéton sont imposés, de même que la durée de l'acquisition (quelques secondes).

L'utilisation d'un modèle analytique décrivant le position des principales parties du corps aurait sans aucun doute facilité l'étude mais il n'existe pas dans la littérature d'équations précises de mouvement. Ce dernier est en effet complexe et il est difficile d'écrire avec précision la fonction analytique de chacune des parties du corps.

Nous avons donc proposé un modèle empirique élaboré à partir des données expérimentales. Ces dernières n'étant pas toujours très précises, il a fallu faire quelques corrections manuelles et des approximations pour pouvoir obtenir des équations simples en minimisant le nombre de paramètres.

L'intérêt d'un tel modèle est de pouvoir retrouver le mouvement des différentes parties du corps en fonction de la vitesse, de l'allure ou de la foulée du piéton. Il est toujours plus facile d'utiliser des équations de mouvement pour pouvoir les manipuler ou les réutiliser dans d'autres applications. De plus ce type de modélisation permet d'être indépendant des systèmes de capture de mouvement.

Le modèle paramétrique dépend des caractéristiques du cycle de déplacement à savoir :
- la vitesse moyenne de déplacement V_0
- la durée d'un cycle T_c (ou la fréquence $F_c = 1/T_c$)
- la durée d'un cycle $L_c = V_0 T_c$

Dans les exemples, les valeurs des paramètres utilisés reprennent les valeurs des courbes expérimentales, à savoir :

	Marche	**Course**
V_0 **(m/s)**	1,18	3,55
T_c **(s)**	1,10	0,75
L_c **(m)**	1,30	2,66

TABLE 5.6 – Paramètres du cycle de la marche et de la course

La vitesse étant la dérivée de la position il devrait être possible d'obtenir l'un à partir de l'autre (les conditions initiales du mouvement sont nécessaires en cas d'intégration). Pourtant, compte tenu de la complexité du mouvement il est difficile de prédire exactement le déplacement.

Le fait de dériver ou d'intégrer accentue les erreurs commises sur la modélisation de la vitesse ou de la position.
Nous avons donc choisi de modéliser indépendamment la position et la vitesse des différentes parties du corps sachant qu'elles ne sont pas forcément reliées entre elles. Au delà du modèle proposé, l'approche a pour objectif de proposer des pistes pour constituer un modèle global de mouvement.

Le modèle analytique proposé dans cette section décrit, en fonction des paramètres du mouvement, les équations de la position et de la vitesse des 5 parties du corps précédemment étudiées. Elles sont notées par les abréviations suivantes :

- T : torse
- MD : main droite
- MG : main gauche
- PD : pied droit
- PG : pied gauche

Les équations du modèle empirique sont écrites dans le même référentiel que celui des données expérimentales. Le déplacement du piéton se fait dans la direction $\overrightarrow{OX}$. Nous avons choisi de modéliser uniquement $X(t)$ et $V_X(t)$ sachant que les composantes des deux autres dimensions peuvent être négligées. En vue d'effectuer une modélisation plus fine, il serait judicieux de les prendre en compte.

5.4.1 Marche

5.4.1.1 Position

Le pied est la partie la plus difficile à modéliser puisque le pied reste au sol pendant près de la moitié du cycle avant d'entamer son mouvement. Nous avons schématisé sur la figure 5.14 le mouvement des deux pieds en optant pour une variation linéaire de la vitesse. Nous supposons donc que la vitesse est constante pendant la durée de progression du pied. Évidemment, ce n'est pas le cas en réalité puisque la vitesse du pied va passer de 0 à V_0 instantanément, ce qui provoque une brusque variation de vitesse.
Le temps de pose du pied relativement à la durée du cycle est noté t_p. Cela permet d'écrire que chaque pied est en appui pendant $t_p \times T_c$ secondes et en mouvement pendant $(1 - t_p) \times T_c$ secondes. Pour les données du modèle, nous avons estimé $t_p = 0,68$.

Les bras se balancent autour du corps du piéton. La main gauche avance en même temps que le pied droit et inversement pour la main droite. Nous avons supposé que les deux bras ont un mouvement symétrique par rapport au corps. Ils sont donc déphasés d'un demi période d'un cycle.

On suppose que la position du torse varie de manière linéaire. L'instant initial ($t = 0$) est

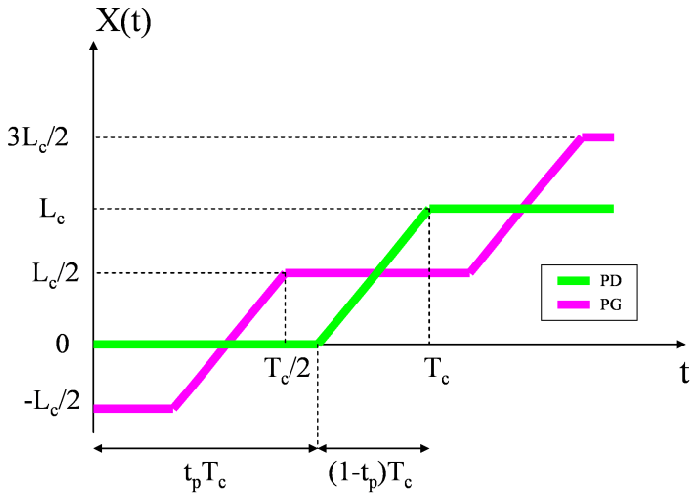


FIGURE 5.14 – Schématisation du mouvement des pieds pendant le cycle de marche

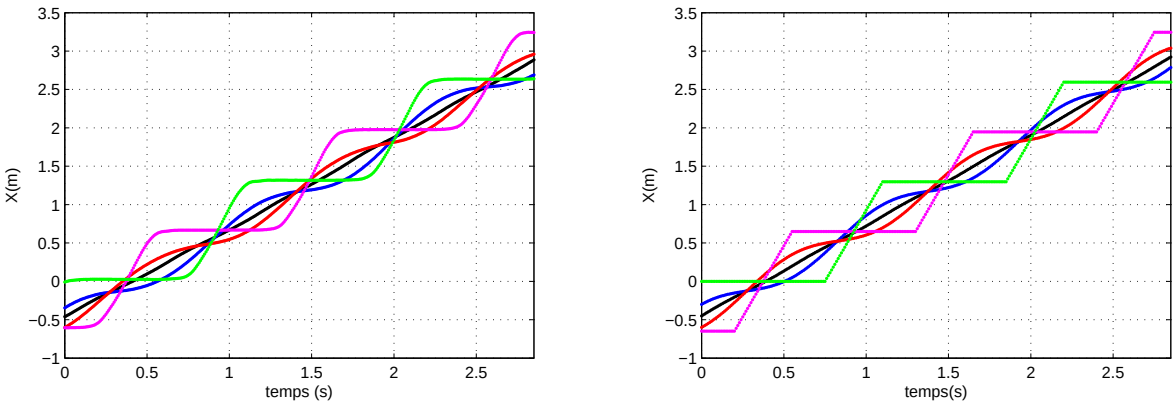
fixé au moment où le pied droit touche le sol, c'est à dire quand l'écart entre les deux pieds est maximal. A cet instant le torse et les mains sont à la position $X_0 = L_c/4$, c'est à dire un demi-pas.

Soit n le numéro du cycle de marche en cours. L'abscisse s'écrit pour chaque point du corps :

$$X_{PD}(t) = \begin{cases} (n-1)L_c & \text{si} \quad t \in [(n-1)T_c \ ; \ (n-1)T_c + t_pT_c] \\ \dfrac{V_0}{1-t_p}t - n\dfrac{t_pL_c}{1-t_p} & \text{si} \quad t \in [(n-1)T_c + t_pT_c \ ; \ nT_c] \end{cases}$$

$$X_{PG}(t) = \begin{cases} \left(n - \dfrac{3}{2}\right)L_c & \text{si} \quad t \in [(n-1)T_c \ ; \ (n-1)T_c + (t_p - 0,5)T_c] \\ \dfrac{V_0}{1-t_p}t - \left(n - \dfrac{1}{2}\right)\dfrac{t_pL_c}{1-t_p} & \text{si} \quad t \in [(n-1)T_c + (t_p - 0,5)T_c \ ; \ (n-1)T_c + 0,5T_c] \\ \left(n - \dfrac{1}{2}\right)L_c & \text{si} \quad t \in [(n-1)T_c + 0,5T_c \ ; \ nT_c] \end{cases}$$

$$\begin{aligned} X_{MD}(t) &= 0,15\sin\left(2\pi F_c(t - T_c/4)\right) + V_0t - L_c/4 \\ X_{MG}(t) &= 0,15\sin\left(2\pi F_c(t + T_c/4)\right) + V_0t - L_c/4 \\ X_T(t) &= V_0t - L_c/4 \end{aligned} \tag{5.5}$$



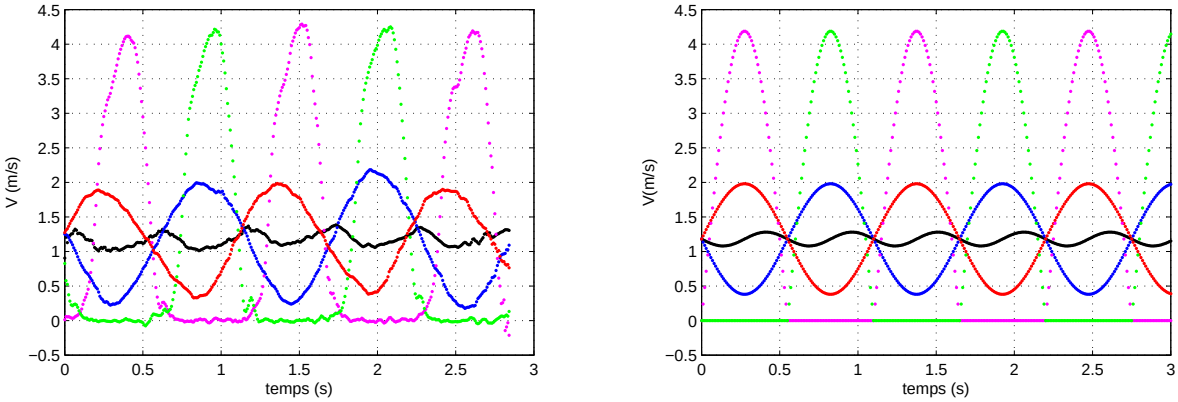
(a) Original (b) Modèle

FIGURE 5.15 – **Marche** : Modélisation de l'abscisse au cours du temps. (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

5.4.1.2 Vitesse

Si on prend la dérivée de la position qui a été modélisée dans le paragraphe précédent, la courbe de vitesse de chaque pied sera en forme d'échelon, donc discontinue. Nous avons repris directement la courbe de vitesse de la marche (Fig 5.10) pour modéliser la vitesse. Nous avons supposé ici que les deux pieds bougent alternativement (il n'y a pas de temps de pose). Leur vitesse est modélisée par une sinusoïde d'amplitude $3,5V_0$ et de fréquence F_c. On ne prend que les valeurs positives. Les courbes des deux pieds sont déphasées d'un demi cycle.
La vitesse des mains est modélisée par une sinusoïde d'amplitude $0,8$ et de fréquence F_c. Les courbes des deux mains sont déphasées d'un demi cycle.
La vitesse des mains est modélisée par une sinusoïde d'amplitude $0,1$ et de fréquence $2F_c$.

$$
\begin{aligned}
V_{PD}(t) &= \begin{cases} 0 & \text{si} \quad t \in [0\ ;\ T_c/2] \\ 3,5V_0 \sin\left(2\pi F_c(t - T_c/2)\right) & \text{si} \quad t \in [T_c/2\ ;\ T_c] \end{cases} \\
V_{PG}(t) &= \begin{cases} 3,5V_0 \sin\left(2\pi F_c t\right) & \text{si} \quad t \in [0\ ;\ T_c/2] \\ 0 & \text{si} \quad t \in [(T_c/2\ ;\ T_c] \end{cases} \\
V_{MD}(t) &= V_0 + 0,8 \sin\left(2\pi F_c t\right) \\
V_{MG}(t) &= V_0 + 0,8 \sin\left(2\pi F_c(t - Tc/2)\right) \\
V_T(t) &= V_0 + 0,1 \sin\left(4\pi F_c(t + Tc/4)\right)
\end{aligned}
\tag{5.6}
$$



(a) Original (b) Modèle

FIGURE 5.16 – **Marche** : Modélisation de la vitesse au cours du temps. (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

5.4.2 Course

5.4.2.1 Position

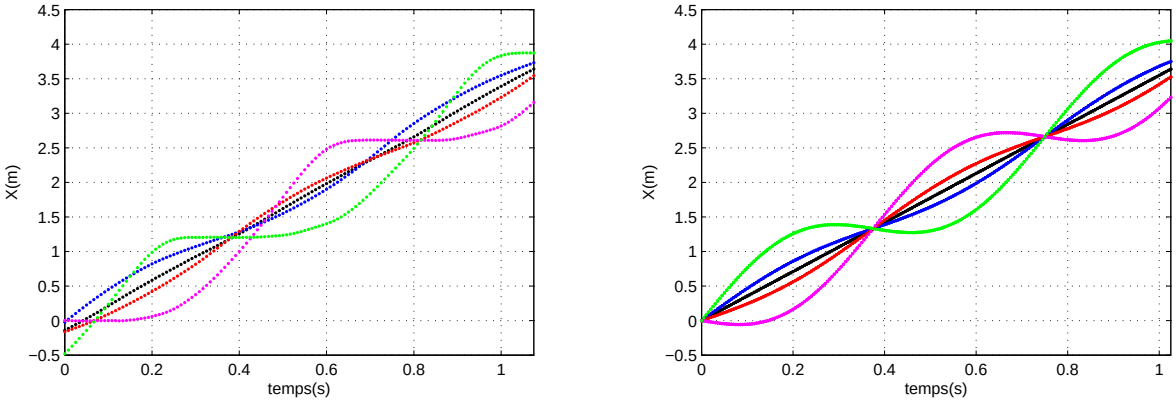
Le modèle de position utilisé pour la marche ne pouvait pas s'appliquer au mouvement de la course puisque la pose du pied est plus courte et la variation de la courbe plus lente, notamment lorsque le pied quitte le sol. On suppose ici que les deux pieds bougent alternativement. Nous avons donc modélisé le mouvement de toutes les parties du corps par la composition d'une droite, liée à la progression en distance et d'une sinusoïde, liée au balancement.

$$\begin{aligned}
X_{PD}(t) &= V_0 t + 0,55 \sin(2\pi F_c t) \\
X_{PG}(t) &= V_0\ t + 0,55 \sin(2\pi F_c (t - Tc/2)) \\
X_{MG}(t) &= V_0 t + 0,15 \sin(2\pi F_c t) \\
X_{MD}(t) &= V_0\ t + 0,15 \sin(2\pi F_c (t - Tc/2)) \\
X_T(t) &= V_0 + 0,1 \sin(4\pi F_c (t + Tc/4))
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Cette modélisation n'est pas tout à fait exacte puisque les pieds effectuent un léger retour en arrière au moment où ils devraient être posés. Néanmoins cette modélisation semble être la plus proche de la réalité.

5.4.2.2 Vitesse

De même que pour la marche il est difficile de relier analytiquement la vitesse des pieds à leur position. Nous avons avons donc repris directement la courbe de vitesse de la marche (Fig 5.11)



(a) Original (b) Modèle

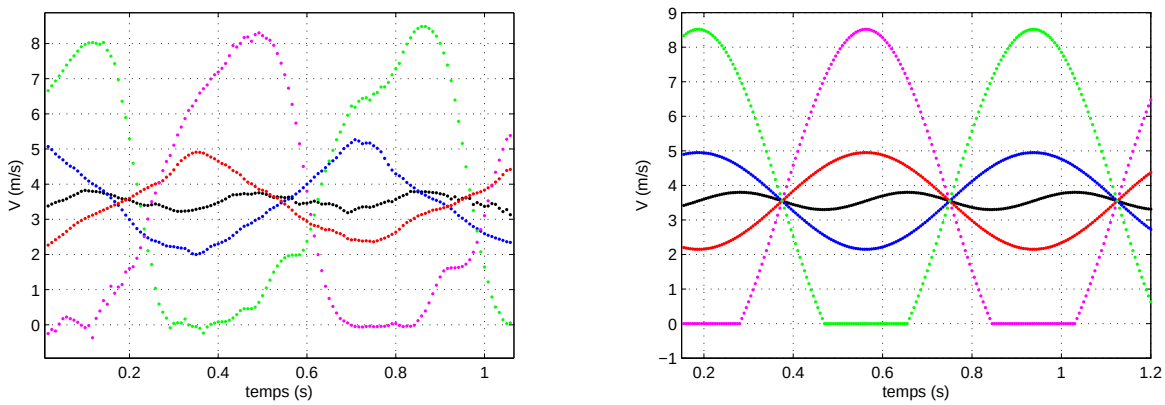
FIGURE 5.17 – **Course** : Modélisation de l'abscisse au cours du temps. (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

pour modéliser la vitesse.
La vitesse des pieds est modélisée par une sinusoïde, partiellement amputée, d'amplitude $1,4V_0$, de fréquence F_c, centrée autour de V_0. Les courbes des deux pieds sont déphasées d'un demi cycle.
La vitesse des mains est modélisée par une sinusoïde d'amplitude $1,4$, de fréquence F_c, centrée autour de V_0. Les courbes des deux mains sont déphasées d'un demi cycle.
La vitesse du torse est modélisée par une sinusoïde d'amplitude $0,25$, de fréquence $2F_c$, centrée autour de V_0.

$$
\begin{aligned}
V_{PG}(t) &= \begin{cases} 0 & \text{si} \quad t \in [0\ ;\ T_c/2] \\ V_0 + 1,4V_0 \sin\left(2\pi F_c(t - T_c/2)\right) & \text{si} \quad t \in [T_c/2\ ;\ T_c] \end{cases} \\
V_{PD}(t) &= \begin{cases} V_0 + 1,4V_0 \sin\left(2\pi F_c t\right) & \text{si} \quad t \in [0\ ;\ T_c/2] \\ 0 & \text{si} \quad t \in [T_c/2\ ;\ T_c] \end{cases} \\
V_{MG}(t) &= V_0 + 1,4 \sin\left(2\pi F_c t\right) \\
V_{MD}(t) &= V_0 + 1,4 \sin\left(2\pi F_c(t - Tc/2)\right) \\
V_T(t) &= V_0 + 0,25 \sin\left(4\pi F_c(t - Tc/4)\right)
\end{aligned}
\tag{5.8}
$$

5.4.3 Remarques sur la modélisation

Les données de l'acquisition ne sont pas toujours très précises. Il n'est pas toujours facile de faire concorder les modèles aux courbes réelles. Malgré cela, nous avons réussi à établir un



(a) Original (b) Modèle

FIGURE 5.18 – **Course** : Modélisation de la vitesse au cours du temps. (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

modèle qui restitue assez fidèlement les courbes originales. Pour le mouvement du pied, nous avons opté pour une modélisation sinusoïdale mais d'autres modèles pourraient mieux convenir. Pour la marche, nous avons constaté que la vitesse du pied peut s'apparenter à une gaussienne. De plus son intégrale s'apparente à l'évolution de la position du pied. En fait il faut trouver une courbe ayant la même amplitude, le même écart-type, la même forme et dont la somme des valeurs sur l'ensemble du cycle équivaut à la vitesse moyenne de déplacement V_0. Les études sont en cours.

Il serait judicieux de faire cette analyse sur d'autres gabarits de personnes ainsi que pour d'autres points du corps pour tendre vers un modèle complètement analytique. De nombreuses portes restent donc ouvertes pour des travaux futurs.

Chapitre 6

Le piéton vu par un radar

Le poulet belge est reconnaissable :
c'est celui qui a installé un radar
dans une rue piétonne.

Laurent Ruquier

Sommaire

6.1 Introduction 104
6.1.1 Travaux effectués sur l'analyse du Doppler du piéton 104
6.1.2 Apport de la thèse 105
6.2 Analyse des données du modèle de piéton 106
6.2.1 Vitesse radiale des différentes parties du corps 106
6.2.2 Imagerie radar à partir des données simulées 111
6.2.3 Conclusions sur les simulations 138
6.3 Analyse des données réelles 138
6.3.1 Une campagne d'acquisition sur mesure 138
6.3.2 Résultats 140
6.4 Conclusion sur l'analyse d'un piéton 162

6.1 Introduction

La majorité des travaux concernant l'analyse du déplacement du piéton ont été réalisés en décomposant des séquences vidéo [Cutt-77, Loul-05, Litt-98, Niyo-94]. Ces études ont montré que la démarche d'un piéton est unique et peut être utilisée pour l'identifier. Bien que la tâche s'avère plus délicate en radar, les recherches ont montré que la signature radar d'un piéton révèle des informations sur son comportement.
La plupart des méthodes sont basées sur des techniques d'analyse spectrale du signal reçu [Geish-01, Geish-02, Dorp-03, Otero-05]. Compte tenu de la répartition et de l'évolution des vitesses au cours du temps, le spectre Doppler d'un piéton peut constituer une signature caractéristique. Comme l'évolution du spectre est périodique, l'analyse la variation du Doppler au cours du temps permet de dégager des informations sur l'allure du piéton.

6.1.1 Travaux effectués sur l'analyse du Doppler du piéton

Les premières recherches sur le Doppler d'un piéton ont été réalisées grâce à des procédés ultrasonores [Weir-97, Saba-98]. L'analyse du Doppler a permis de détecter la présence d'individus et d'extraire des caractéristiques sur le rythme de la marche.

Les premiers à véritablement utiliser un radar pour étudier les piétons sont :
- Geisheimer et al. en 2001 [Geish-01] et 2002 [Geish-02])
- van Dorp et al. en 2003 [Dorp-03]
- Otero en 2005 [Otero-05]

Toutes leurs études sont basées sur l'analyse du spectre Doppler au cours du temps. La transformée de Fourier ou les transformées temps-fréquence, sont utilisées pour analyser le Doppler et identifier les différentes parties qui interviennent lors du déplacement d'un piéton.
Le spectrogramme est la représentation de la fréquence Doppler en fonction du temps. Il se calcule par STFT (Short Term Fourier Transform), ce qui revient à effectuer une succession de transformées de Fourier sur des fenêtres courtes :

$$STFT\left\{x(t)\right\} \equiv X(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)w(\tau - t)\; e^{j2\pi f\tau}\, d\tau \tag{6.1}$$

où $x(t)$ est le signal à analyser, $w(t)$ est la fenêtre glissante, t le temps et f la fréquence.

La fréquence Doppler est représentée sur l'axe des ordonnées tandis que le temps est en abscisse. Le spectrogramme permet ainsi de séparer les vitesses et les amplitudes des composantes du corps. L'objectif des travaux effectués a donc été d'estimer les paramètres du mouvement à partir de spectrogrammes.
Geisheimer a montré que le spectrogramme d'un piéton est obtenu en sommant les spectrogrammes de chacune des parties du corps. Ce résultat a été confirmé par Van Dorp à partir d'un modèle analytique de marche développé par Thalmann [Boul-90, Boul-04]. Otero a extrait des caractéristiques sur le mouvement d'individus à partir de spectrogrammes. Il a ainsi pu

différencier un être humain d'un animal. Il a même envisagé de pouvoir discerner un homme d'une femme.

Dans un contexte où la sécurité occupe une place croissante, les études se sont multipliées, reprenant les travaux de Geisheimer, Van Dorp et Otero.
Dans ce cadre, l'intérêt s'est naturellement porté sur la détection d'activité humaine à travers les murs [Ahma-07, Lai-07, Setl-07, Ram-08]

6.1.2 Apport de la thèse

Dans tous les papiers relatifs au sujet, la détection et la reconnaissance des piétons se basent principalement sur l'analyse du rythme du déplacement en étudiant la variation du Doppler au cours du temps. Les spectrogrammes, calculés à partir de transformées temps fréquence, sont des représentations efficaces pour retrouver les caractéristiques du déplacement comme l'allure (marche ou course), la vitesse et la fréquence de la foulée.

Une double analyse en distance et en Doppler :
Vouloir étudier la variation du Doppler au cours du temps revient à observer le phénomène sur un temps long. Or les caractéristiques de déplacement du piéton peuvent varier durant cette période, en terme d'allure, de vitesse, de direction. Dans ce cas, l'analyse est plus délicate. De plus si plusieurs individus sont simulatanément dans le champ de vision du radar, cela provoque des interférences. Les fréquences Doppler retournées sont mélangées et le signal n'est plus interprétable.

En introduisant la dimension en distance dans l'analyse, il n'est plus forcément nécessaire d'étudier les cibles sur un temps très long pour identifier le piéton et distinguer les différentes parties de son corps à un instant donné. Un œil averti pourrait reconnaître les caractéristiques d'un piéton sur une seule image, pourvu que le piéton soit en mouvement. La résolution du radar peut ainsi permettre d'analyser plus finement la signature d'un piéton, afin d'observer indépendamment les différentes parties du corps. Elle permet également de localiser et d'analyser la démarche de plusieurs individus simultanément, tant que ces derniers ne sont pas situés dans la même case distance.

HYCAM, un radar haute résolution :
L'observation radar des piétons a souvent été un obstacle difficile à réaliser dans la mesure où les piétons ont une faible section efficace radar (SER), une petite taille, bougent à une faible vitesse et se trouvent dans un environnement bruité. De plus, les scientifiques sont souvent confrontés à des limitations technologiques qui ne leur permettent pas d'observer des piétons avec une résolution inférieure au mètre. Ils n'ont ainsi pas pris en compte la composante distance des parties du corps.
Dans le cadre du développement du radar à haute résolution HYCAM [Paich-07] de l'ONERA, nous avons pu utiliser le système de mesure pour effectuer des acquisitions sur des piétons. Pour mieux comprendre et valider les données expérimentales, nous avons tout d'abord généré

et analysé des données simulées.

6.2 Analyse des données du modèle de piéton

Nous avons utilisé les fichiers de données (décrits dans la section 5.2.2) qui fournissent la position au cours du temps de différents points du corps du piéton. Dans une première partie, nous avons analysé la vitesse radiale des différents points du corps par rapport à un point fixe. Ensuite, les données ont été injectées dans l'outil de simulation afin de former des images radar à partir de données de synthèse. Nous avons ainsi pu analyser indépendamment la contribution de chacune de parties du corps en imagerie radar.

Les scénarios que nous avons utilisés sont les mêmes que ceux du chapitre 5.3. Pour chacune des allures (marche et course) un piéton effectue un déplacement rectiligne de quelques secondes. La configuration de la scène est décrite sur la figure 6.1. Les coordonnées des points du piéton et du radar sont données dans le repère $(O, \overrightarrow{X}, \overrightarrow{Y}, \overrightarrow{Z})$, où $\overrightarrow{X}$ est la direction de déplacement et $\overrightarrow{Z}$ la hauteur. L'origine du repère est fixée au point de départ du piéton. Le radar est positionné aux coordonnées (x_0, y_0, z_0), selon les conditions d'observation souhaitées par l'utilisateur.

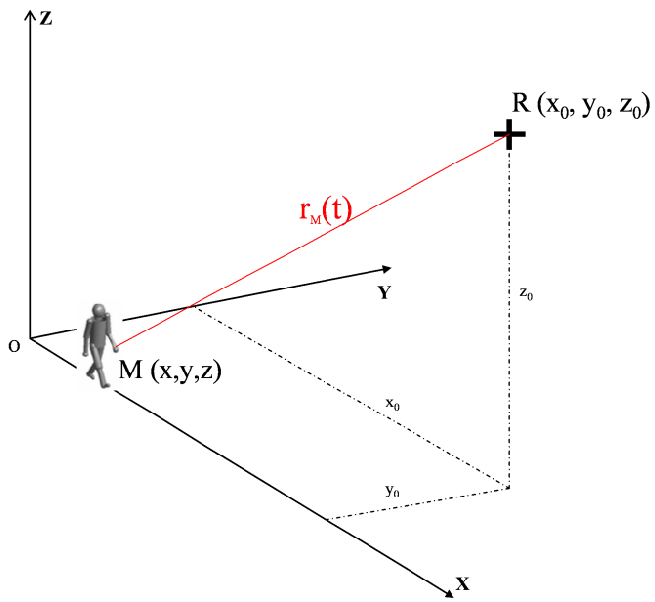


FIGURE 6.1 – Calcul de la distance entre le radar et les points du corps

6.2.1 Vitesse radiale des différentes parties du corps

Rappelons que la vitesse radiale peut s'exprimer comme la projection du vecteur vitesse sur le vecteur de visée soit :

$$V_r = -\overrightarrow{V}.\overrightarrow{u} = -\overrightarrow{V}.\frac{\overrightarrow{OM}}{\|\overrightarrow{OM}\|} \tag{6.2}$$

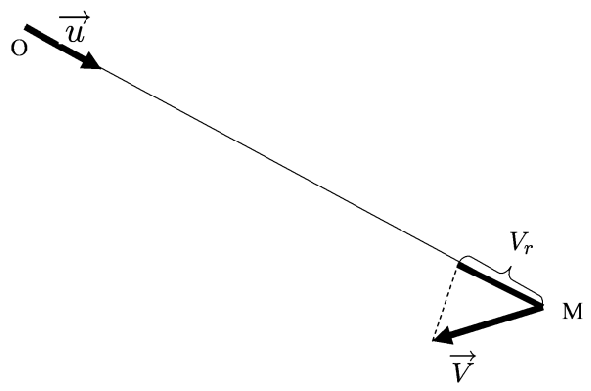


FIGURE 6.2 – Projection du vecteur vitesse sur le vecteur visée

où $\overrightarrow{V}$ est le vecteur vitesse du point M et $\overrightarrow{u}$ est le vecteur de visée normalisé par la distance du point d'observation O au point M (Fig 6.2).

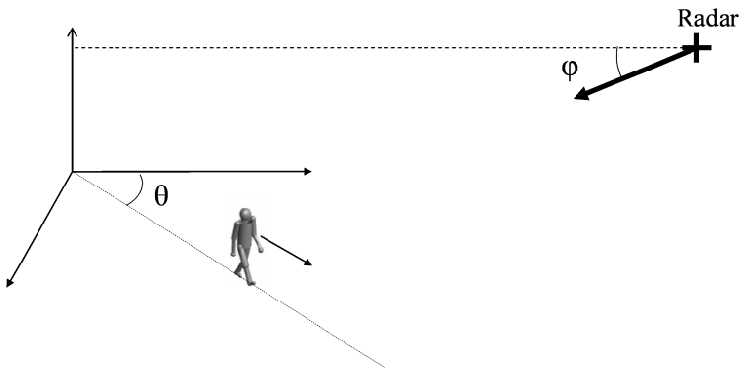


FIGURE 6.3 – Élévation et azimut du vecteur vitesse

Nous avons vu dans la partie 5.3 que la vitesse de chacun des points du corps peut varier considérablement au cours du cycle de déplacement. D'une manière générale, plus le point s'éloigne du centre de gravité, plus l'amplitude des variations est importante.
La vitesse radiale tient compte de la norme du vecteur vitesse, mais également de sa direction. Cette dernière varie selon deux angles (Fig 6.3) :

– l'élévation ϕ définie par :

$$\sin\phi = \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}}$$

qui est l'angle compris entre la direction du déplacement du piéton et la projection du vecteur de visée sur le plan $(O, \overrightarrow{X}, \overrightarrow{Z})$. Il correspond à l'angle de dépointage de l'antenne vers le bas par rapport à l'horizon. Plus la hauteur du radar augmente, plus cet angle est important. Lorsque $\phi = 0^\circ$, le radar est à hauteur du piéton ; lorsque $\phi = 90^\circ$, le radar voit le piéton de dessus.

– l'azimut θ défini par :

$$\cos\theta = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}$$

qui est l'angle compris entre la direction du déplacement du piéton et la projection du vecteur de visée sur le plan $(O, \overrightarrow{X}, \overrightarrow{Y})$. Lorsque $\theta = 0^\circ$, le piéton se déplace face au radar ; lorsque $\theta = 90^\circ$, le piéton se déplace perpendiculairement au radar.

Le vecteur vitesse des différentes parties mobiles du corps du piéton peut être décomposé de la façon suivante :

$$\overrightarrow{V} = \overrightarrow{V}_{trans} + \overrightarrow{V}_{rot} \tag{6.3}$$

où :

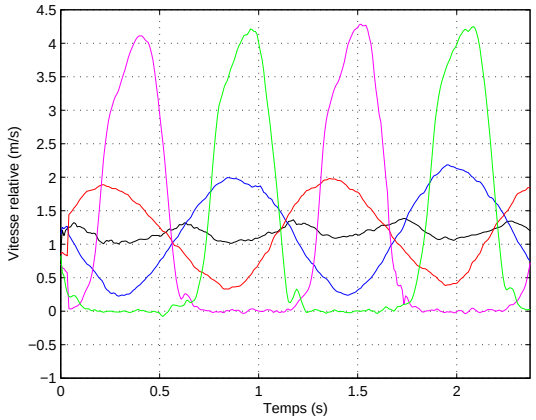
- $\overrightarrow{V}_{trans}$ est la composante du vecteur vitesse liée au mouvement de translation, colinéaire à la direction de déplacement. La composante en Z de ce vecteur est nulle.
- $\overrightarrow{V}_{rot}$ est la composante qui vient s'ajouter au mouvement de translation. Le mouvement est assimilable à une rotation puisque tout membre pivote autour du centre de gravité du piéton. Vu que la composante en Z de ce vecteur n'est pas nulle, la hauteur du radar par rapport au piéton va donc influer sur la vitesse radiale liée au déplacement vertical des différents membres.

La vitesse radiale de chaque partie du corps varie selon la position du radar par rapport au piéton. Nous avons utilisé le modèle de mouvement du piéton pour calculer la vitesse radiale selon l'équation 6.2, en faisant varier la position du radar par rapport au piéton. L'étude a été limitée au mouvement de cinq mêmes points étudiés dans la partie 5.3, à savoir le torse, les deux mains et les deux pieds.
La liste des configurations n'est pas exhaustive. Aussi en avons nous choisi quelques unes pour illustrer l'évolution de la vitesse radiale de chaque partie du corps d'un piéton en fonction de son orientation par rapport au radar. Les courbes sont représentées sur les figures 6.4 (marche), 6.5 et 6.6 (marche et course lorsque le radar est au dessus du piéton).

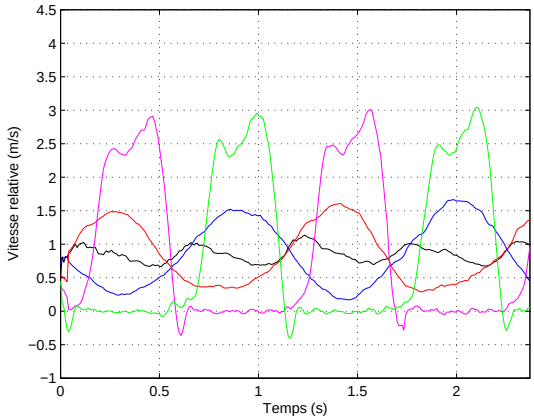
Rappelons les caractéristiques dynamiques du modèle de piéton utilisé pour calculer les vitesses radiales ainsi que les images radar simulées.

	Marche	**Course**
V_0 **(m/s)**	1,18	3,55
T_c **(s)**	1,10	0,75
L_c **(m)**	1,30	2,66

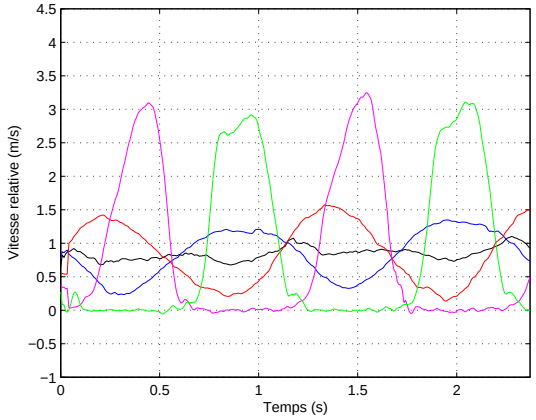
TABLE 6.1 – Caractéristiques du cycle du modèle du piéton



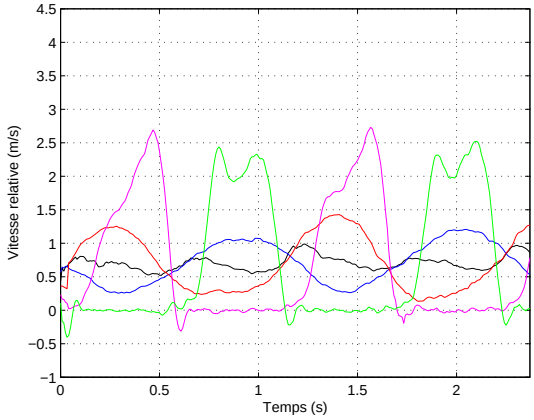
(a) $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$



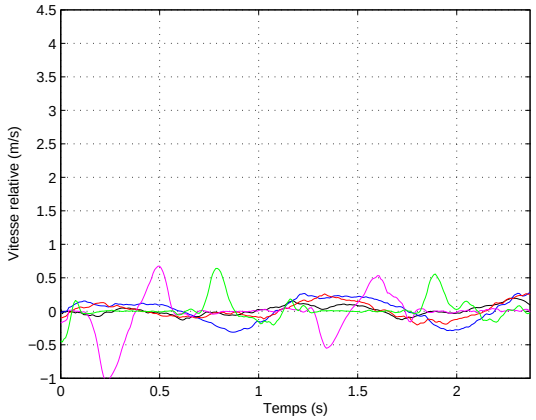
(b) $\theta = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$



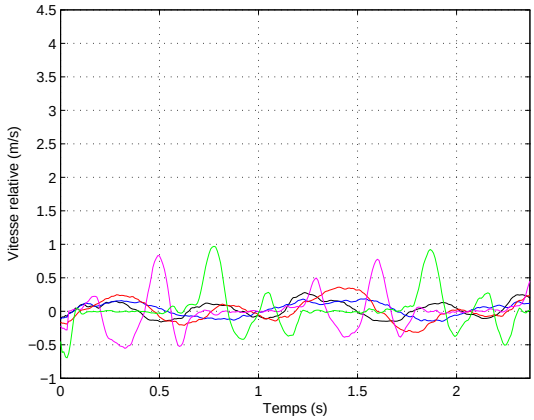
(c) $\theta = 45^\circ$, $\phi = 0^\circ$



(d) $\theta = 45^\circ$, $\phi = 45^\circ$

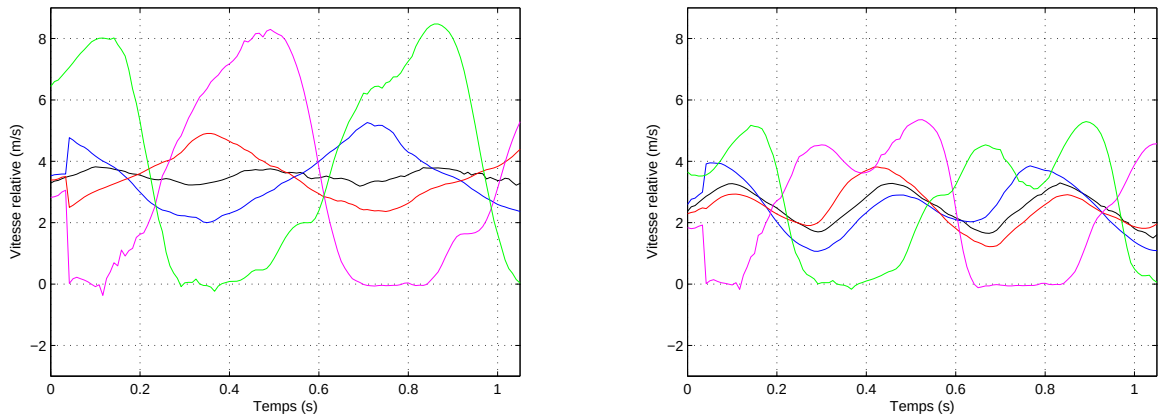


(e) $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$



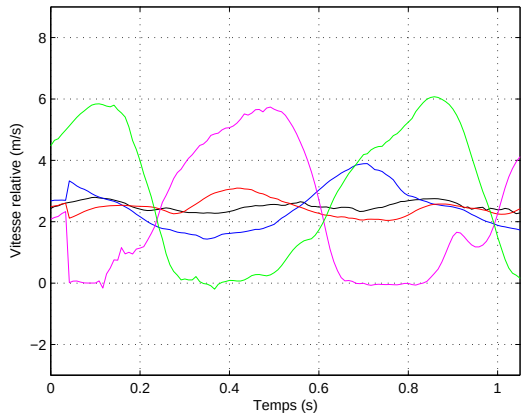
(f) $\theta = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$

FIGURE 6.4 – **Marche** : Variation des vitesses radiales pour un piéton dont la vitesse est de 1,18 m/s (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

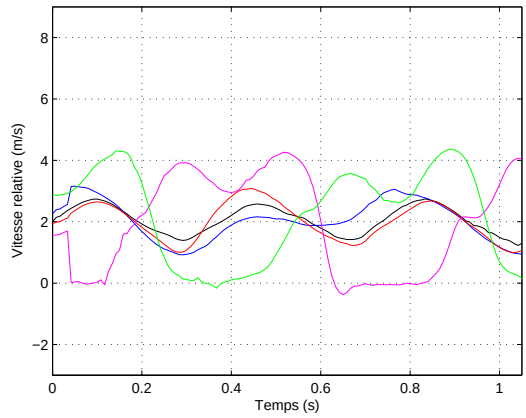


(a) $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$

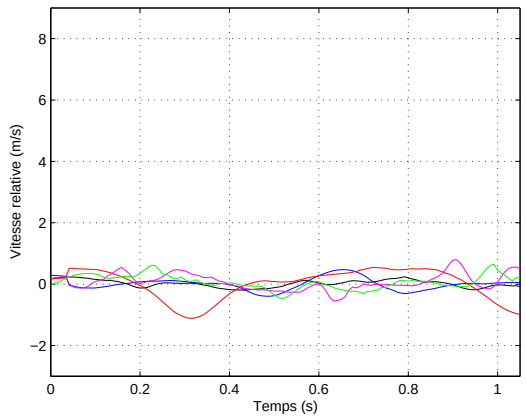
(b) $\theta = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$



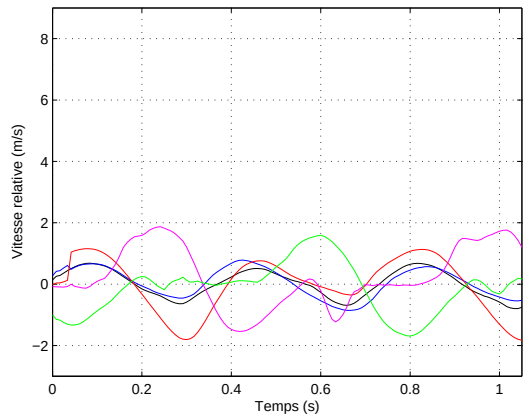
(c) $\theta = 45^\circ$, $\phi = 0^\circ$



(d) $\theta = 45^\circ$, $\phi = 45^\circ$

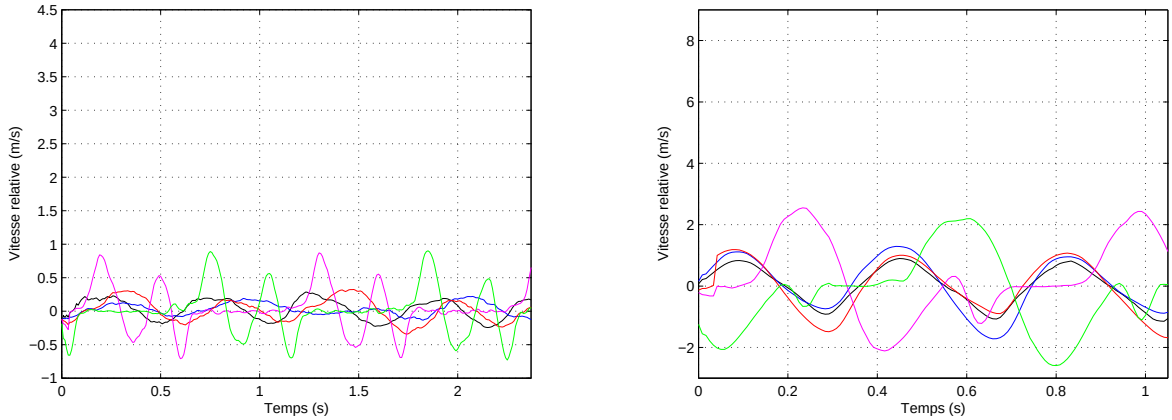


(e) $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$



(f) $\theta = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$

FIGURE 6.5 – **Course** : Variation des vitesses radiales pour un piéton dont la vitesse est de 3,55 m/s(Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).



(a) Marche (b) Course

FIGURE 6.6 – Variation des vitesses radiales lorsque le radar voit le piéton de dessus (Torse, main gauche, main droite, pied gauche, pied droit).

Variation de l'azimut (θ) :
Lorsque le piéton est à hauteur du radar ($\phi = 0^\circ$), l'allure des courbes est similaire à celle de la vitesse absolue (Fig 5.10 et Fig 5.11) calculées dans la partie 5.3. Le seul changement vient de l'amplitude de la vitesse qui varie en $cos\theta$. Lorsque $\theta = 90^\circ$, seuls les pieds n'ont pas une vitesse radiale nulle. Cela vient du fait que la direction du vecteur vitesse peut dévier de la direction de déplacement, autrement dit que la composante en Y n'est pas nulle.

Variation de l'élévation (ϕ) :
Lorsque la hauteur d'observation varie, le mouvement vertical des points devient beaucoup plus significatif dans le calcul de la vitesse radiale. L'oscillation verticale du torse est alors beaucoup plus perceptible, notamment pour la course. En vue de dessus (Fig. 6.6), seule la composante verticale des mouvements est visible. La vitesse radiale est alors positive lorsque les points montent, négative lorsqu'ils descendent.

6.2.2 Imagerie radar à partir des données simulées

Le modèle de mouvement du piéton, décrit par un fichier de point (section 5.2.2), est utilisé pour produire les images simulées. La distance entre un réflecteur M du piéton et le radar est calculée au cours du temps par :

$$r_M(t) = \sqrt{(x_M(t) - x_0)^2 + (y_M(t) - y_0)^2 + (z_M(t) - z_0)^2} \tag{6.4}$$

La matrice décrivant la distance de chaque réflecteur au cours du temps est ensuite injectée dans l'outil de simulation (section 2.4) afin de calculer la matrice de rétrodiffusion puis de former les images.

Mise en forme des données :
Les données du modèle de piéton sont fournies à une fréquence de 120 Hz, ce qui est souvent

insuffisant compte tenu de l'ambiguïté en Doppler requise pour le calcul des images. En effet, à cette fréquence d'échantillonnage Doppler, la vitesse maximum mesurable est de $0,86$ m/s, ce qui est bien évidemment inférieur aux vitesses à mesurer. Il est donc nécessaire d'interpoler puis de suréchantillonner les données pour pouvoir choisir les échantillons à une fréquence respectant l'ambiguïté Doppler imposée par la nature du phénomène observé. Dans le cas de la marche, un échantillonnage à 1 KHz est choisi, ce qui correspond à une plage de vitesse de 14 m/s (pour $f_0 = 10,8$ GHz).

6.2.2.1 Imagerie radar distance-Doppler

Le premier objectif a été de mettre en évidence l'interaction des différentes parties du corps avec une onde radar. A partir d'exemples simples, nous avons donc choisi de nous focaliser sur la variation en distance et en Doppler (ou vitesse radiale) de cinq points : les pieds, les mains et le torse. Ce sont ces mêmes points dont la vitesse a été analysée au chapitre 5 ainsi que dans la partie 6.2.1.
Un des intérêts du modèle de piéton est de pouvoir sélectionner de manière indépendante les points que l'on souhaite étudier. Nous avons d'abord mis en évidence l'interaction, en distance et en Doppler, du torse, de mains et des pieds au cours du mouvement. L'opération a été effectuée lorsque le radar est situé en face du piéton. Nous avons ensuite formé l'image distance-Doppler en combinant le mouvement de tous les points, sachant que la contribution totale est la somme des contributions séparées. Nous avons répété cette opération en faisant varier l'azimut et l'élévation de la ligne de visée du radar par rapport à la direction de déplacement du piéton. Ceci a été fait afin d'analyser l'évolution de la signature distance Doppler du piéton en fonction de son orientation par rapport au radar.

Les résultats sont très parlant s'ils peuvent faire l'objet d'une visualisation continue (films). Dans ce document, nous ne présentons que des instantanés pris à différents instants et regroupés sur une page unique.
Chaque page de résultat, correspondant à un angle de visée, comporte cinq lignes et deux colonnes. La colonne de gauche correspond à un temps d'intégration $\Delta T = 0,05$ s, la colonne de droite à $\Delta T = 0,1$ s. Ces valeurs correspondent respectivement à des résolutions en Doppler de 20 Hz et 10 Hz ou en vitesse de $0,28$ m/s et $0,14$ m/s. Les lignes quant à elles correspondent à l'instant de l'acquisition. Les figures se lisent donc de haut en bas, de manière chronologique. La succession d'images permet de voir l'évolution des caractéristiques distance Doppler au cours du temps. Le temps entre deux images est de $0,15$ s pour la marche, $0,08$ s pour la course. L'affichage de cinq images correspondent à environ un demi cycle de déplacement, soit un pas.

Dans toutes les configurations, le piéton se déplace vers radar. Le Doppler moyen est donc par défaut positif tandis que la distance diminue au cours du temps.
Compte tenu du nombre important de figures, le tableau 6.2 permet de récapituler l'ensemble des configurations pour les différentes simulations effectuées.

θ	ϕ	Torse	Pieds	Mains	Marche	Course
0°	0°	X	X		Fig 6.7	Fig 6.16
0°	0°	X		X	Fig 6.8	Fig 6.17
0°	0°	X	X	X	Fig 6.9	Fig 6.18
45°	0°	X	X	X	Fig 6.10	Fig 6.19
90°	0°	X	X	X	Fig 6.11	Fig 6.20
0°	45°	X	X	X	Fig 6.12	Fig 6.21
45°	45°	X	X	X	Fig 6.13	Fig 6.22
90°	45°	X	X	X	Fig 6.14	Fig 6.23
	90°	X	X	X	Fig 6.15	Fig 6.24

TABLE 6.2 – Récapitulatif des simulations

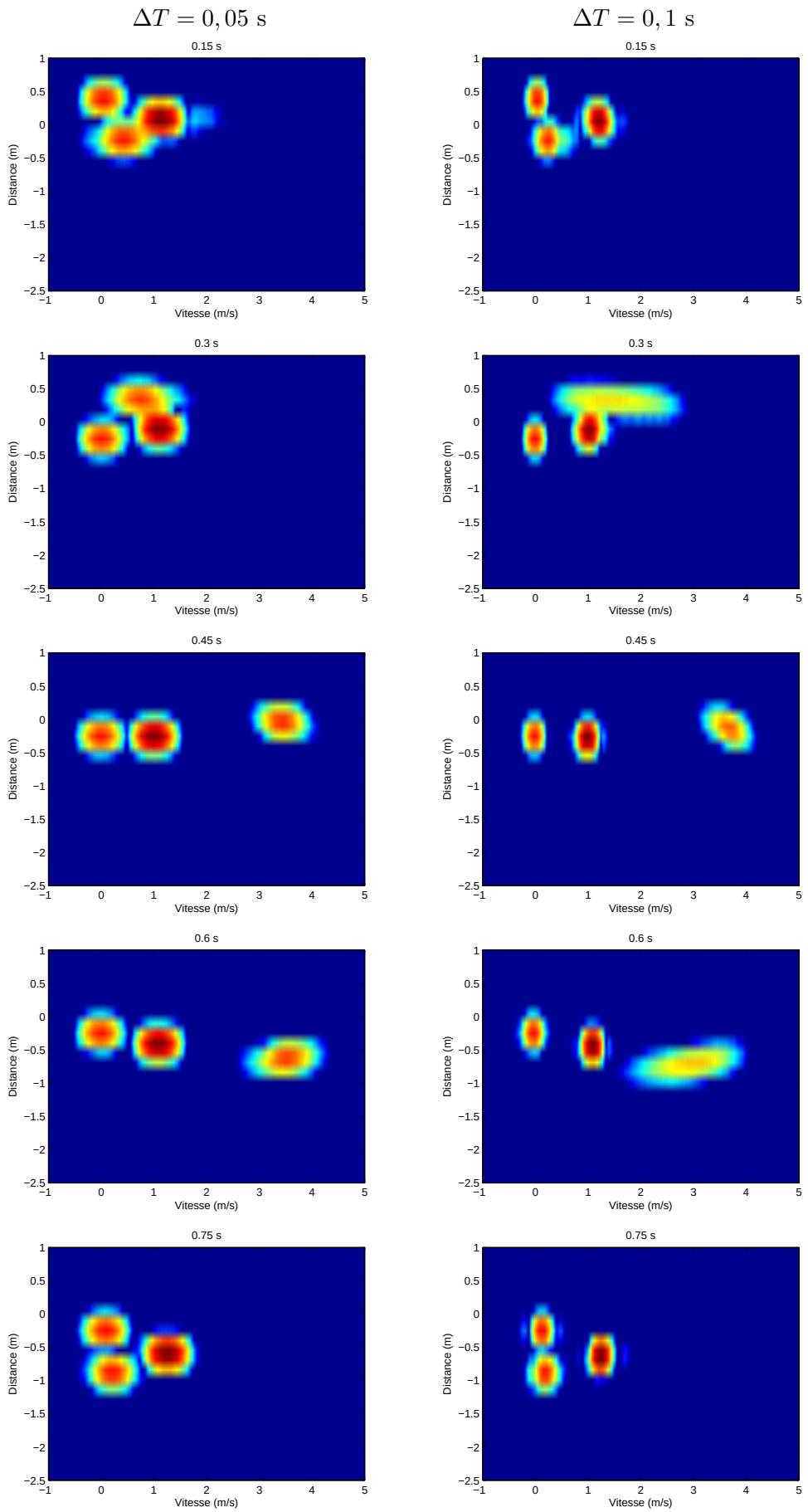


FIGURE 6.7 – **Marche** : mouvement corps + pieds, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$

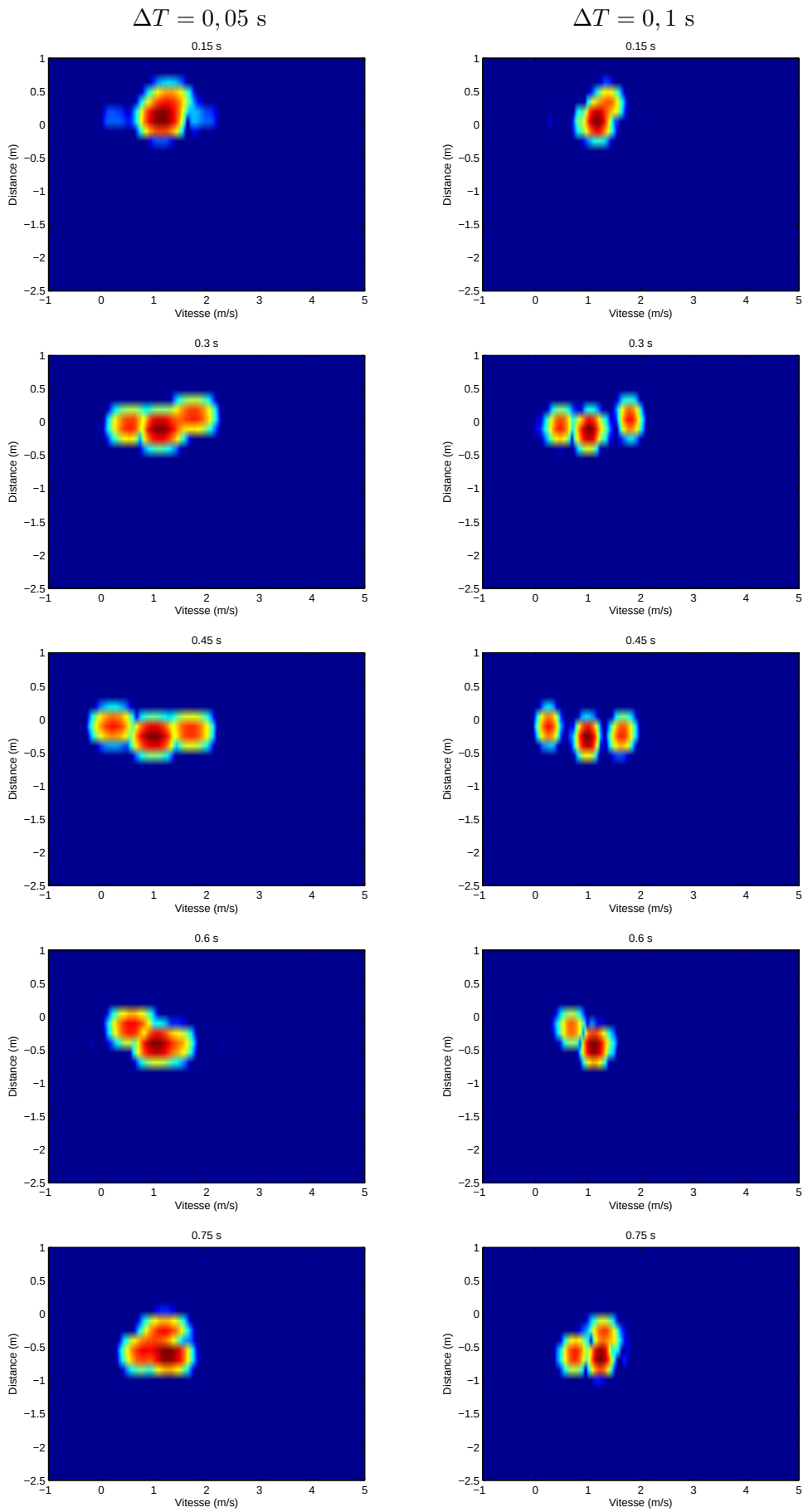


FIGURE 6.8 – **Marche** : mouvement corps + mains, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$

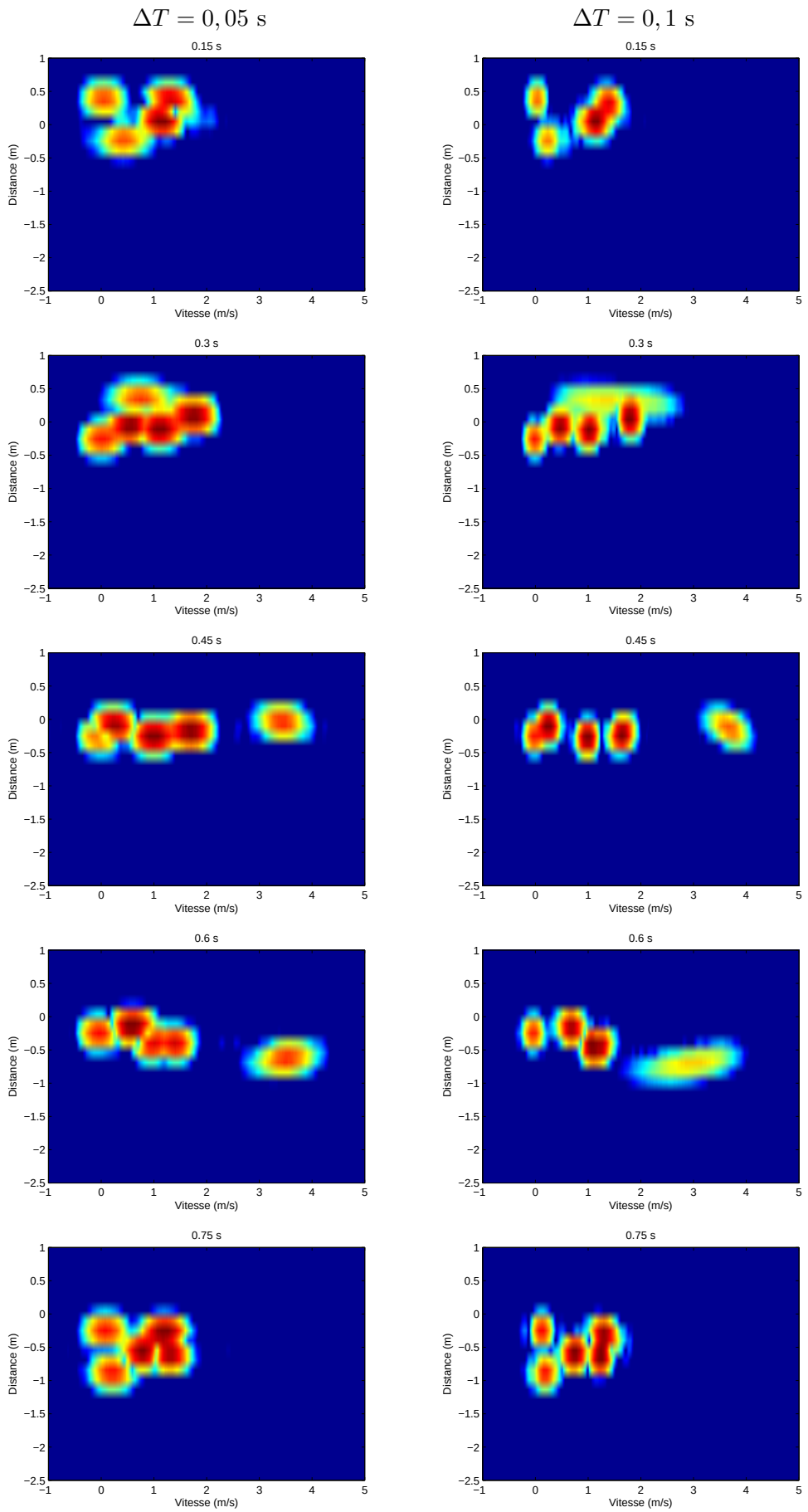


FIGURE 6.9 – **Marche** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 0^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$

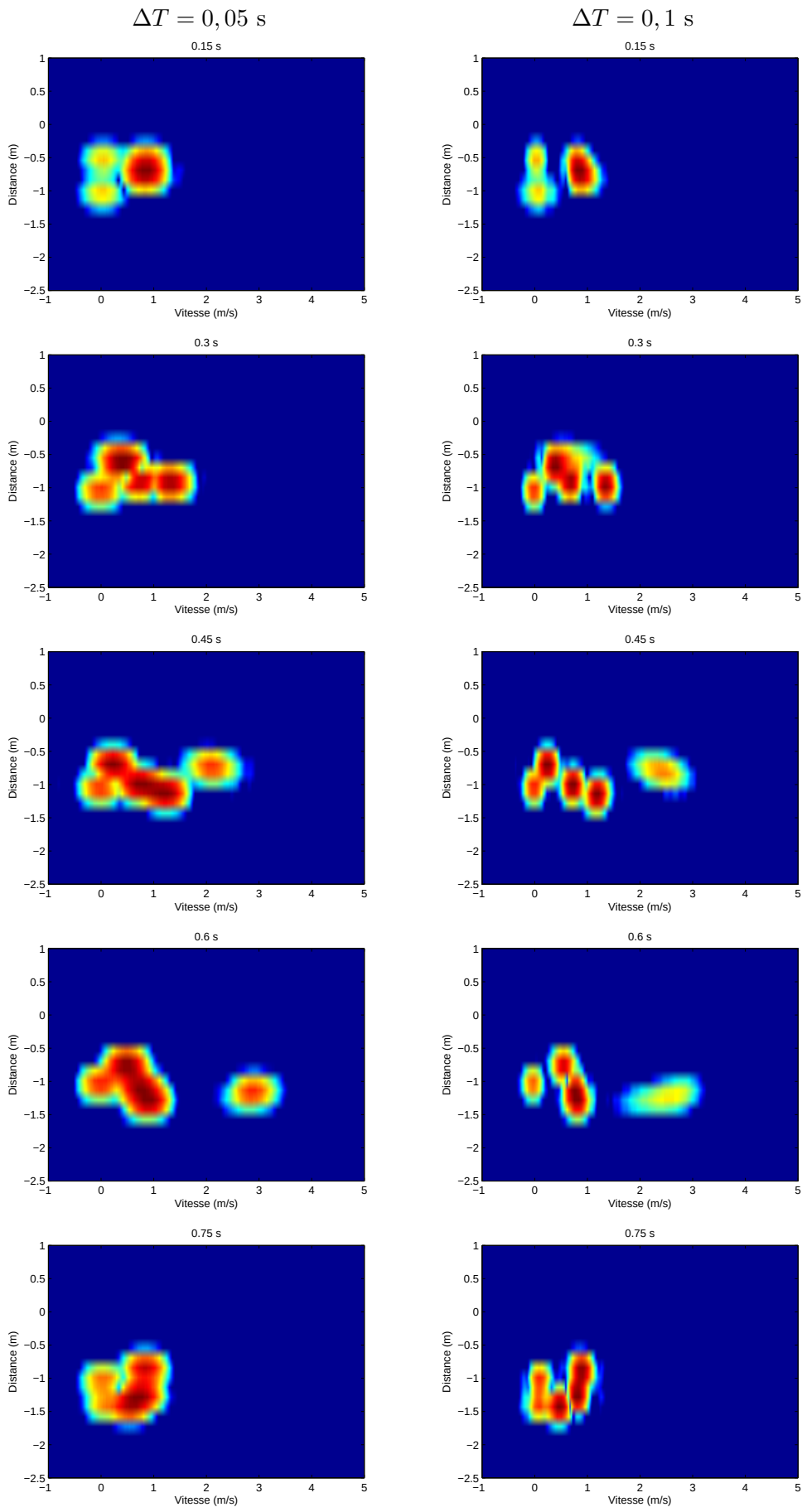


FIGURE 6.10 – **Marche** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 45^\circ$, $\phi = 0^\circ$

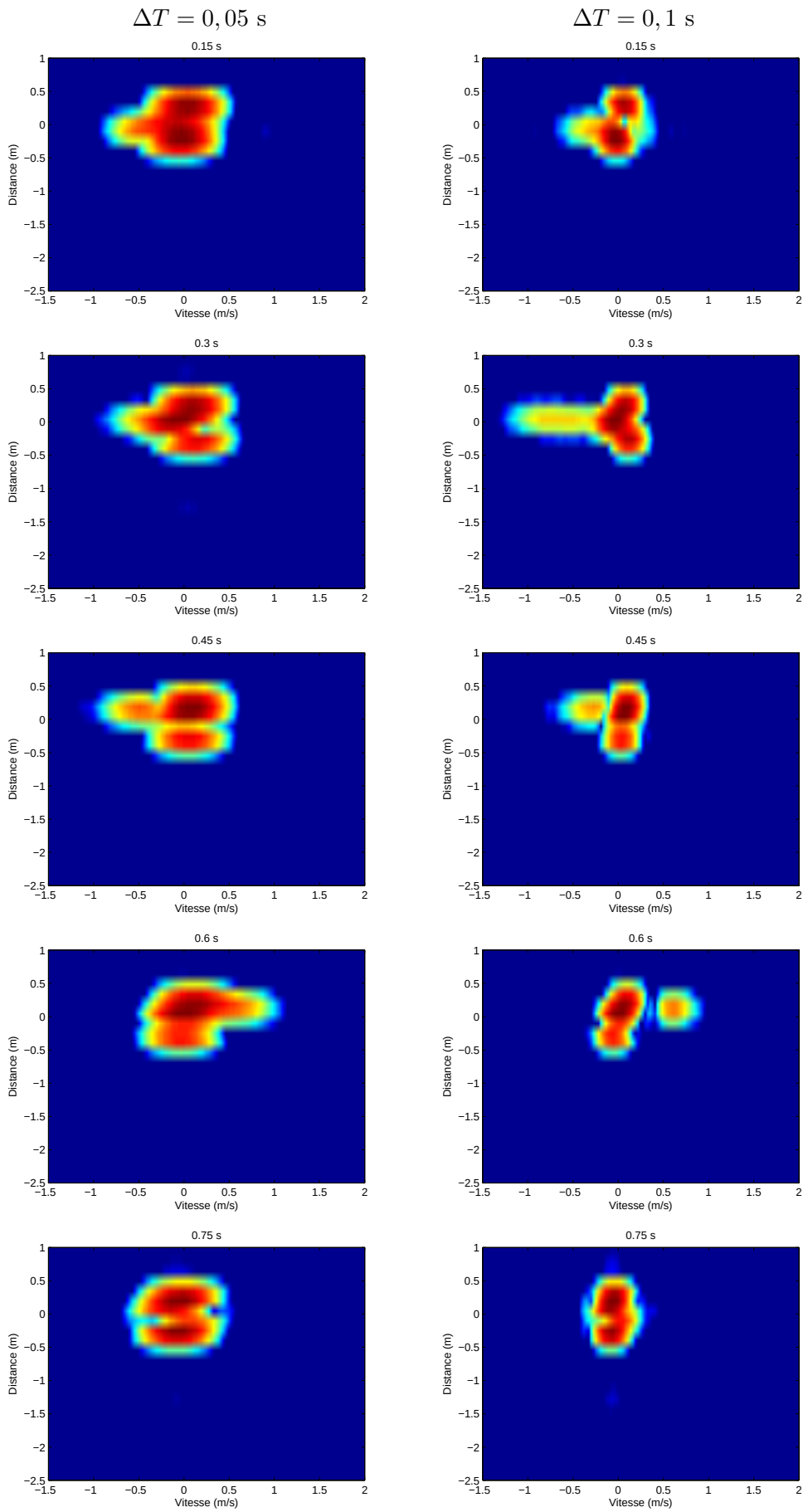


FIGURE 6.11 – **Marche** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$

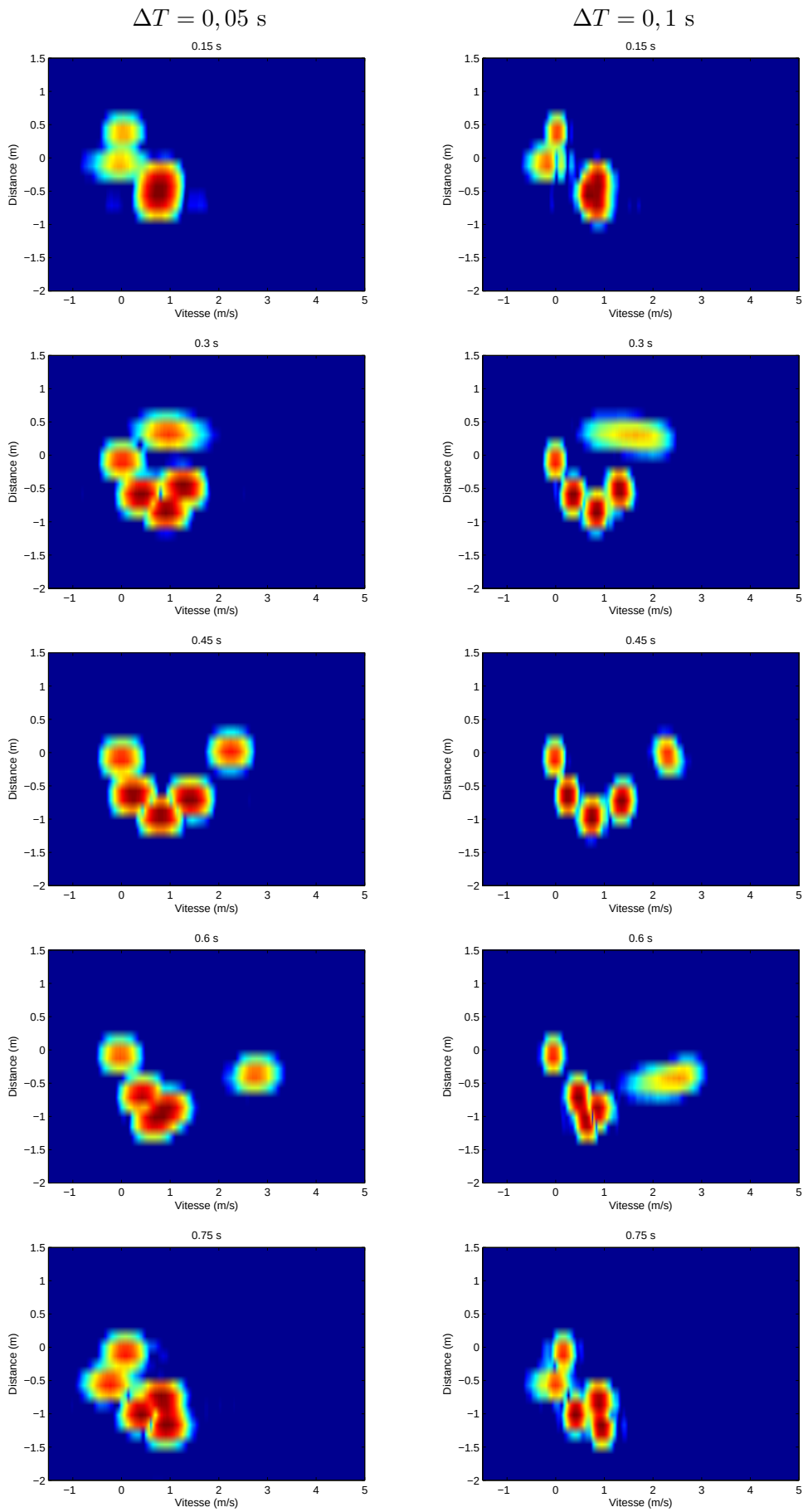


FIGURE 6.12 – **Marche** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$

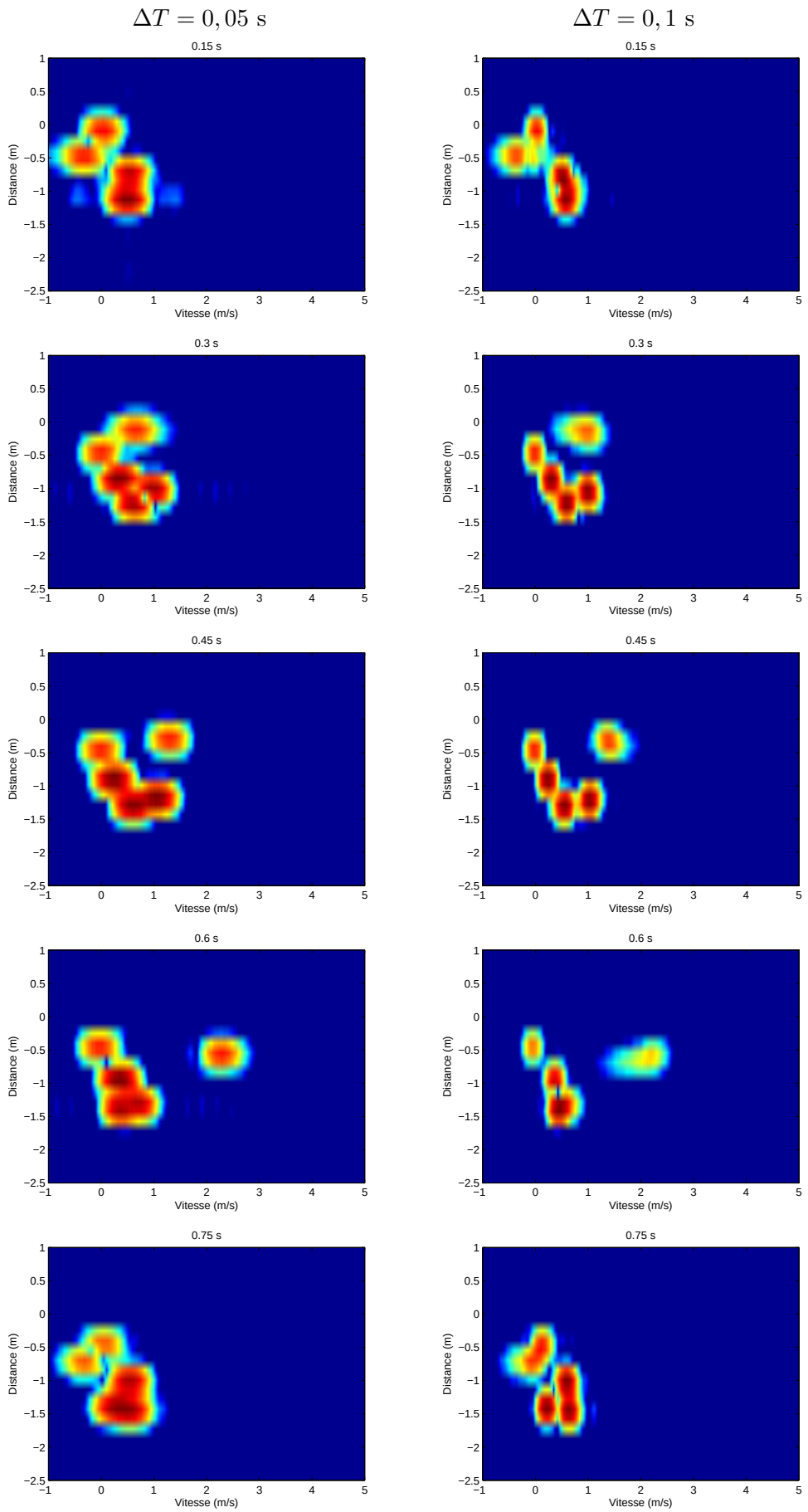


FIGURE 6.13 – **Marche** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 45^\circ$, $\phi = 45^\circ$

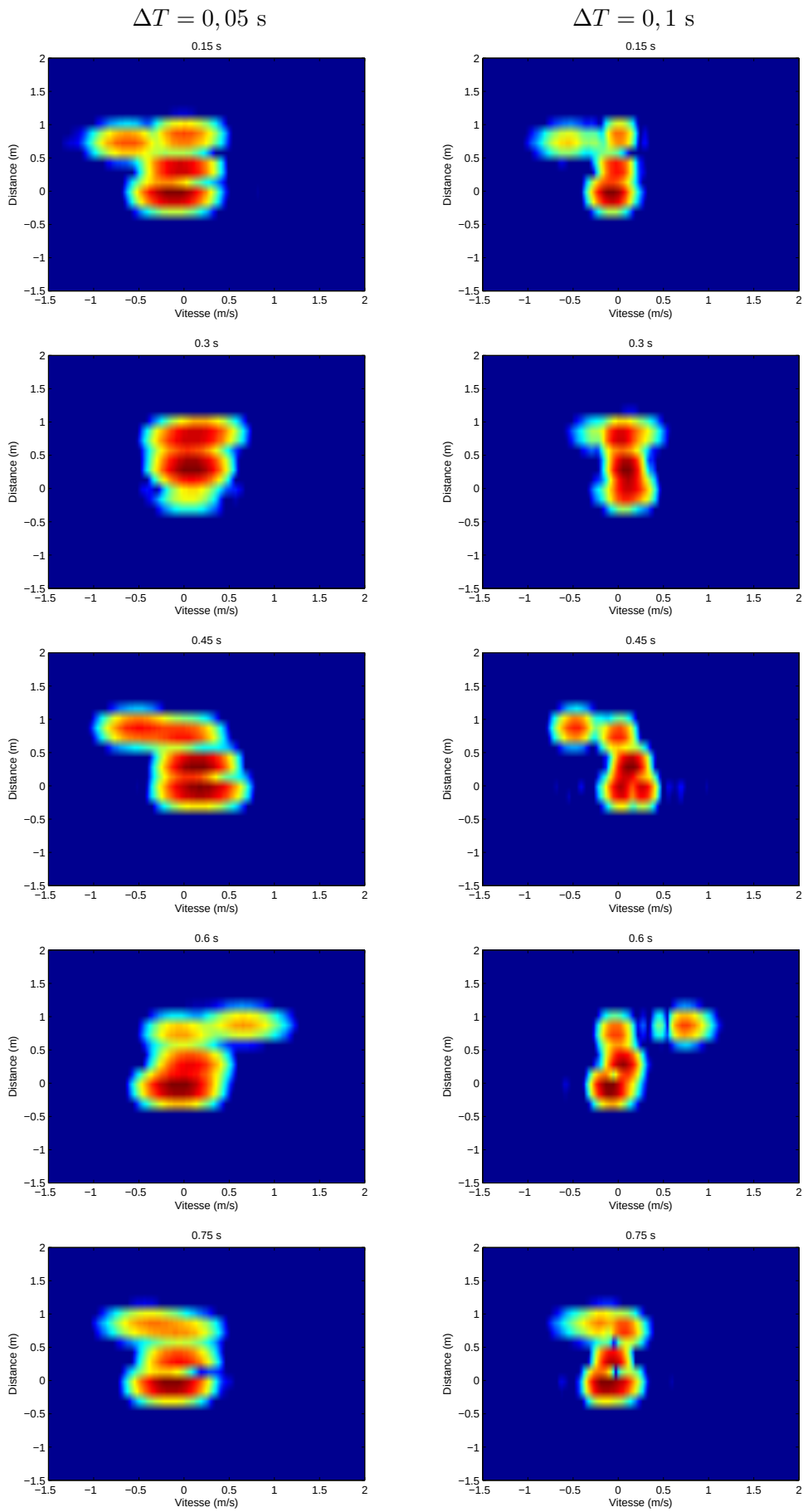


FIGURE 6.14 – **Marche** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$

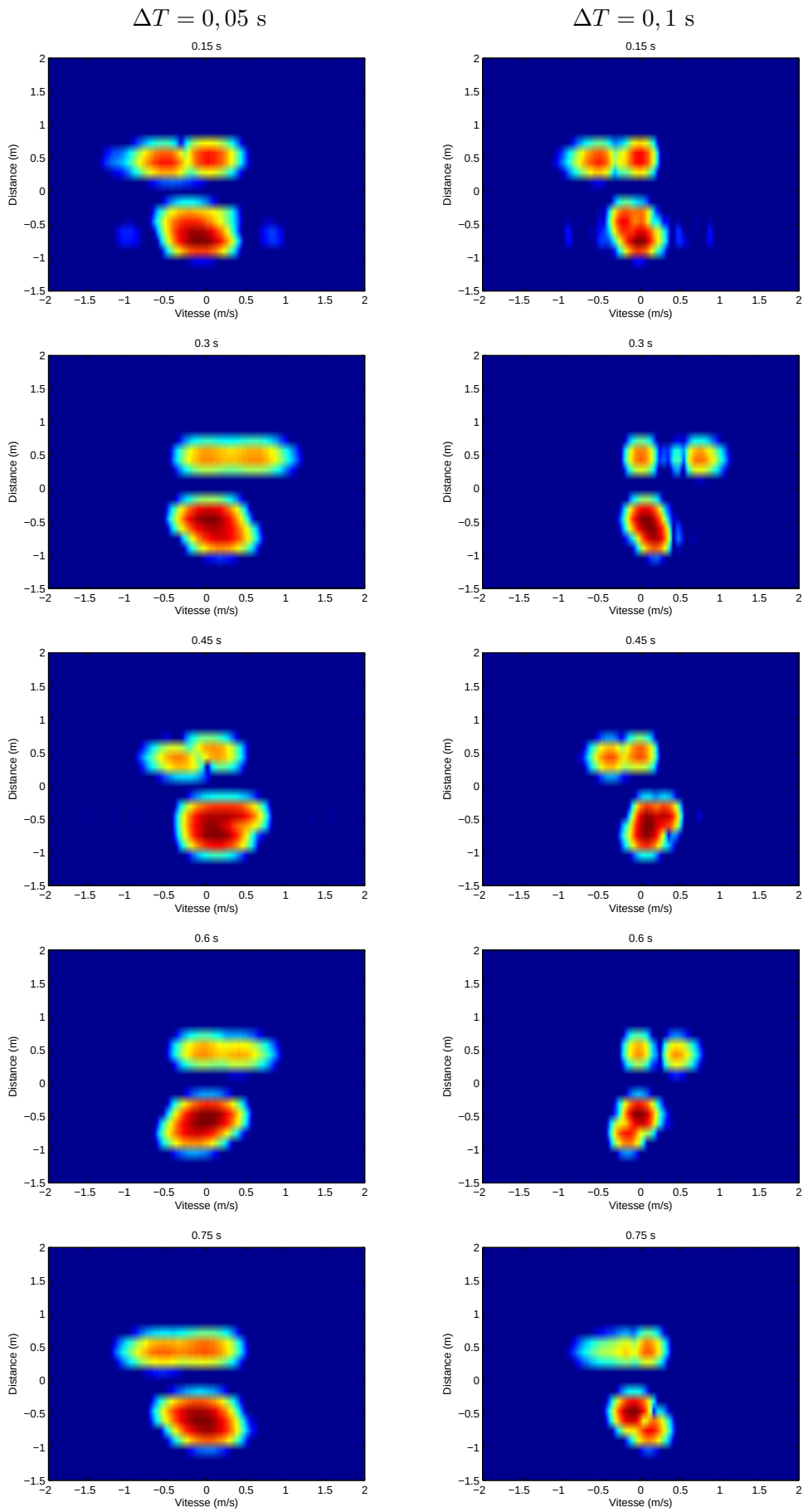


FIGURE 6.15 – **Marche** : mouvement corps + pieds + mains, $\phi = 90^{\circ}$ (vue de dessus)

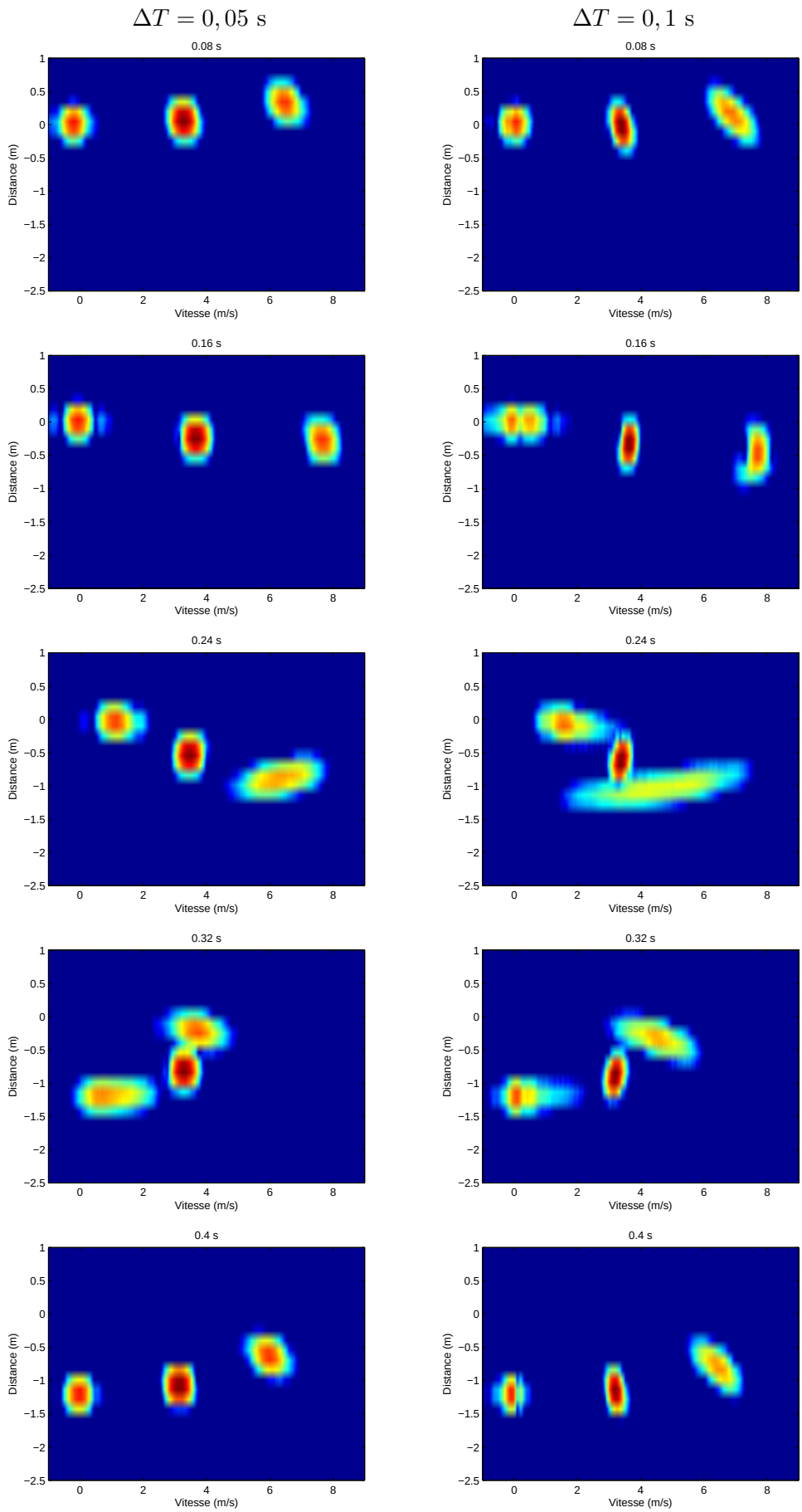


FIGURE 6.16 – **Course** : mouvement corps + pieds, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$

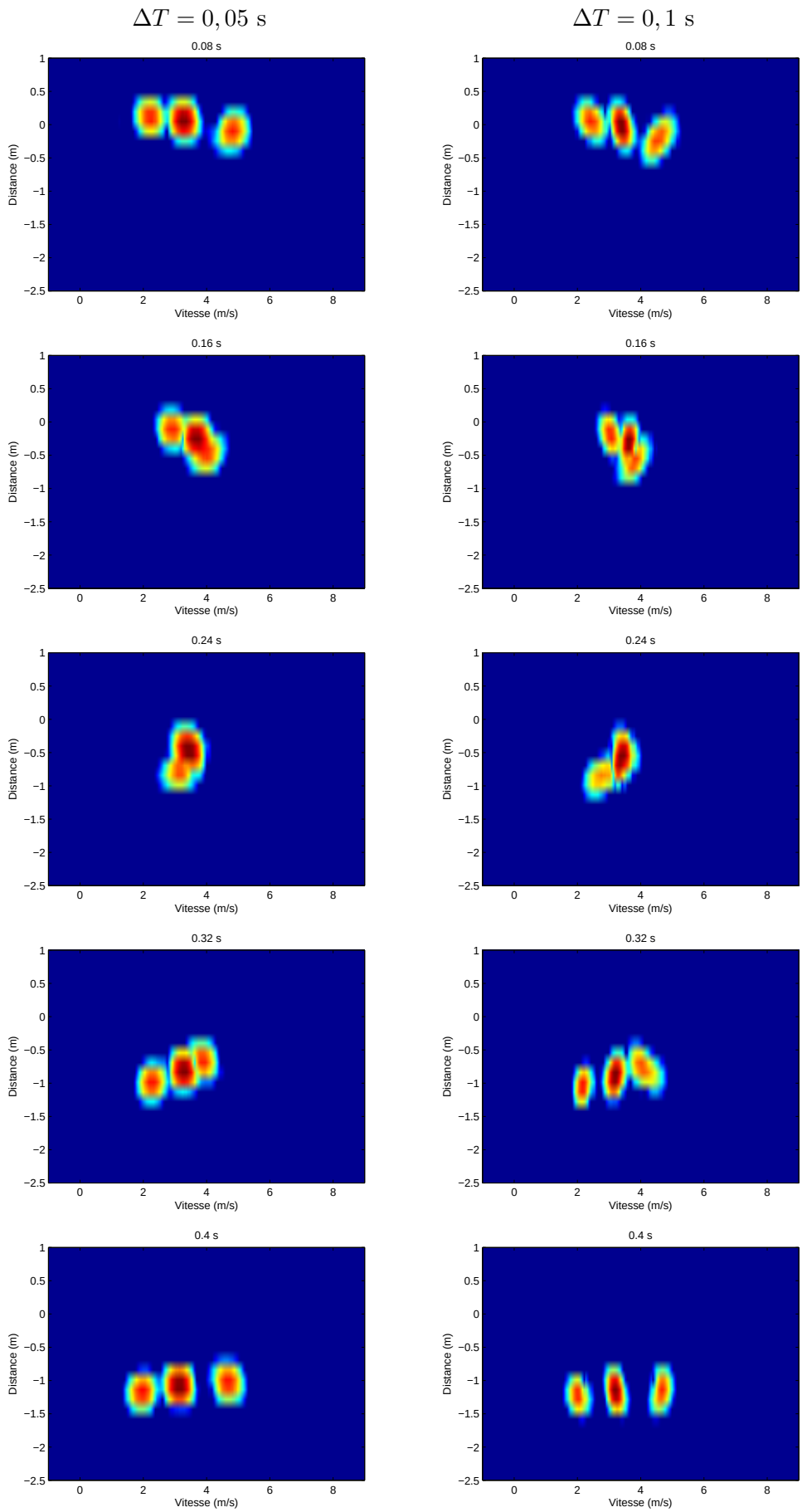


FIGURE 6.17 – **Course** : mouvement corps + mains, $\theta = 0^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$

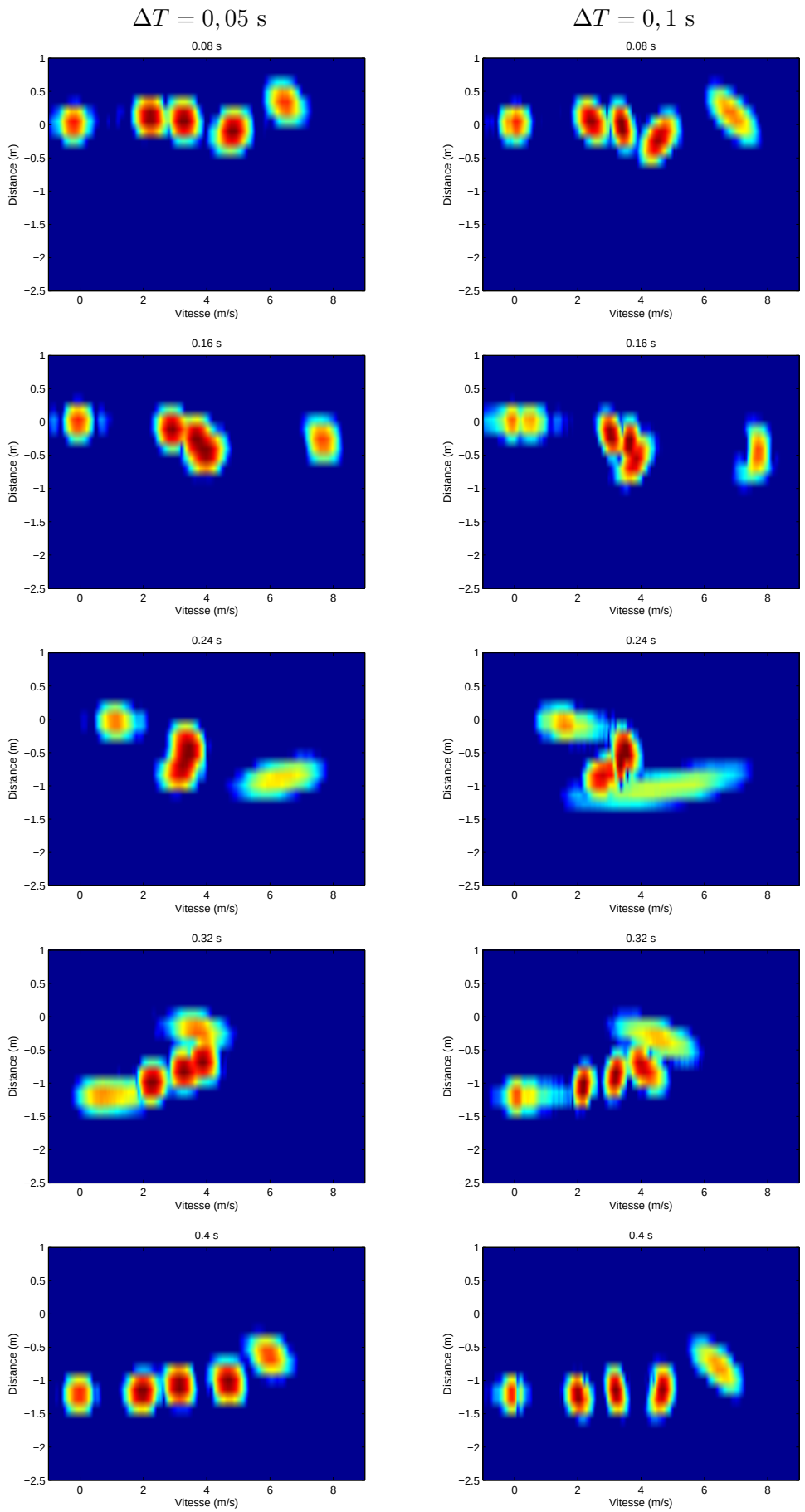


FIGURE 6.18 – **Course** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$

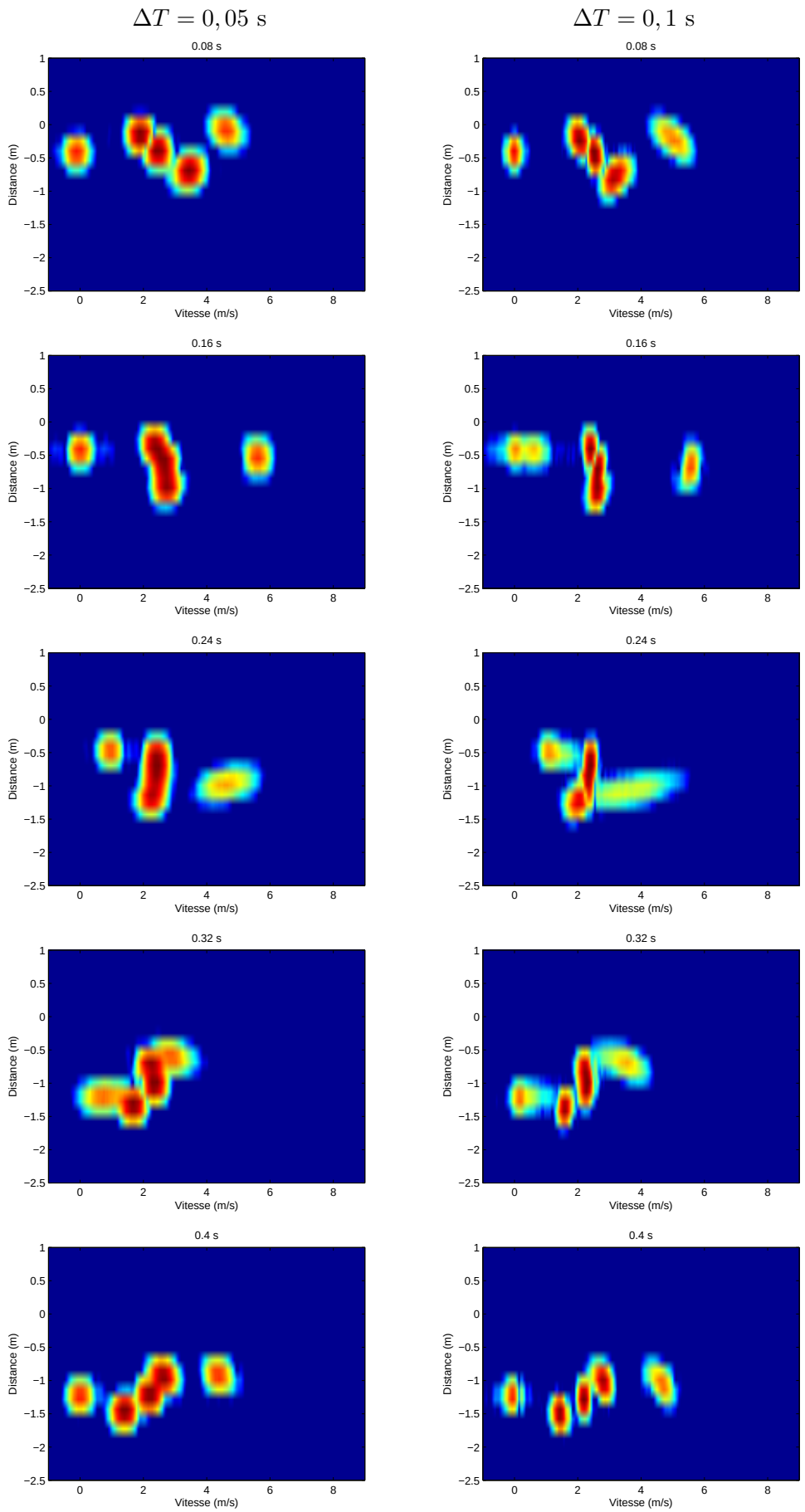


FIGURE 6.19 – **Course** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 45^\circ$, $\phi = 0^\circ$

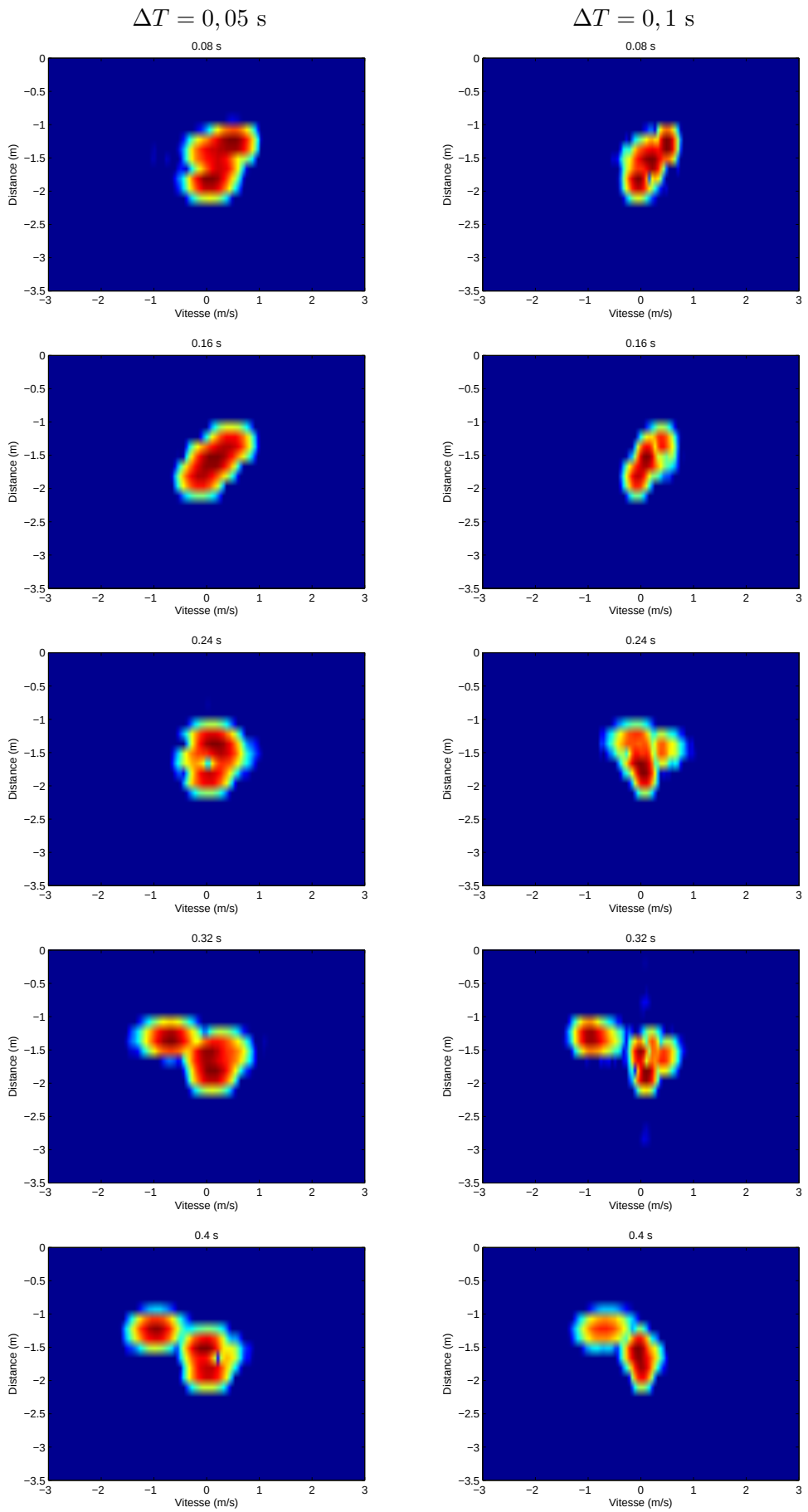


FIGURE 6.20 – **Course** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 90^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$

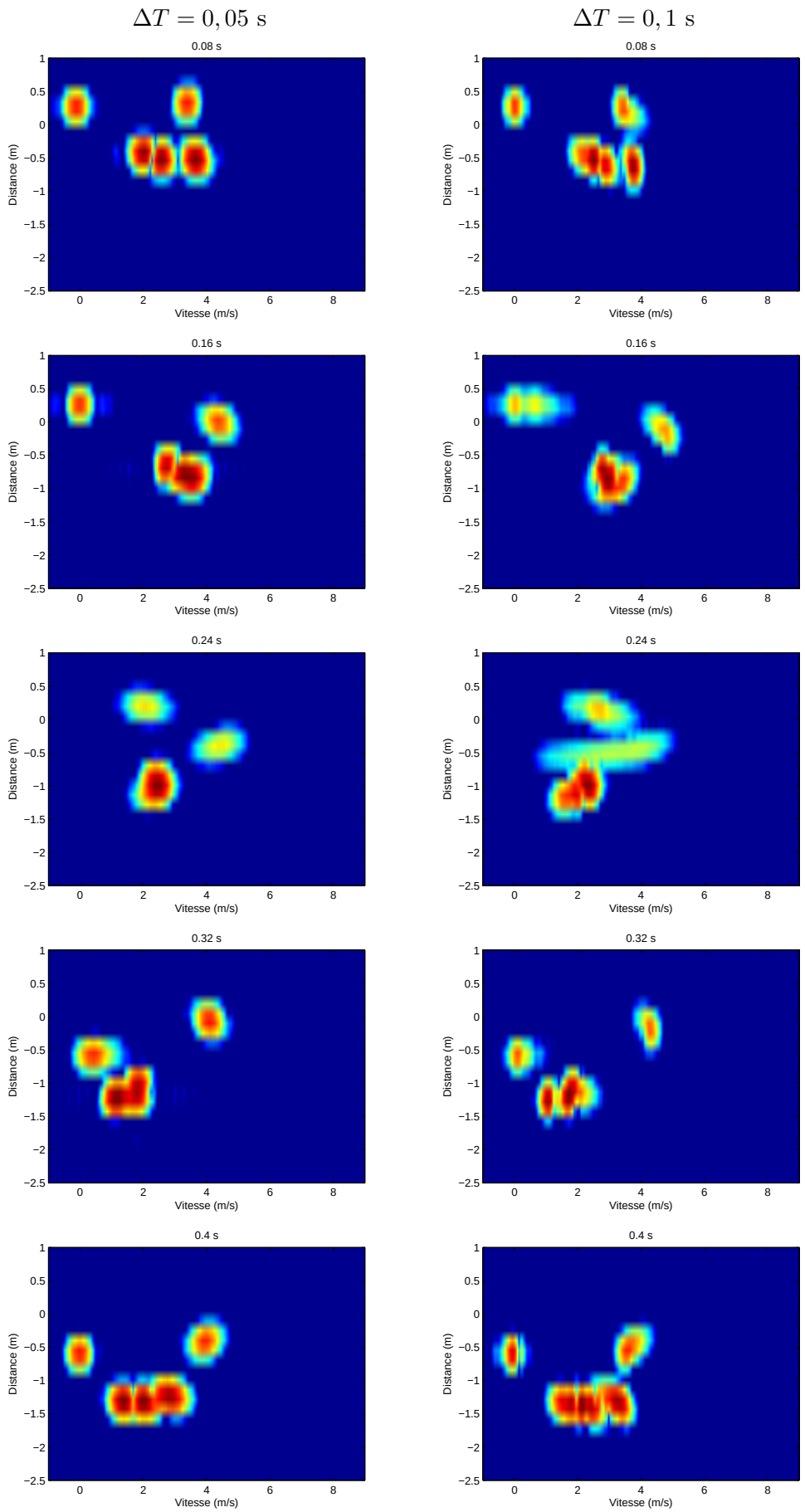


FIGURE 6.21 – **Course** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$

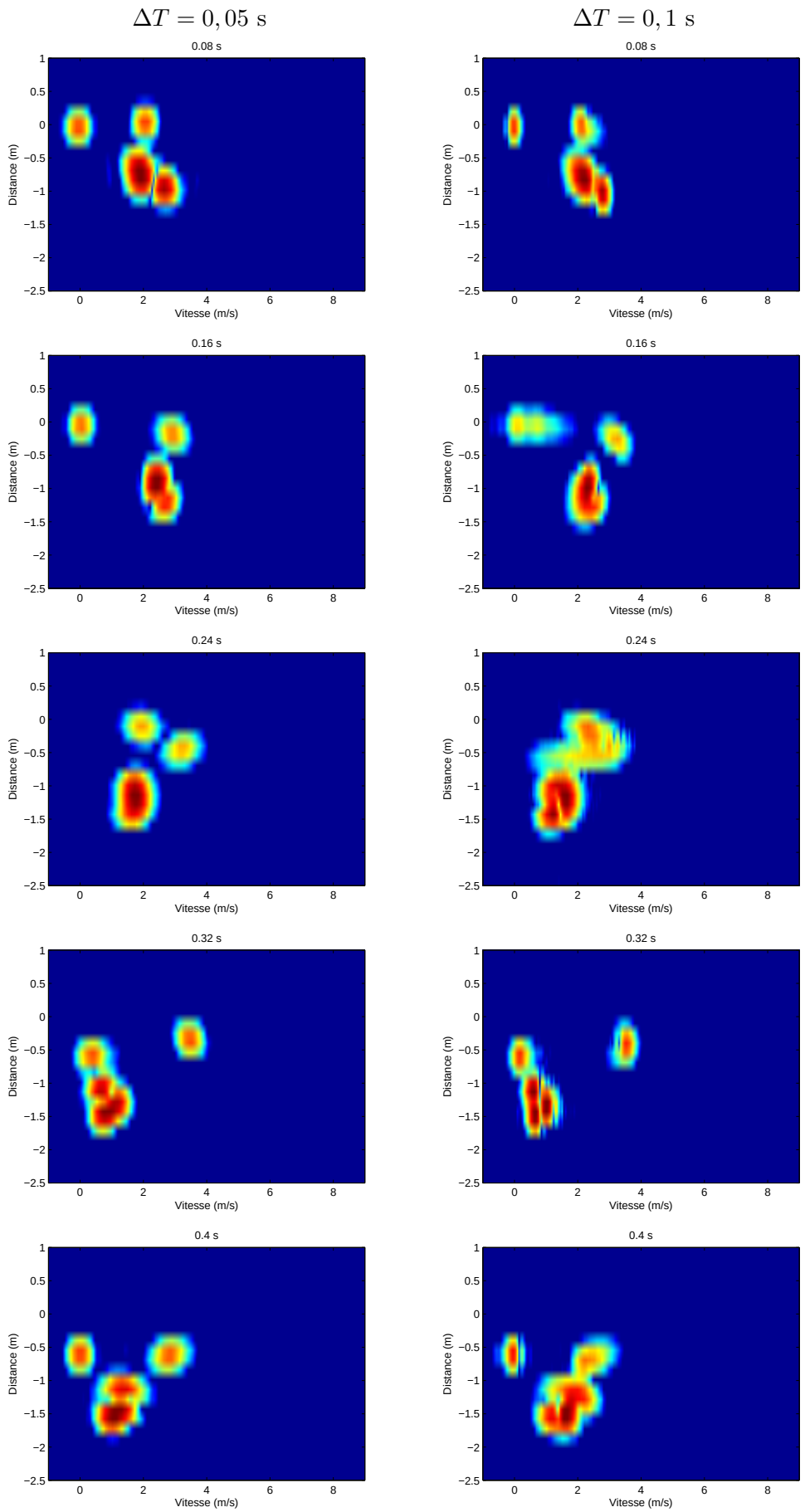


FIGURE 6.22 – **Course** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 45^\circ$, $\phi = 45^\circ$

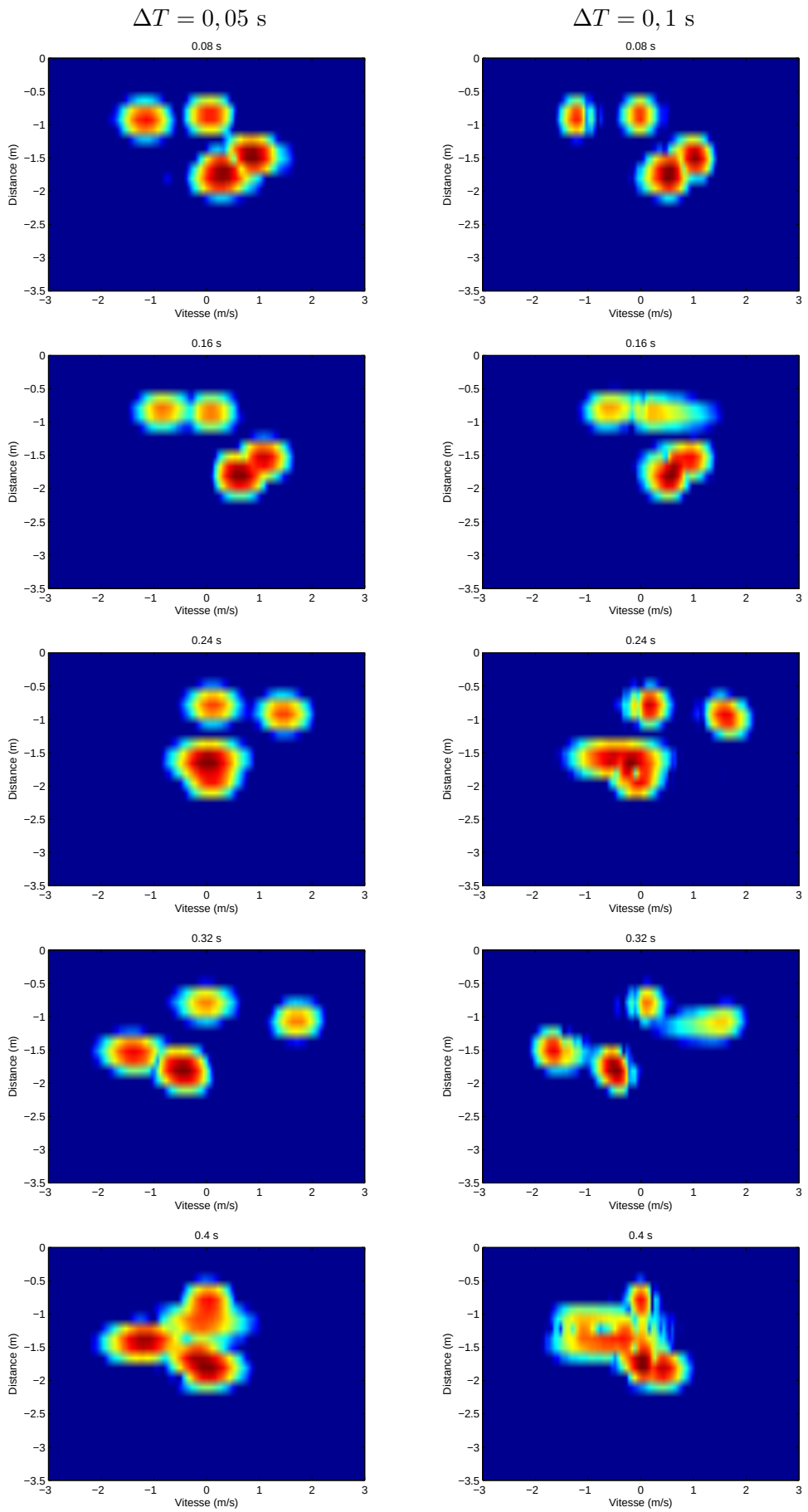


FIGURE 6.23 – **Course** : mouvement corps + pieds + mains, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 45^\circ$

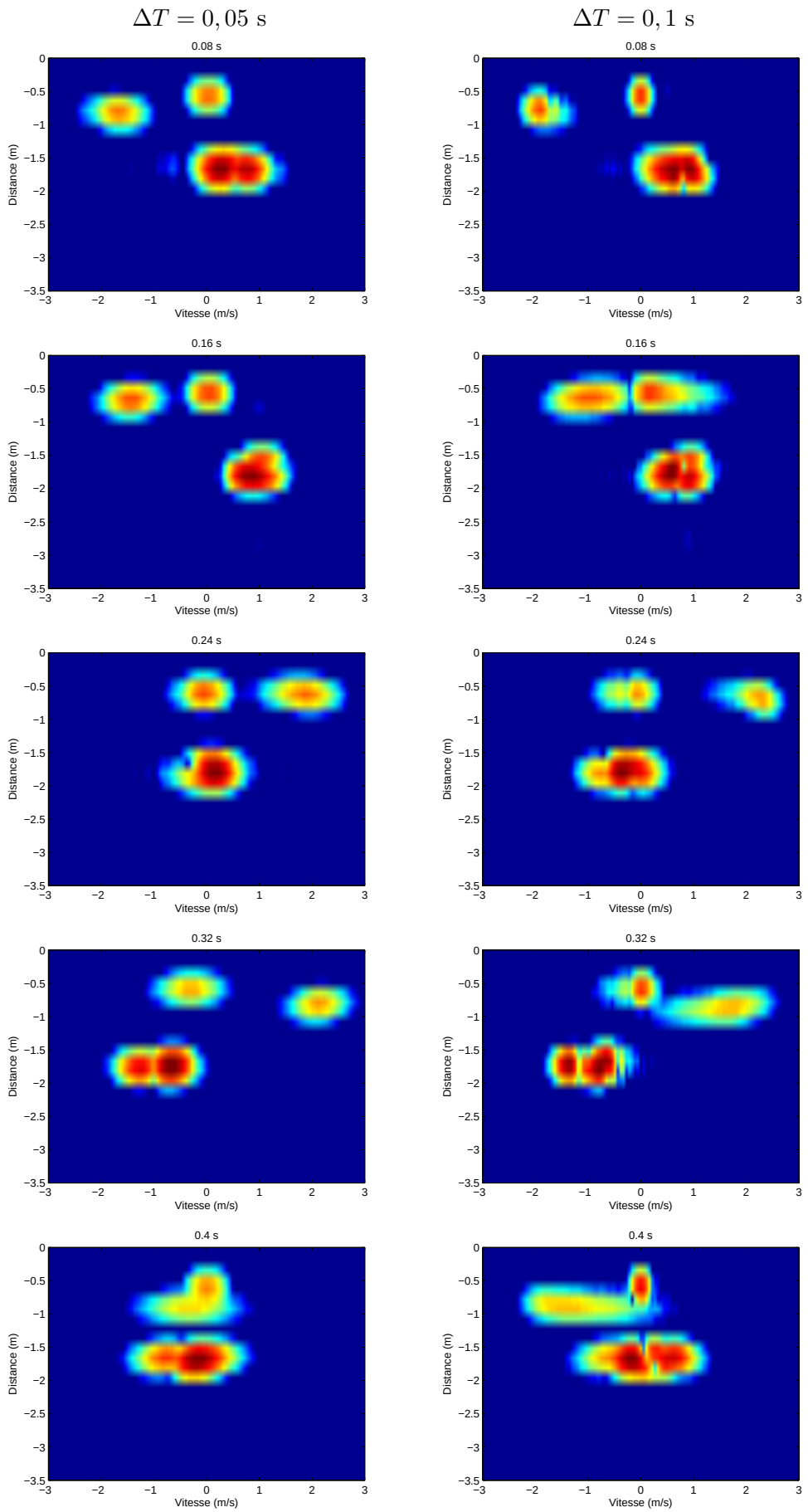


FIGURE 6.24 – **Course** : mouvement corps + pieds + mains, $\phi = 90^{\circ}$ (vue de dessus)

Tout d'abord, analysons les résultats lorsque le piéton se déplace face au radar ($\theta = 0^\circ$ et $\phi = 0^\circ$).

Analyse fine du mouvement des pieds :
Les figures 6.7 (marche) et 6.16 (course) mettent en évidence le mouvement des pieds par rapport à celui du corps.
Les pieds gravitent autour du torse dont la vitesse reste quasiment constante au cours des 5 acquisitions. La vitesse des pieds subit quant à elle des variations plus ou moins importantes selon l'instant de l'acquisition et la durée d'intégration :

- **La marche** ($V_0 = 1,18$ m/s) :
  Sur la première ligne (première acquisition), les deux pieds ont une vitesse quasi nulle. Le premier pied (représenté en haut sur l'image) est à l'arrêt tandis que le deuxième s'apprête à se poser. Sur la deuxième ligne, le premier pied amorce son mouvement tandis que le deuxième est à l'arrêt. Sur la troisième ligne, le pied en mouvement atteint sa vitesse maximum (environ 4 m/s) puis amorce sa décélération (quatrième ligne) pour revenir à une vitesse nulle (cinquième ligne). La suite suivrait le même motif dans la mesure où le mouvement des deux pieds est déphasé d'un demi cycle.

- **La course** ($V_0 = 3,55$ m/s) :
  Lors de la première acquisition, le premier pied est à l'arrêt pendant que le deuxième est en train d'atteindre sa vitesse maximale (environ 8 m/s). Lorsque le deuxième pied amorce sa décélération, le premier décolle du sol et sa vitesse commence à croître.
  Contrairement à la marche, il n'y a pas de phase de double appui. A aucun moment, les deux pieds sont à Doppler nul en même temps. Il y a donc une phase de suspension qui apparaît à la troisième ligne lorsque les deux pieds ont un Doppler positif.

Pour la marche comme pour la course, l'accélération et la décélération du pied est synonyme de défocalisation sur l'image formée. Plus le temps d'intégration augmente, plus le phénomène est non stationnaire pendant le temps d'observation. Il s'agit ici de trouver un compromis entre la résolution du Doppler et la précision de la localisation. La défocalisation peut également être un élément de reconnaissance. Le mouvement du pied est souvent associé à une dérive en fréquence, ce qui provoque une traînée sur l'image résultante.

Analyse fine du mouvement des mains :
Les figures 6.8 (marche) et 6.17 (course) mettent en évidence le mouvement des mains par rapport à celui du corps. Celles-ci se balancent de manière régulière autour du torse, conformément aux courbes étudiées dans la partie 6.2.1. L'amplitude des mouvements étant moins importante que celle des pieds, il est plus difficile de faire la distinction en vitesse lorsque le temps d'intégration est faible ($\Delta T = 0,05$ s). De plus la variation de la vitesse est plus faible que celle des pieds. Il y a donc moins de défocalisation par rapport aux pieds lorsqu'on augmente le temps d'intégration $\Delta T = 0,1$ s.

Association des pieds et des mains :
Les figures 6.9 (marche) et 6.18 (course) mettent en évidence le mouvement des pieds et des mains par rapport à celui du corps. Le signal simulé est la combinaison des signaux réfléchis par l'ensemble des points. Cela produit un effet micro-Doppler dont la position et l'étalement varie au cours du temps. On constate qu'il est plus facile de distinguer les réflecteurs lorsque $\Delta T = 0,1$ s, même s'il est difficile d'estimer la vitesse du pied lorsque celui-ci est en pleine accélération.

Analyse en distance :
L'analyse en distance est également intéressante puisque la résolution est plus petite que l'amplitude des mouvements. Cela permet ainsi d'apprécier la progression en distance de chacun des points. La distance parcourue par le torse est linéaire alors que les pieds progressent seulement durant leur balancement.
Avant de quitter le sol, le premier pied se situe en retrait du torse pour finir devant celui-ci à la fin de son mouvement. Les 3 points sont situés à la même distance du radar au moment où le pied atteint sa vitesse maximum, c'est-à-dire lorsque que les deux pieds se croisent.
Sur la première et la cinquième image, il possible de mesurer la longueur d'un pas, à l'erreur d'une case distance près. On mesure $L_p = 60$ cm pour la marche, $L_p = 130$ cm pour la course ce qui correspond à la réalité.

Remarques sur le temps d'intégration :
Plus le temps d'intégration diminue, plus le pouvoir de résolution en Doppler diminue. Cela pose deux problèmes majeurs. Le premier est dû à la diminution du nombre de cellules de résolution. Si celui est trop faible, la discrimination des réflecteurs dans la dimension Doppler est plus difficile. L'observation perd alors tout son intérêt étant donné l'impossibilité de distinguer des phénomènes à des vitesses différentes. Le deuxième problème provient de la largeur de la cellule de résolution. Plus celle-ci augmente, moins l'estimation de la vitesse du phénomène est précise.

Plus le temps d'intégration augmente, plus le pouvoir de résolution augmente. Par contre cela se peut traduire par une défocalisation de l'image en distance comme en Doppler, notamment lorsque le phénomène est rapide. Cela se traduit par une traînée laissée par le réflecteur considéré comme non stationnaire. Le meilleur exemple est celui du pied dont la variation en vitesse peut être brutale. Durant sa phase de balancement, nous avons montré qu'il varie de 0 à $4,2$ m/s en $0,3$ s pour la marche et de de 0 à 8 m/s en $0,3$ s pour la course.

Influence de l'angle de visée :
Nous avons vu la caractéristique en distance et en Doppler de cinq points représentatifs du corps humain dans une configuration assez simple où le radar vise dans la direction de déplacement du piéton. Nous avons également vu comment le Doppler des différents points varie en fonction de l'angle de visée (6.2.1). Cette partie permet d'évaluer l'évolution de la vitesse radiale et de la distance de ces cinq réflecteurs, en faisant varier l'azimut (θ) et l'élévation (ϕ) de la direction de visée du radar.

Dans un premier temps nous avons fait varier θ en conservant $\phi = 0^{\circ}$, autrement dit, le radar

reste à la hauteur du piéton.
Nous remarquons logiquement que plus θ augmente, plus l'étendue des vitesses radiales diminue. Lorsque $\theta = 45^\circ$ (Fig 6.10 pour la marche, Fig 6.19 pour la course), la vitesse s'étend 0 à $2,7$ m/s pour la marche, de 0 à $5,6$ m/s pour la course, ce qui correspond bien à une pondération de $\cos\theta$ par rapport à la vue de face.
Lorsque $\theta = 90^\circ$ (Fig 6.11 pour la marche, Fig 6.20 pour la course), la vitesse radiale des réflecteurs est presque nulle puisque la direction du vecteur vitesse est perpendiculaire à l'axe de visée. Néanmoins, il existe toujours un léger Doppler, alternativement positif et négatif, qui provient du mouvement des mains. Ce dernier ne se fait pas complètement dans l'axe du mouvement car les bras ont tendance à rentrer vers l'intérieur. Il existe donc une composante du vecteur vitesse des mains qui n'est pas perpendiculaire à la direction de visée du radar, ce qui induit du Doppler non nul.

Dans un deuxième temps nous avons fait varier ϕ en conservant $\theta = 0^\circ$, autrement dit, le radar reste dans l'axe du déplacement et la hauteur du radar varie.
Plus ϕ augmente, plus le mouvement vertical des différentes parties du corps prend de l'importance. C'est d'ailleurs dans ce cas que certaines parties du corps peuvent créer du Doppler négatif (opposé au Doppler moyen du mouvement de la cible). Le mouvement des mains, tout particulièrement, a une composante verticale importante. Lorsqu'elles montent, le Doppler est positif ; lorsqu'elles descendent, il est négatif. Le mouvement vertical du torse est également beaucoup plus visible lorsque la hauteur du radar augmente. Le Doppler lié à son mouvement varie autour du Doppler moyen.
Les figures 6.15 pour la marche et 6.24 pour la course représentent la cas extrême puisque le radar est situé au dessus du piéton. Dans ce cas, les composantes du Doppler, liés aux mouvements verticaux de la cible, s'étalent autour du Doppler nul.

Dans les autres cas de figure (Fig 6.13, 6.14 pour la marche, Fig 6.22, 6.23 pour la course), nous avons fait varier en même temps θ et ϕ afin de combiner les effets horizontaux, latéraux et verticaux lors de la formation d'une image radar.

6.2.2.2 Analyse sur un temps « long »

Tandis que l'analyse précédente a fourni des informations sur la distance et le Doppler de l'ensemble des réflecteurs de la cible, l'analyse qui suit permet d'étudier l'évolution de la vitesse sur un temps plus long (équivalent à au moins 3 ou 4 cycles de déplacement) afin de calculer la cadence des bras et des jambes.

Le spectrogramme :
L'objectif consiste à analyser la variation du spectre Doppler au cours du temps afin d'extraire les caractéristiques du déplacement. La première étape est la construction du spectrogramme, préconisée par l'article de Geisheimer [Geish-01, Geish-02]. Elle permet de visualiser la périodicité du phénomène. Le spectrogramme qui représente la variation du Doppler au cours du temps est

formé à partir de transformées temps-fréquence (*Short Time Fourier Transform*).

Les images ont été formées à partir des données simulées, en prenant les 5 points décrits précédemment (torse, pieds et mains). Le spectrogramme a été calculé en prenant une succession de FFT avec des fenêtres de durée $0,2$ s pour la marche, $0,1$ s pour la course et un recouvrement de 90% entre deux FFT.
Les spectrogrammes de la marche (Fig 6.25) et de la course (Fig 6.26) ont été calculés pour plusieurs angles de visée. La fréquence Doppler (ou la vitesse) est représentée en ordonnée et le temps en abscisse.

Les spectrogrammes ont la même apparence que les courbes théoriques des vitesses radiales obtenues dans la partie 6.2.1. Plus l'azimut θ augmente, plus le Doppler diminue. Plus l'élévation ϕ augmente, plus le Doppler lié aux déplacement verticaux augmente.

Ce processus permet ainsi de séparer les vitesses des différentes parties du corps.
Prenons le cas où la direction de visée du radar et le déplacement du piéton sont dans le même axe ($\theta = 0^\circ$ et $\phi = 0^\circ$). Alors que le torse garde une vitesse quasiment constante lors du déplacement, les pieds et les mains ont des vitesses variables. Pour la marche, cela confirme qu'un pied reste immobile (vitesse nulle) pendant que l'autre effectue son mouvement. Pour la course, il y a un temps de suspension où les deux pieds sont en mouvement.
Le spectrogramme varie selon l'allure du piéton et la direction d'observation. Il peut ainsi constituer la signature Doppler d'une personne.

Le périodogramme :
La deuxième étape est la construction du périodogramme, inspirée des travaux d'Otero [Otero-05]. Puisque le mouvement des bras et des jambes est périodique, l'application de la transformée de Fourier permet d'extraire des renseignements sur l'allure du piéton telle que la fréquence de la cadence. Le périodogramme est constitué en appliquant pour chaque case Doppler une FFT sur la dimension temporelle. Il faut que la durée du spectrogramme comprenne un nombre suffisant de cycles afin que la résolution permette de déterminer la fréquence du cycle.
Sur les périodogrammes fournis, la fréquence Doppler (ou la vitesse) est représentée en ordonnée et la fréquence du cycle en abscisse.

La fréquence fondamentale et les harmoniques des différents composants de la personne sont représentés en abscisse, leur vitesse correspondante en ordonnée. Cela permet d'accéder directement à la fréquence de balancement des bras et des jambes. Pour la marche, on observe 2 balancements par seconde, ce qui correspond à une cadence de 2 Hz. Pour la course, deux balancement durent $0,75$ s, ce qui correspond à une cadence de 3 Hz. Les pieds et les mains ont la même période de balancement puisque les bras servent à contrebalancer les jambes.

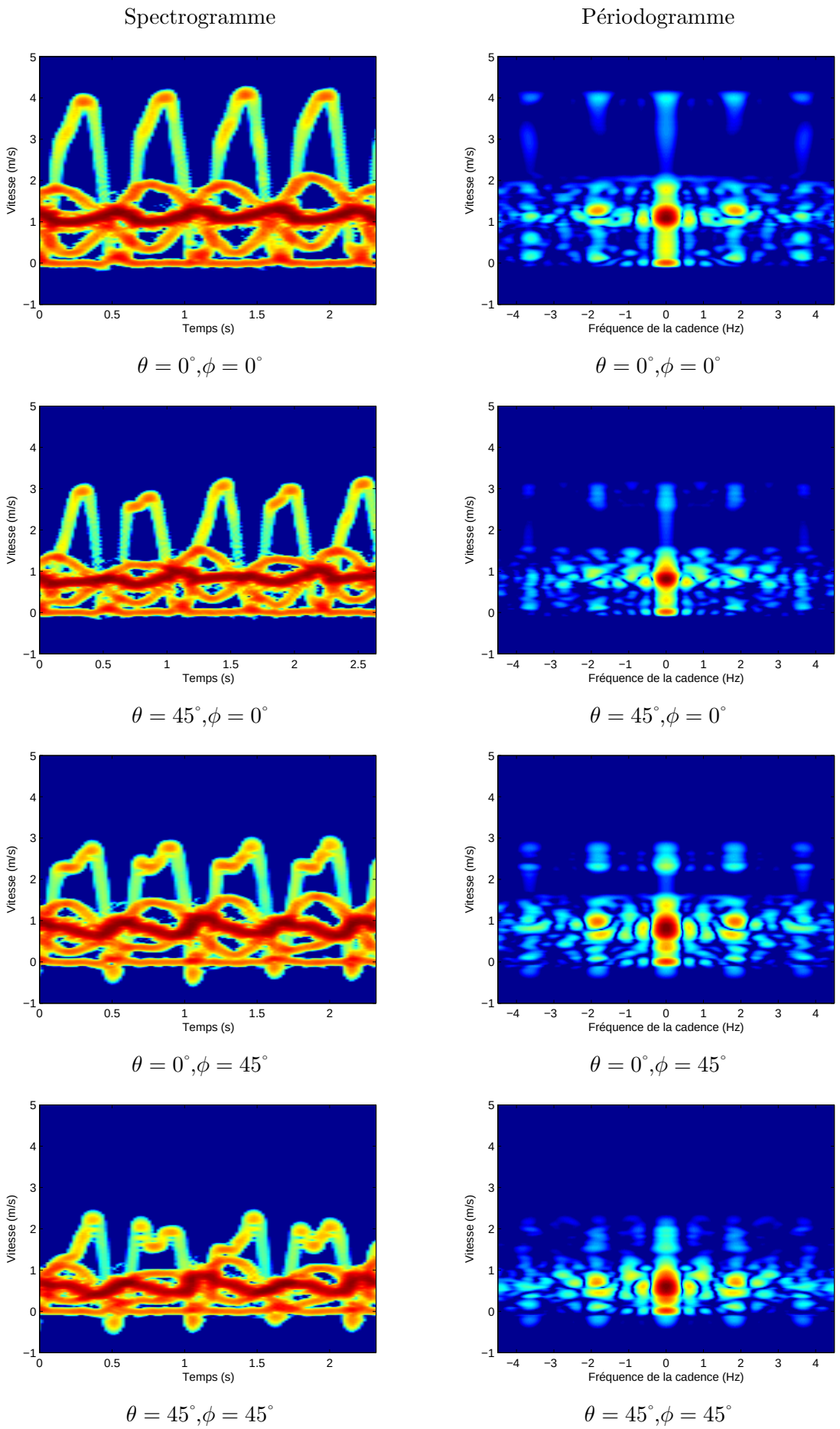


FIGURE 6.25 – Données simulées : analyse temps long de la marche

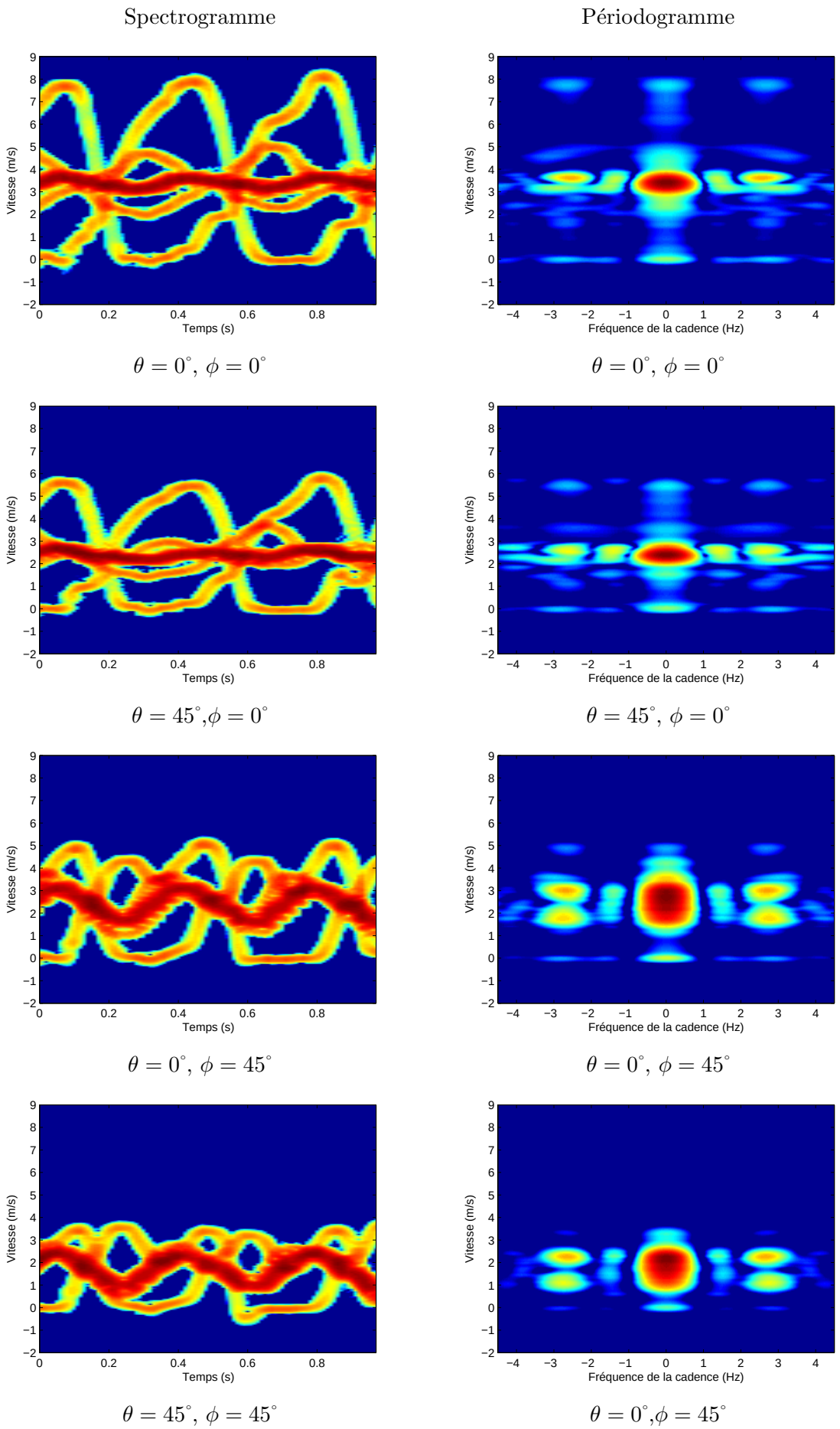


FIGURE 6.26 – Données simulées : analyse temps long de la course

6.2.3 Conclusions sur les simulations

Les simulations basées sur un modèle de mouvement de piéton ont permis d'étudier indépendamment les contributions des différentes parties du corps.
Nous avons vu que la signature distance-Doppler des points étudiés varie selon la position du radar par rapport au déplacement du piéton, l'allure et l'instant de l'acquisition.
En choisissant une résolution en Doppler adaptée, il est possible de distinguer les différentes parties du corps. Plus le temps d'intégration augmente, plus le pouvoir de résolution augmente. Il s'agit donc de trouver un compromis entre résolution du Doppler et la focalisation des réflecteurs.

Selon l'orientation du vecteur de visée du radar par rapport au piéton, les différentes composantes du vecteur vitesse vont induire du Doppler. Lorsque le piéton est vu de face ($\theta = 0^\circ$), c'est la composante horizontale de la vitesse (celle de la direction de la trajectoire) qui créée le Doppler. Étant donnée que cette composante est prépondérante, c'est dans cette configuration que l'étendue du spectre est la plus importante. Lorsque le piéton est vu de profil ($\theta = 90^\circ$), c'est la composante latérale de la vitesse qui créée le Doppler. Nous avons vu que les bras a tendance à rentrer vers l'intérieur, ce qui implique une composante latérale du mouvement. Cette dernière étant faible, le Doppler créé n'est pas très important mais justifie l'apparition de fréquences dans le spectre. Lorsque le piéton est vu de haut, c'est la composante verticale de la vitesse qui créée le Doppler. Le mouvement vertical du piéton (torse, mains et pieds) induit alors des fréquences alternativement positives et négatives.

Les simulations d'images, basées sur un modèle de piéton constitué de réflecteurs ponctuels, ont permis de se faire une idée de l'image radar d'un piéton. Évidemment, la réalité est un peu différente car la distribution des points n'est pas ponctuelle mais continue. De plus, tous les points ne sont pas forcément visibles par le radar ou ne réfléchissent pas toujours vers celui-ci. Enfin, la réflectivité n'est pas la même pour toutes les parties du corps et peut varier au cours de l'acquisition.
Les résultats obtenus concordent néanmoins avec les courbes des vitesses radiales obtenues dans la partie 6.2.1, ce qui valide le processus de formation des images radar.
L'étape suivante consiste à valider le modèle en vérifiant que les phénomènes constatés sur les images simulées concordent avec des données réelles. Cela dépend essentiellement de la capacité du radar à détecter des piétons en haute résolution, plus particulièrement les bras et les jambes.

6.3 Analyse des données réelles

6.3.1 Une campagne d'acquisition sur mesure

6.3.1.1 Scénarios des acquisitions

L'objectif est d'étudier l'évolution de la caractéristique distance Doppler d'un ou de plusieurs piétons, selon leur allure et leur orientation par rapport au radar. Afin de décomposer leur

mouvement, nous avons élaboré des scénarios simples.
Les premières mesures ont été effectuées sur une personne à l'arrêt, balançant les bras, en faisant varier la cadence. Ensuite nous avons mesuré le mouvement d'un piéton qui se déplace en ligne droite, suivant une direction indiquée par un marquage au sol (Fig 2.9). Les lignes sont orientées par rapport à l'axe de visée du radar qui se situe approximativement entre les antennes et le centre de la scène. Le piéton peut ainsi se déplacer :

- à 0° c'est à dire dans l'axe de visée du radar ;
- à 45° ;
- à 90° c'est à dire perpendiculairement à l'axe de visée du radar.

Différentes combinaisons ont ainsi été effectuées en faisant varier les paramètres suivants :

- l'allure (marche ou course)
- la vitesse
- la direction suivant θ (0°,45°,90°)
- l'usage ou non des bras

Nous avons ensuite effectué des mesures sur plusieurs personnes.

6.3.1.2 Résolution et ambiguïté en distance et en Doppler de l'image

La résolution et l'ambiguïté en distance et en Doppler sont déterminées par les caractéristiques du signal, les paramètres d'acquisition et de traitement d'image.
L'utilisateur peut faire varier l'échantillonnage Doppler en modifiant le Trigger, au moment de l'enregistrement des données. Plus ce temps est faible, plus l'ambiguïté en Doppler est grande, mais plus la quantité de données est importante.
Le choix du temps d'intégration dépend de la résolution en Doppler souhaitée. Nous avons vu dans le traitement des données simulées (partie 6.2) qu'il fallait faire un compromis entre la résolution Doppler et la localisation en distance et en Doppler. Lorsque le temps d'intégration est grand, cela peut se traduire par une défocalisation en distance et en Doppler pour les réflecteurs non stationnaires tels que le pied. Afin de pouvoir comparer les images entre elles, nous avons choisi de garder le même temps d'intégration pour le calcul de chacune d'elles. D'après les images obtenues à partir de données simulées, le temps d'intégration $\Delta T = 0,1$ s permet d'obtenir une résolution en Doppler satisfaisante pour observer les micro-Doppler liés au mouvement des bras et des jambes. En deçà de cette valeur, il devient difficile de quantifier les micro-mouvements. Au delà, on observe une dérive en fréquence des réflecteurs dont la vitesse varie pendant le temps de l'analyse.

Les paramètres du tableau 6.3 permettent de calculer les dimensions de l'image récapitulées dans le tableau 6.4 :

Bande du signal	$B = 800$ MHz
Pas fréquentiel	$\delta f = 2$ MHz
Nombre de fréquences	$N = 400$
Bande d'émission	[10 - 10,8] GHz
Échantillonnage Doppler	$T_r = 1$ ms
Temps d'intégration	$\Delta T = 0,1$ s

TABLE 6.3 – Paramètres définissant les dimensions de l'image

	Résolution	**Ambiguïté**
Distance	18,5 cm	75 m
Doppler	10 Hz	1 KHz
Vitesse	0,14 m/s	14 m/s.

TABLE 6.4 – Dimensions de l'image

6.3.2 Résultats

Après avoir étudié un modèle et construit les premières images à partir de données modélisées, l'étape suivante a consisté à observer avec un radar le déplacement d'un piéton afin de calculer des images de données réelles.
Cela implique évidemment d'avoir accès à un radar capable de mesurer des cibles de la taille d'un piéton. Du fait de son mouvement, il était probable que le Doppler du corps de l'individu se démarque de la réflexion de l'environnement. Par contre, il était moins sûr que les bras et les jambes, qui contiennent une grande quantité d'informations sur le mouvement de la cible, aient une surface radar suffisamment grande pour être visibles par le dispositif.
L'ONERA a montré qu'HYCAM était un système capable de mesurer la SER de cibles de faible SER [Paich-07] mais aucune mesure n'avait encore été faite sur des piétons en mouvement.

Le premier objectif de l'expérimentation a été de valider la capacité du système HYCAM à effectuer des mesures sur des piétons. Cela s'est fait en formant des images d'un individu, restant sur place et balançant ses bras. Au départ, en raison de l'appréhension de n'obtenir aucun signal, nous avons recouvert les mains de la personne avec de l'aluminium. Finalement, cette précaution s'est révélée inutile. L'aluminium n'a pas influencé la mesure et les résultats se sont révélés probants sans aucun artifice, montrant par la même que les parties mobiles du piéton peuvent être vus par le radar.

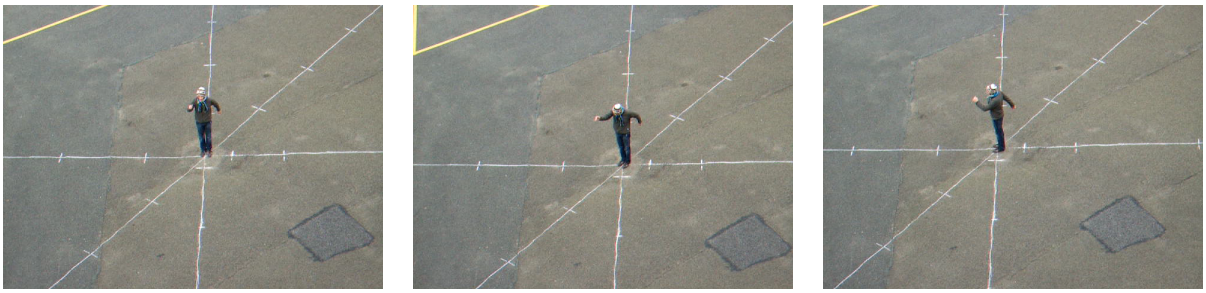
Après avoir vérifié la capacité du système HYCAM à mesurer les mouvements du piéton, l'étape suivante a consisté à constituer une base de données sur des piétons en mouvement. Nous avons donc effectué des mesures en faisant varier l'allure et la direction du piéton par rapport à la ligne de visée ; mais également en incluant ou non le mouvement des bras dans le mouvement.

Ces mesures ont permis d'effectuer les premières comparaisons avec les données simulées afin d'analyser la contribution des différentes parties du corps, en fonction de la position et de l'allure.

Il est évidemment compliqué de présenter les résultats de toutes les expérimentations dans ce manuscrit. Dans une première partie, nous avons analysé le balancement des bras en gardant le reste du corps immobile. Cela a permis d'illustrer la contribution des bras dans une image radar. Nous avons ensuite analysé les deux allures du piéton, la marche et la course, lors d'un déplacement rectiligne.
Pour chaque cas, deux analyses sont faites :

- l'analyse sur le temps long permet de visualiser l'évolution de Doppler au cours du temps, afin d'avoir une vision globale sur le phénomène et plus particulièrement d'effectuer des mesures sur la périodicité du déplacement.
- l'analyse image par image en distance comme en Doppler permet d'obtenir des informations supplémentaires sur la position relative des réflecteurs.

6.3.2.1 Balancement des bras



$\theta = 0^\circ$ $\theta = 45^\circ$ $\theta = 90^\circ$

FIGURE 6.27 – Balancement lent des bras : photo de l'acquisition

Cette expérimentation permet de mettre en évidence le mouvement des bras. Le piéton se situe au centre de la scène, et balance les deux bras, dans une des directions données. Pour les deux premières acquisitions le piéton se place sur la ligne à 45°.

L'analyse temps long permet de mettre en évidence la cadence de balancement et la vitesse des bras, en comparant deux types de balancement.
Dans la première mesure, la période de balancement d'un bras est de $1,5$ s. Le radar voit donc un bras toutes les $0,75$ s, ce qui correspond à $1,33$ bras par seconde.
Dans la deuxième mesure, la période de balancement d'un bras est de 0.9 s, ce qui correspond à $2,22$ bras par seconde.

Le spectrogramme et le périodogramme de la mesure sont représentés sur la figure 6.28 pour la première mesure, sur la figure 6.29 pour la deuxième.

Le spectrogramme permet d'accéder à l'évolution du spectre Doppler (ordonnée) au cours du temps (abscisse). Comme pour un pendule, l'étendue des vitesses absolues pour un bras est

comprise entre zéro, au niveau du centre de rotation, et la vitesse maximale, au niveau de la main. Puisque le radar mesure la vitesse radiale, l'étendue des vitesses varie au cours du temps selon l'orientation du vecteur vitesse de chaque réflecteur par rapport la ligne de visée du radar. Ainsi, le bras allant alternativement en avant puis en arrière, la vitesse mesurée des réflecteurs est tantôt positive, tantôt négative. La vitesse est nulle lorsque le bras est à son apogée et atteint son maximum lorsque le bras est le long du corps.
Dans le premier exemple (Fig 6.28), le bout du bras atteint une vitesse d'environ 3 m/s. Dans le deuxième exemple (Fig 6.29), la vitesse n'est pas la même pour les deux bras (4 m/s pour l'un, plus de 5 m/s pour l'autre), ce qui montre que le mouvement n'est pas toujours exactement symétrique entre les deux cotés du corps.

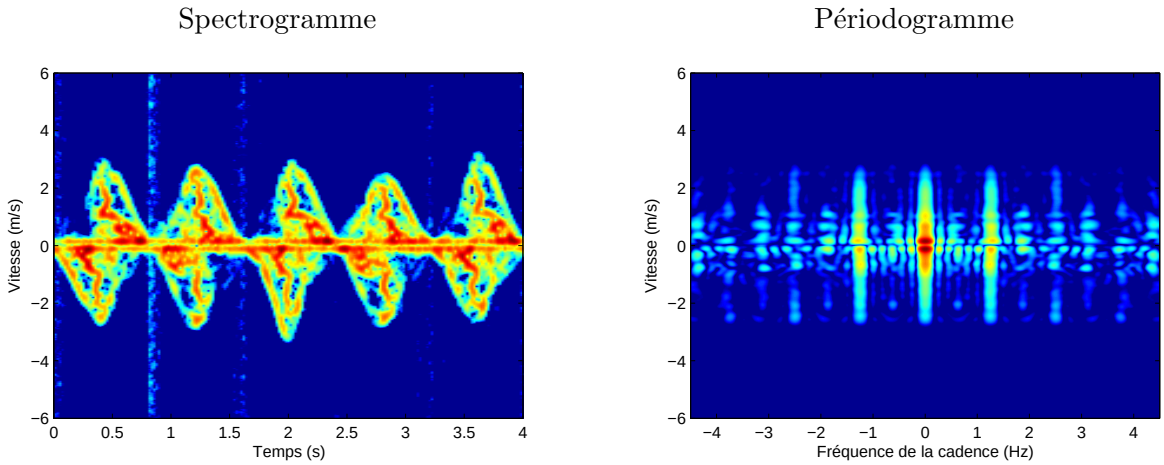


FIGURE 6.28 – Balancement lent des bras ($\theta = 45^\circ$), période de $1,5$ s : analyse temps long (données réelles)

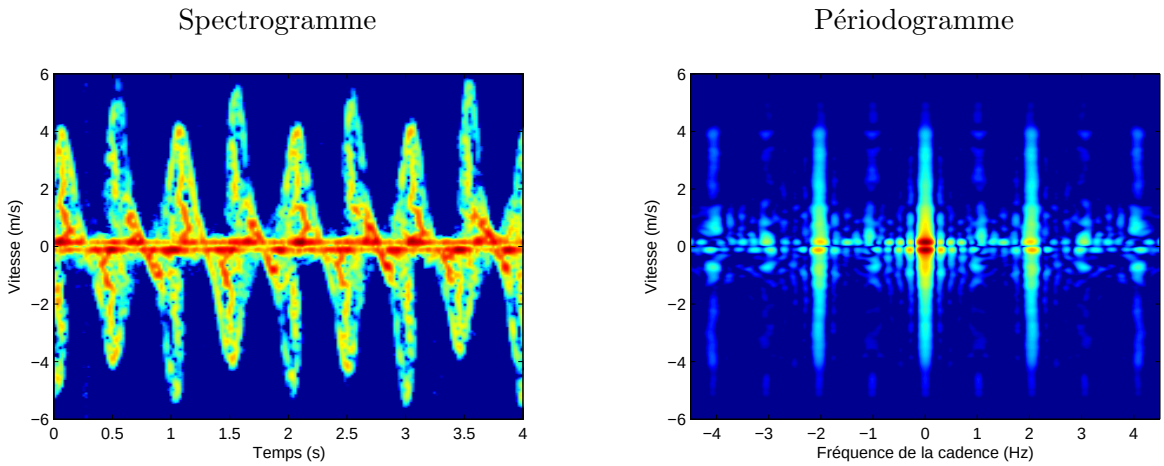


FIGURE 6.29 – Balancement rapide des bras ($\theta = 45^\circ$), période de $0,9$ s : analyse temps long (données réelles)

Le périodogramme permet de mettre en évidence la périodicité du phénomène. L'échelle verticale reste la même tandis que le domaine temporel est transformé en fréquence. Le fondamental est toujours présent quelque soit la vitesse. Chaque harmonique (correspondent aux

parties mobiles, donc aux bras) est un multiple de la fréquence de balancement du phénomène, l'ensemble des vitesses représente la répartition des vitesses depuis l'épaule jusqu'à l'extrémité du bras.
La cadence relevée est de l'ordre de $1,3$ Hz sur la figure 6.28, 2 Hz sur la figure 6.29, ce qui correspond à la fréquence de battement.

Image distance Doppler :
Nous avons représenté les images distance-vitesse correspondant aux expériences sur les figures 6.30 et 6.31. Sur chaque image, on peut observer, à différents instants de l'acquisition, la répartition des réflecteurs en distance et en vitesse. On peut constater que tous les points ne se situent pas dans la même case distance. L'écart en distance le plus important intervient lorsque les deux bras sont écartés au maximum c'est à dire lorsque leur vitesse est nulle. Lorsque les deux bras sont le long du corps, leur vitesse est maximale et ils sont dans la même case distance.

L'orientation du piéton à 45° (Fig 6.30) est un bon compromis puisqu'elle permet de visualiser le Doppler des différents points du piéton. En effet, lorsque le piéton est situé dans l'axe de visée du radar, l'étendue Doppler est certes la plus importante, mais la section du piéton est plus faible que lorsqu'il est vu de coté. Les points, situés derrière le corps, plus particulièrement, risquent d'être masqués.

Les acquisitions 3 et 4 permettent de mettre en évidence le balancement des bras lors que le piéton se situe dans l'axe de visée du radar (sur la ligne 0°) et perpendiculaire à l'axe (sur la ligne 90°). Les images radar sont représentés sur la figure 6.31. Dans les deux cas, la cadence mesurée lors de l'acquisition est de $1,50$ bras par seconde. La réflectivité est moins importante lorsque le piéton se situe dans l'axe du radar. Lorsque le piéton est perpendiculaire à l'axe de visée, l'étendue du Doppler est plus faible. Elle est liée d'une part au mouvement vertical des bras qui induit du Doppler ; d'autre part au fait que le mouvement du piéton n'est pas exactement perpendiculaire à l'axe de visée.

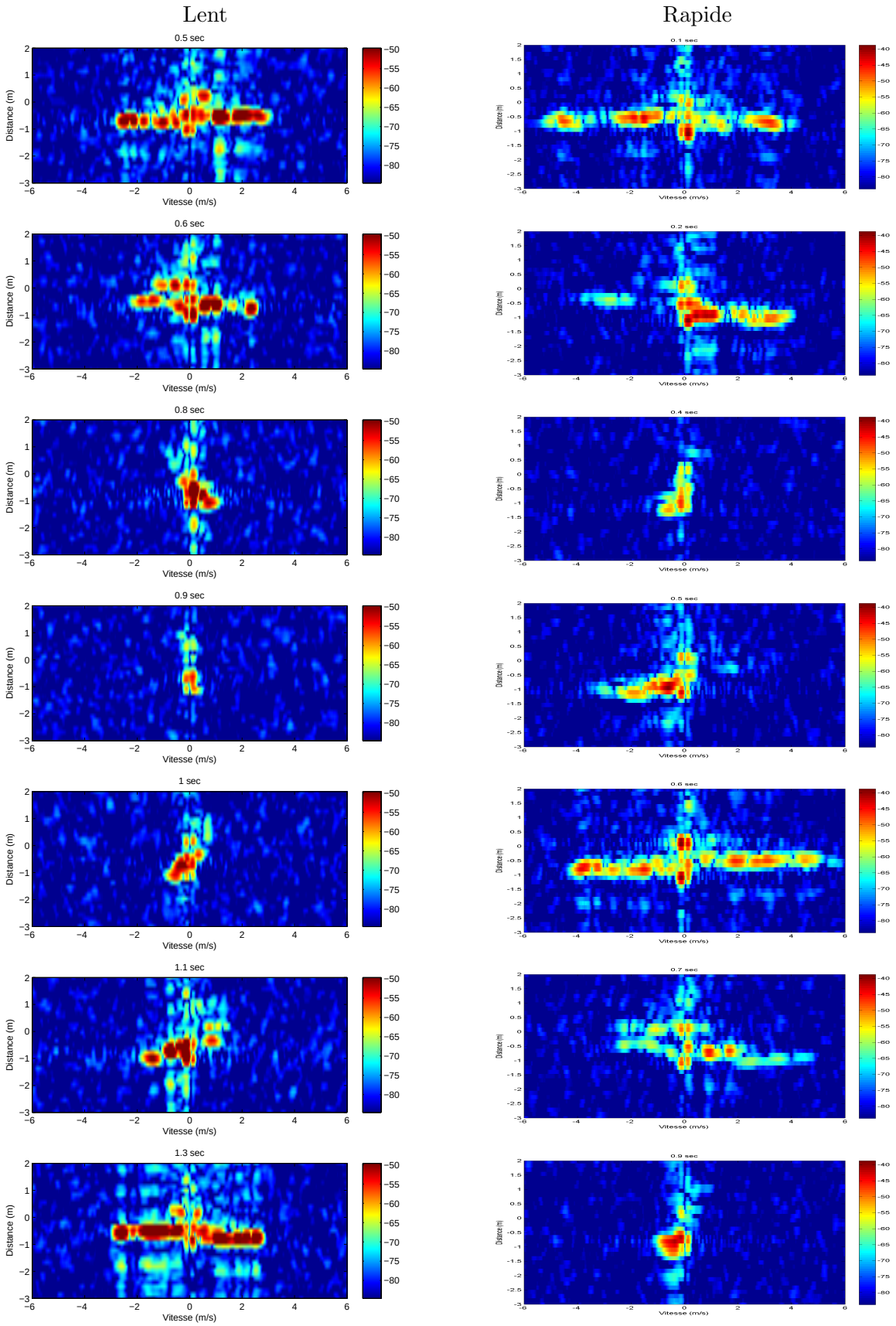


FIGURE 6.30 – Balancement des bras $\theta = 45^{\circ}$, cadence lente (gauche) et rapide (droite)

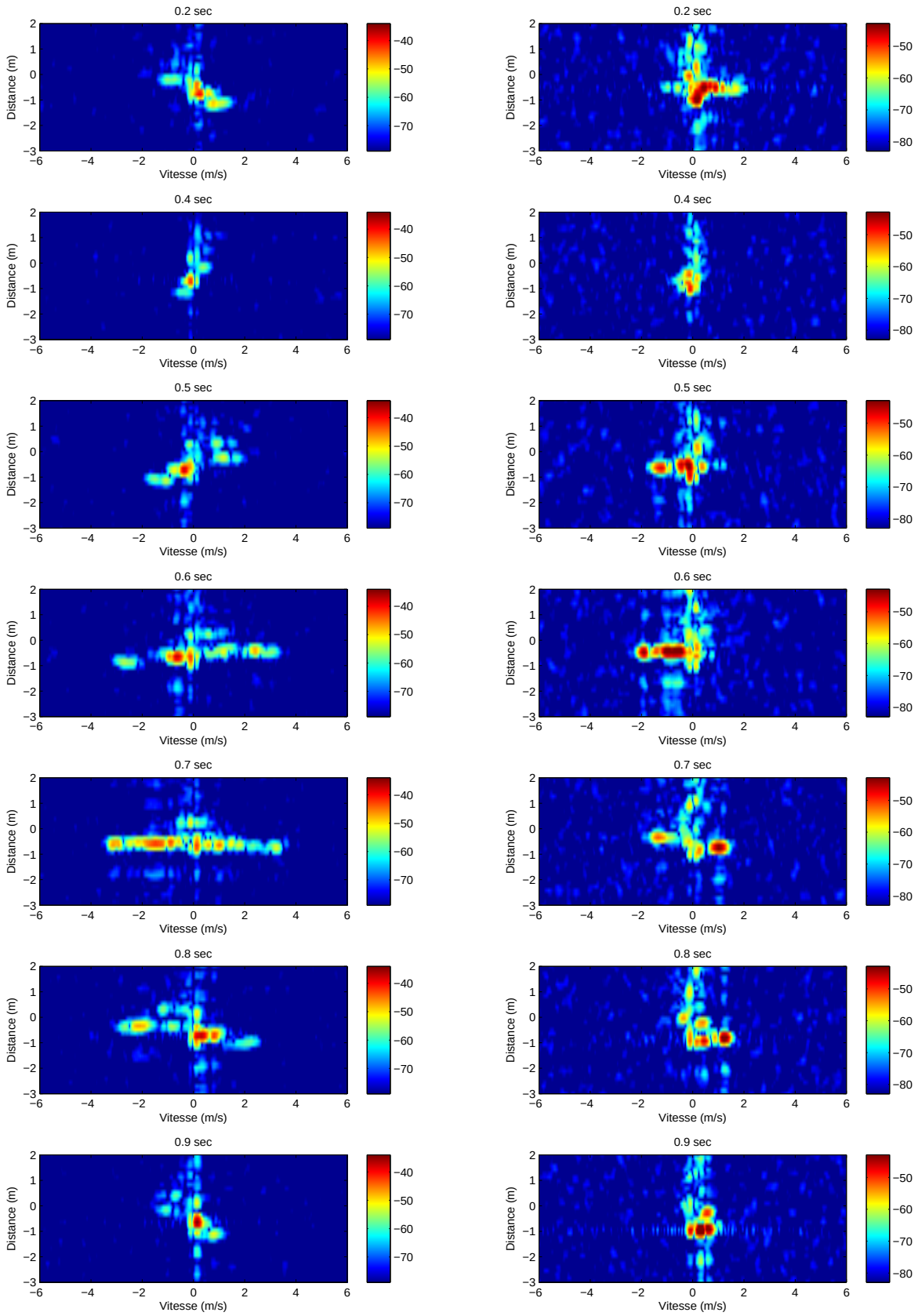


FIGURE 6.31 – Balancement des bras cadence lente $\theta = 0^{\circ}$(gauche), $\theta = 90^{\circ}$(droite)

6.3.2.2 Marche

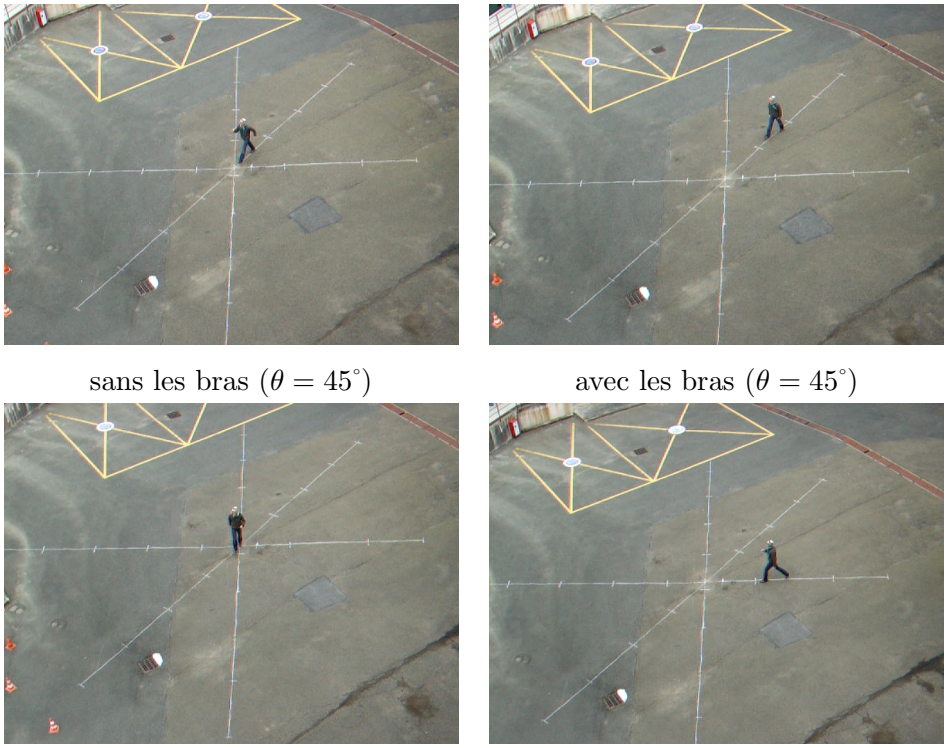


FIGURE 6.32 – Marche rectiligne : photo de l'acquisition

Dans les quatre premières acquisitions, le piéton se déplace sur la ligne « 45° ». L'objectif est de montrer l'influence des bras sur les données réelles.
Dans les acquisitions 5 et 6, le piéton se déplace sur la ligne « 0° » puis sur la ligne « 90° ». L'objectif est de mettre en évidence l'influence de l'angle de visée par rapport à la direction du piéton.
Le tableau 6.5 récapitule les caractéristiques des différentes acquisitions et les figures auxquelles elles se rapportent.

	θ	Vitesse	Rythme	Longueur pas	Aide des bras	Spectrogramme	Distance Doppler
1	45°	1,53 m/s	1,70 pas/s	0,9 m	Non	Fig 6.33	Fig 6.38
2	45°	1,53 m/s	1,77 pas/s	0,86 m	Oui	Fig 6.33	Fig 6.38
3	45°	2,05 m/s	2,1 pas/s	0,97 m	Non	Non	Fig 6.39
4	45°	2,15 m/s	2,1 pas/s	1,02 m	Oui	Non	Fig 6.39
5	0°	1,65 m/s	1,88 pas/s	0,88 m	Oui	Non	Fig 6.40
6	90°	1,78 m/s	1,97 pas/s	0,9 m	Oui	Non	Fig 6.40

TABLE 6.5 – Récapitulatif des expériences sur la marche

Analyse des spectrogrammes :

Spectrogramme Périodogramme

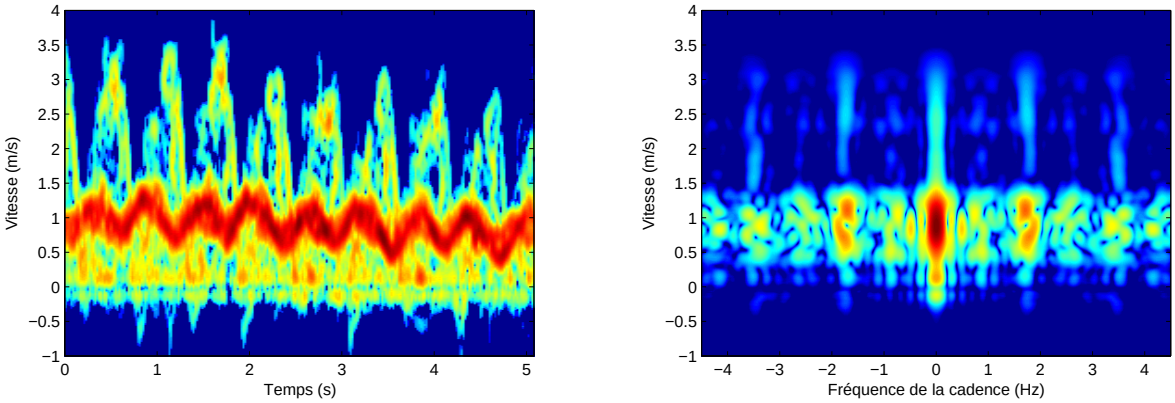


FIGURE 6.33 – Marche sans les bras ($\theta = 45^{\circ}$) : analyse temps long (données réelles)

Spectrogramme Périodogramme

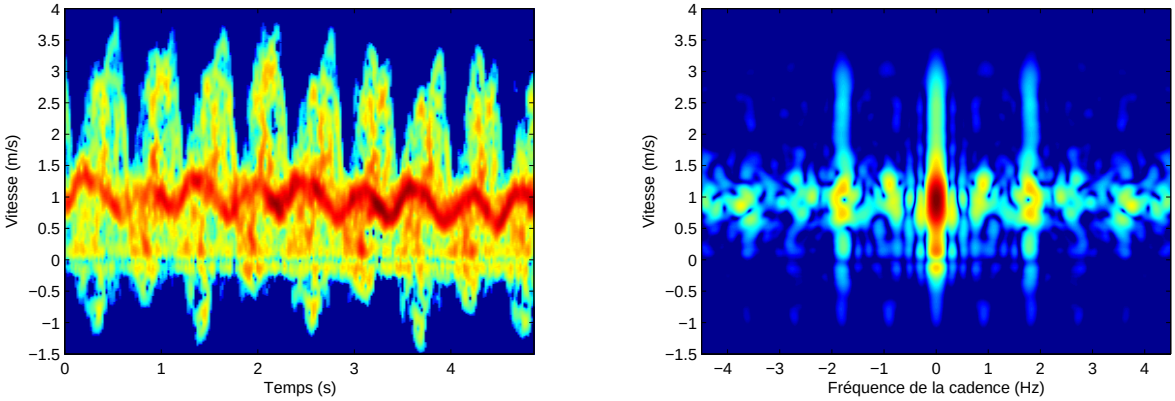


FIGURE 6.34 – Marche avec les bras ($\theta = 45^{\circ}$) : analyse temps long (données réelles)

A partir des spectrogrammes (Fig 6.33 et Fig 6.34), il est possible de mettre en évidence le comportement en Doppler de l'ensemble des parties du corps.
La vitesse du corps oscille autour de sa vitesse moyenne. Cette oscillation est due à la composante verticale de la vitesse qui est visible par la radar puisque celui-ci est en hauteur par rapport au piéton. Si le radar était au même niveau que le piéton, la composante verticale serait perpendiculaire à la ligne de visée donc le Doppler relatif à ce mouvement serait nul.
La principale différence avec le spectrogramme calculé avec les données simulées vient du fait que la distribution des réflecteurs n'est plus ponctuelle mais continue. En effet, nous avons simulé l'effet Doppler induit par les extrémités du corps. Dans la réalité, le Doppler est distribué entre le Doppler du corps et celui de l'extrémité du membre concerné.

Alors que la vitesse de déplacement réelle, mesurée au moment de l'acquisition, est de $V_0 = 1,53$ m/s, la vitesse radiale moyenne correspondant au mouvement du corps, est de $V_{moy} = 1$ m/s. La diminution de la vitesse mesurée est due à l'angle de déplacement par rapport à l'axe

de visée. Le rapport V_{rad}/V_0 est équivalent à $\cos(49^\circ)$, ce qui correspond quasiment à la ligne à 45° sur laquelle se déplace le piéton.

Le périodogramme permet de retrouver la cadence de déplacement $1,74$ Hz (soit $1,74$ pas par seconde) ce qui correspond à la vérité terrain.

La contribution des bras est visible sur le second spectrogramme. Le spectre Doppler devient plus riche en informations. La SER correspondant au mouvement des bras et des jambes augmente, mais il est difficile de distinguer les bras des jambes, puisqu'ils oscillent à la même cadence.
On peut également noter que les mains peuvent avoir un Doppler négatif, du fait de leur mouvement vertical. Le rapport entre la vitesse des pieds et celle du corps V_{max}/V_{moy} est d'environ $3,5$ ce qui correspond aux prévisions.

Analyse des images distance-Doppler :
L'analyse en distance permet de mettre en évidence de manière indépendante chacune des parties du corps. Nous pouvons ainsi mesurer la distance entre deux pas lorsque les deux pieds ont une vitesse nulle. On mesure $d = 60$ cm sur la figure 6.38 et sur la figure 6.39. Étant donnée l'élévation d'environ 45°, la longueur réelle du pas est $d/\cos(45^\circ) = 0,85$ m, ce qui correspond à la longueur de pas réelle. L'imprécision de la mesure est due à la résolution de la case distance.

Analysons les distances relatives des points du corps les unes par rapport aux autres. Pour cela schématisons sur la figure 6.35 la position du piéton par rapport au radar, au moment où les deux pieds touchent le sol.

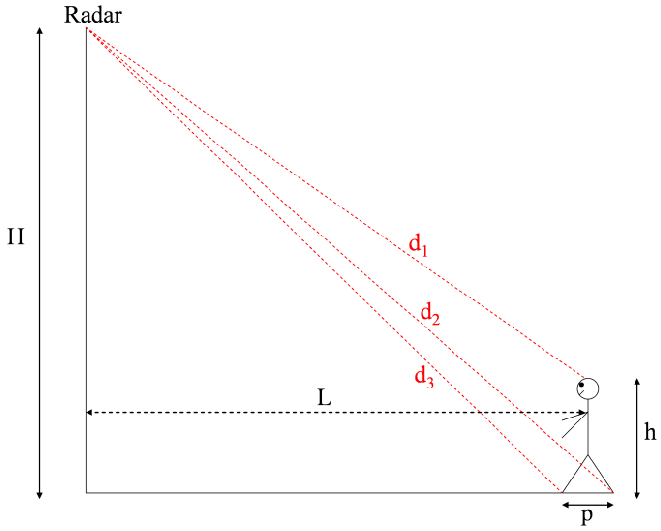


FIGURE 6.35 – Distance des différentes parties du corps par rapport au radar

Soient :
- d_1 la distance de la tête au radar
- d_2 la distance du pied avant au radar

- d_3 la distance du pied arrière au radar
- H la hauteur du radar
- L la distance du corps du piéton jusqu'au mur
- h la hauteur du piéton
- p la longueur d'un pas

Les distances d_1, d_2 et d_3 s'expriment :

$$\begin{cases} d_3 &= \sqrt{L^2 + (H-h)^2} \\ d_2 &= \sqrt{\left(L - \frac{p}{2}\right)^2 + H^2} \\ d_3 &= \sqrt{\left(L + \frac{p}{2}\right)^2 + H^2} \end{cases} \tag{6.5}$$

En prenant $H \simeq 18$ m, $L \simeq 18$ m, $h \simeq 1,8$ m et $p \simeq 0,9$ m, les distances des points au radar sont :

$$\begin{cases} d_1 &= 24{,}2 \text{ m} \\ d_2 &= 25{,}1 \text{ m} \\ d_3 &= 25{,}7 \text{ m} \end{cases} \tag{6.6}$$

La distance entre les deux pieds et de $0,6$ m. La distance entre la tête et le pied avant est de $0,9$ m. La distance entre la tête et le pied arrière est de $1,5$ m, ce qui est conforme à la figure Cela permet de dire que la tête est toujours la plus proche du radar, donc située en bas de l'image. Pendant le mouvement du piéton, la distance du pied arrière diminue. Elle est égale à celle de l'autre pied lorsque sa vitesse est au maximum, c'est à dire lorsque les deux jambes se croisent. Enfin, lorsque sa distance devient inférieure à celle de l'autre pied, sa vitesse décroît pour atteindre zéro.

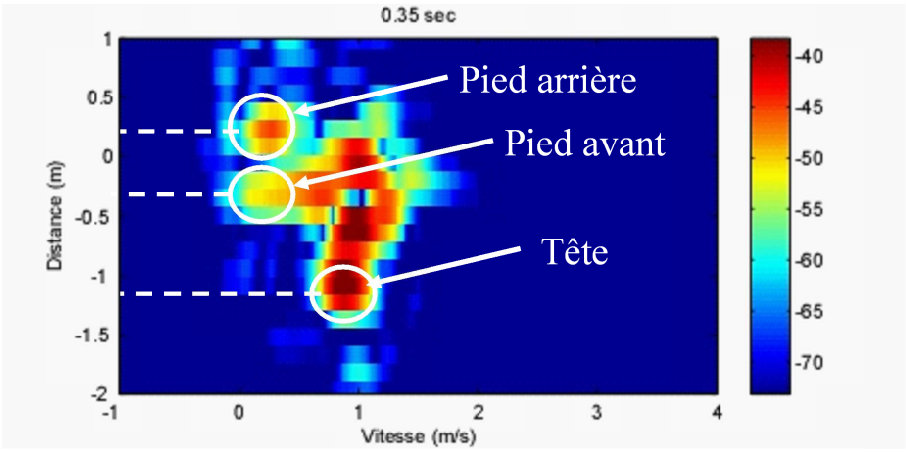


FIGURE 6.36 – Position de la tête et des pieds, extrait de la figure 6.38

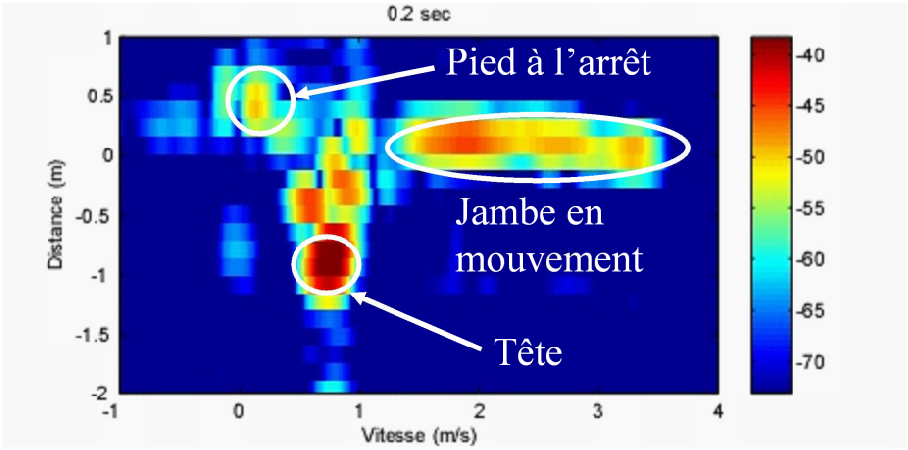


FIGURE 6.37 – Illustration du mouvement de la jambe, extrait de la figure 6.38

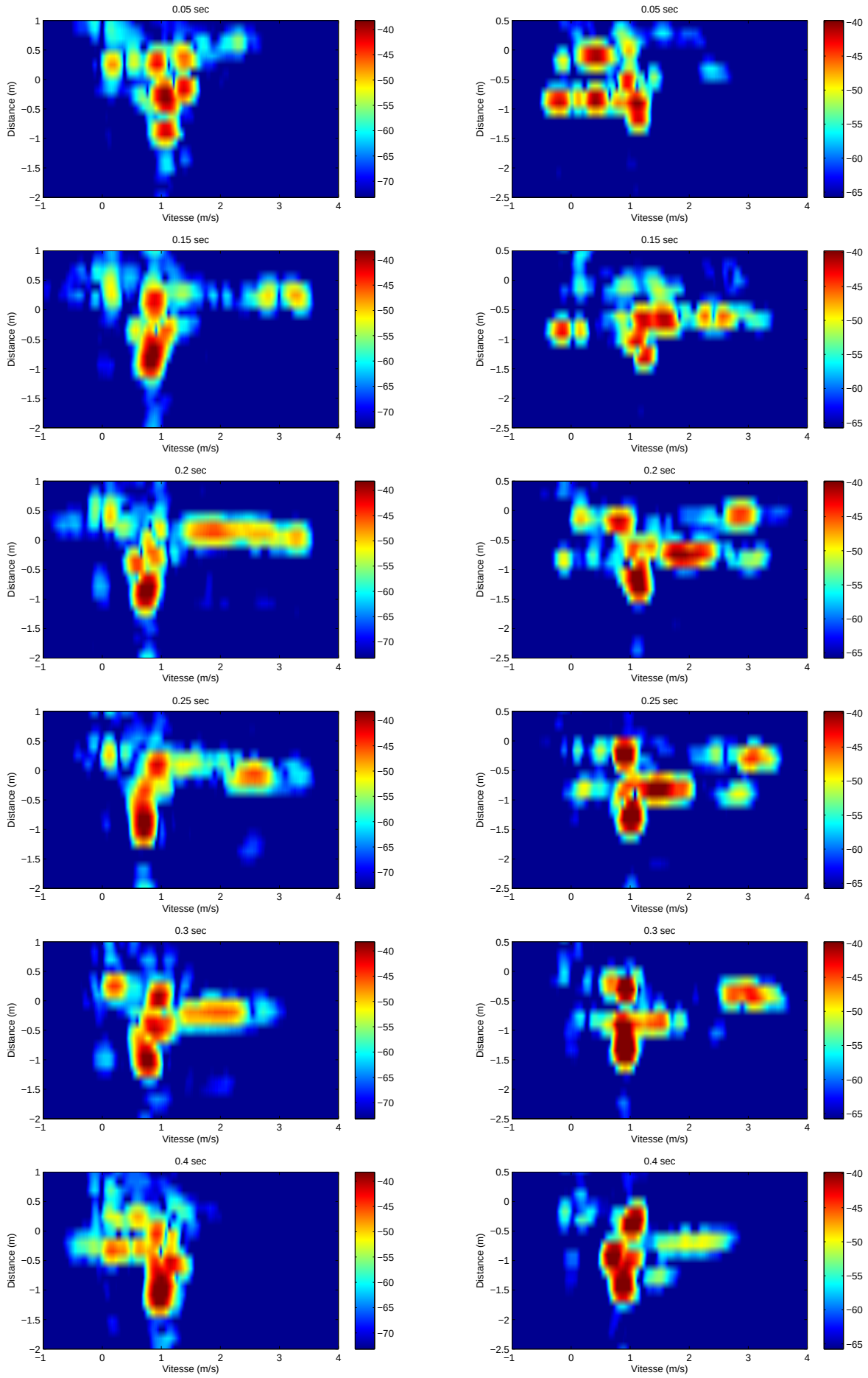


FIGURE 6.38 – Marche à $V_0 = 1,53$ m/s ($\theta = 45^\circ$) : sans les bras (gauche), avec les bras (droite)

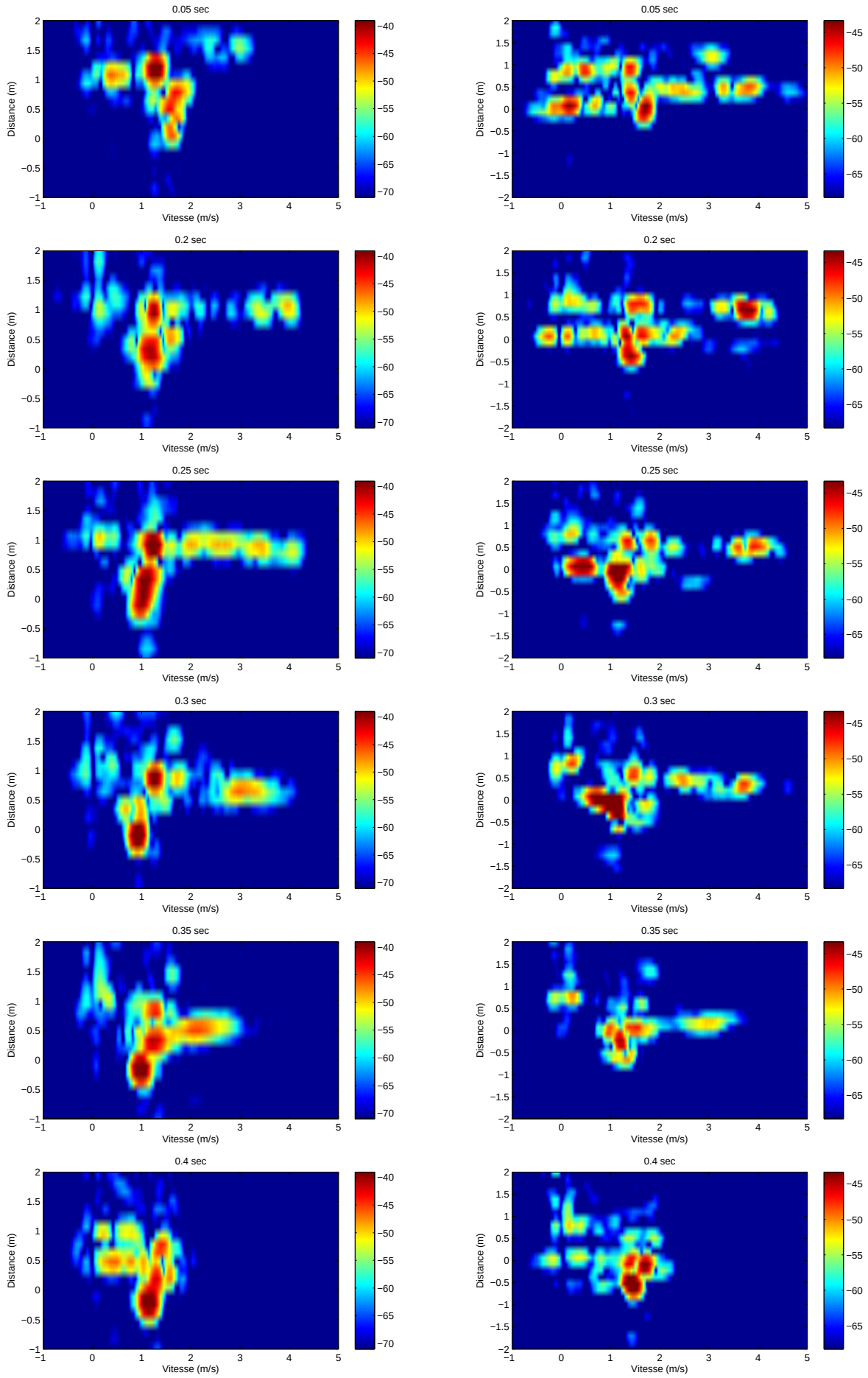


FIGURE 6.39 – Marche à $V_0 = 2,05$ m/s ($\theta = 45^\circ$) : sans les bras (gauche), avec les bras (droite)

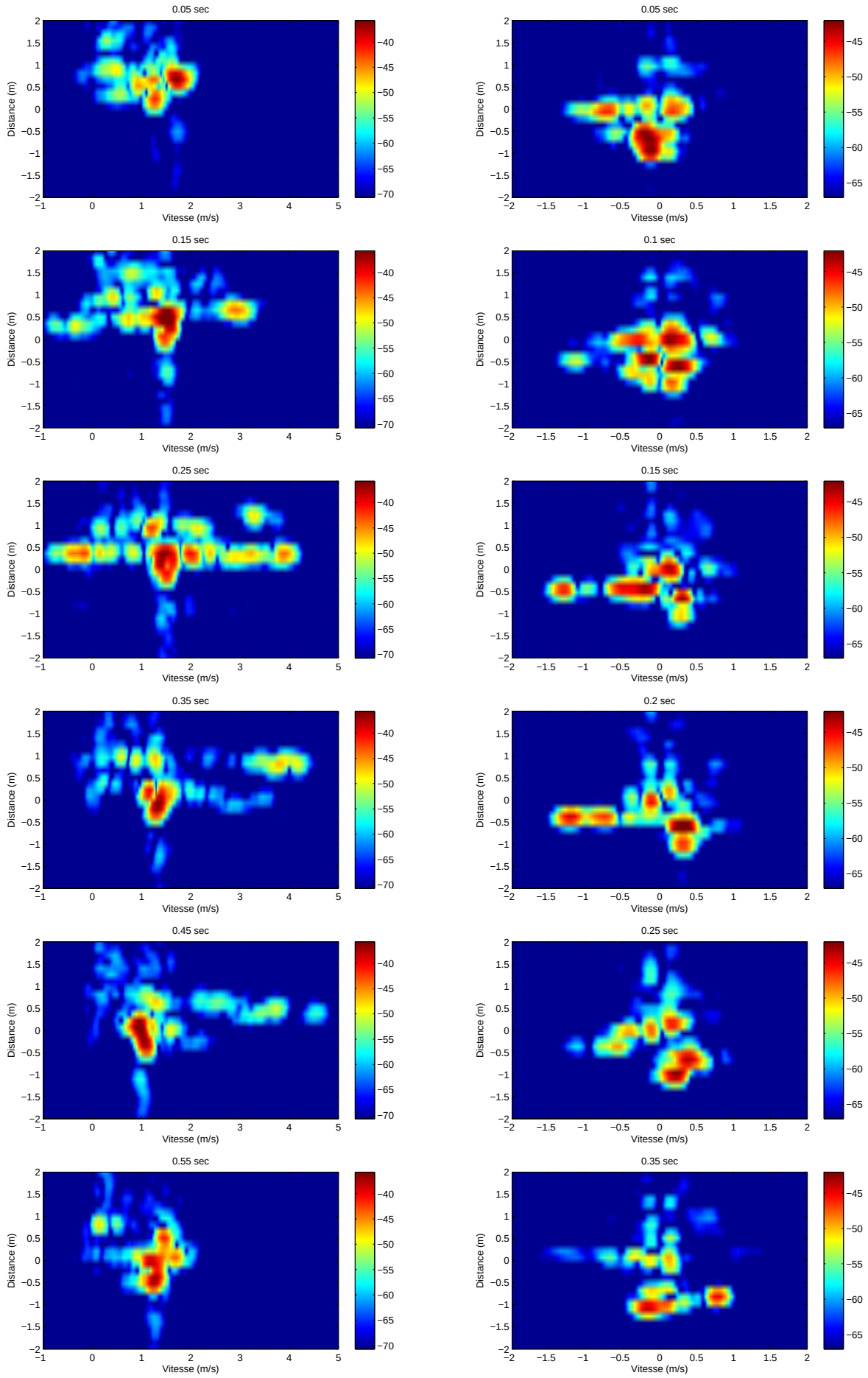


FIGURE 6.40 – Marche avec les bras : $\theta = 0^{\circ}$ (gauche), $\theta = 90^{\circ}$ (droite)

6.3.2.3 Course

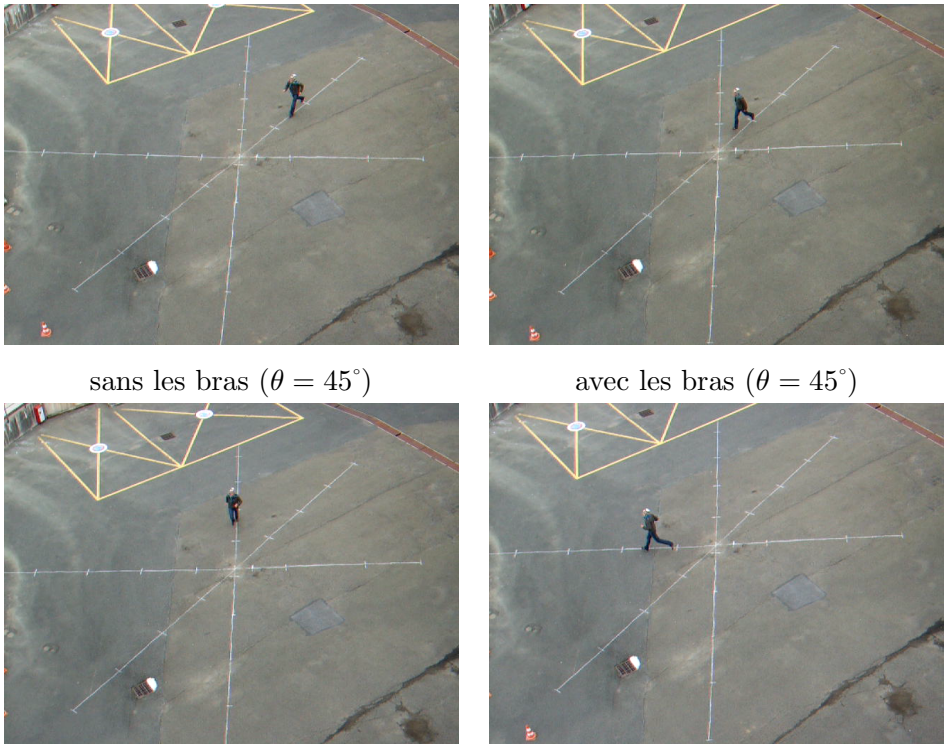


FIGURE 6.41 – Course rectiligne : photo de l'acquisition

Dans les deux premières acquisitions, le piéton se déplace sur la ligne « 45° ». L'objectif est de mettre en évidence l'influence des bras.
Dans les acquisitions 3 et 4, le piéton se déplace sur la ligne « 0° » puis sur la ligne « 90° ». L'objectif est de mettre en évidence l'influence de l'angle de visée par rapport à la direction du piéton.

Le tableau 6.6 récapitule les caractéristiques des différentes acquisitions et les figures auxquelles elles se rapportent.

	θ	Vitesse	Rythme	Longueur pas	Aide des bras	Spectrogramme	Distance Doppler
1	45°	3,25 m/s	2,7 pas/s	1,2 m	Non	Fig 6.42	Fig 6.44
2	45°	3,4 m/s	2,8 pas/s	1,2 m	Oui	Fig 6.43	Fig 6.44
5	0°	4,3 m/s	2,75 pas/s	1,5 m	Oui	Non	Fig 6.45
6	90°	3,7 m/s	2,6 pas/s	1,4 m	Oui	Non	Fig 6.45

TABLE 6.6 – Récapitulatif des expériences sur la course

Analyse des spectrogrammes :

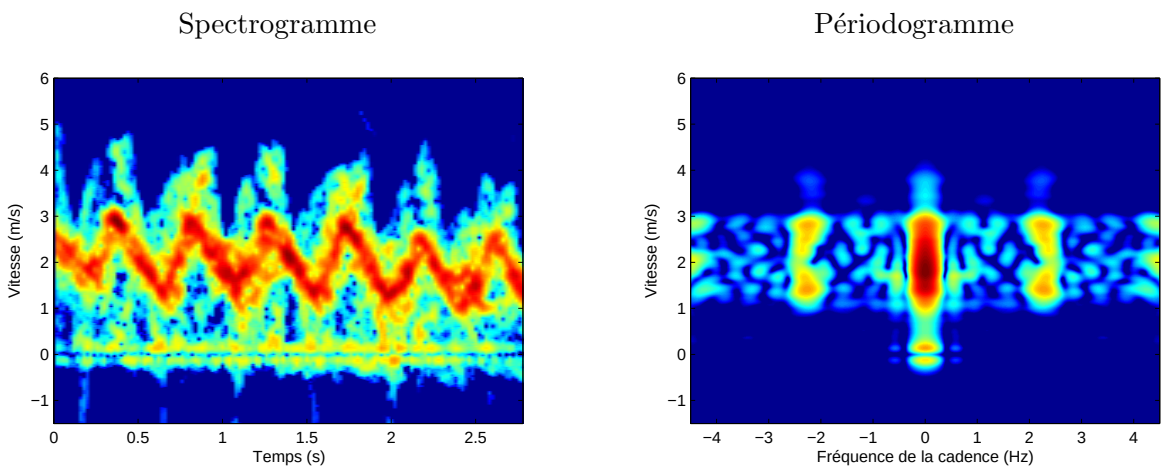


FIGURE 6.42 – Course sans les bras ($\theta = 45^\circ$) : analyse temps long (données réelles)

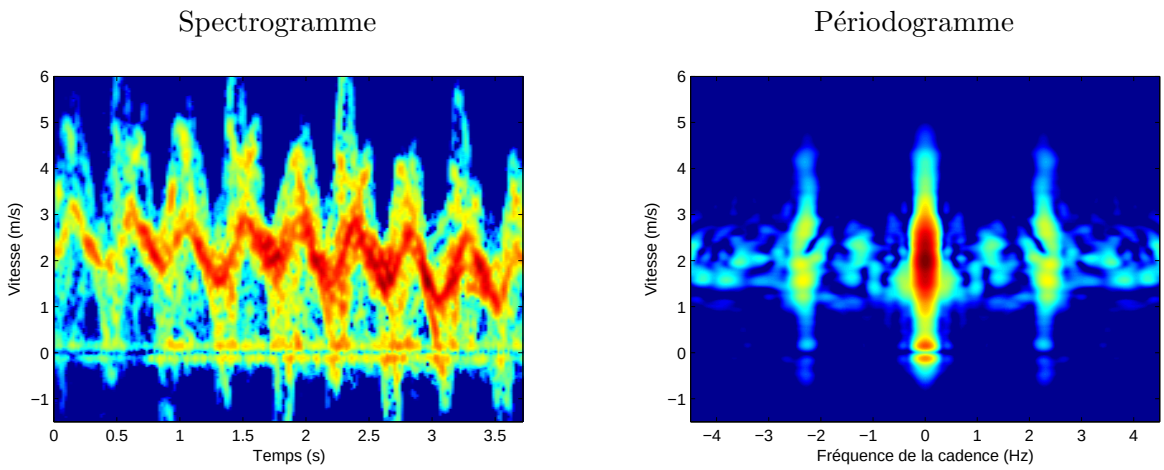


FIGURE 6.43 – Course avec les bras ($\theta = 45^\circ$) : analyse temps long (données réelles)

Nous avons d'abord étudié les spectrogrammes (Fig 6.42 et Fig 6.43) afin de mettre en évidence l'évolution du Doppler de l'ensemble des parties du corps.
Comme pour la marche, la vitesse du corps oscille autour de sa vitesse moyenne, avec une amplitude de près de 2 m/s. Cette variation est due à l'impulsion verticale donnée par le corps pour avancer, plus importante que pour la marche puisque la course est une allure bondissante. Alors que la vitesse de déplacement réelle, mesurée au moment de l'acquisition, est de $V_0 = 3,25$ m/s, la vitesse radiale moyenne se situe autour de $V_{rad} = 2,1$ m/s. La diminution de la vitesse mesurée est due à l'angle de déplacement par rapport à l'axe de visée. Le rapport V_{rad}/V_0 est comme pour la marche est équivalent à $\cos(49^\circ)$, alors que le piéton se déplace sur la ligne à 45°.
Le spectrogramme de la course sans les bras (Fig 6.42) correspond bien à la courbe de la vitesse radiale, tracée sur la figure 6.5 lorsque $\theta = 45^\circ$ et $\phi = 45^\circ$, sans le mouvement des bras.
Le spectrogramme de la figure (Fig 6.43) met en évidence le mouvement des bras. On peut

constater que leur Doppler est souvent plus élevé que celui des jambes, même si leur vitesse absolue est plus faible. Cela tient au fait que la composante verticale du mouvement des mains est plus importante que celle des pieds. Comme le radar est situé en hauteur, il est sensible à ce type de mouvement. D'ailleurs, les mains apparaissent en Doppler négatif lorsqu'elles effectuent un mouvement de haut en bas.
Notons également que le périodogramme permet d'estimer la cadence de déplacement à $2,3$ Hz, au lieu des $2,7$ pas par seconde de la vérité terrain.

Analyse des images distance-Doppler :
Sur les spectrogrammes, il est difficile de distinguer les bras des jambes, puisqu'ils oscillent au même rythme. Il faut donc effectuer une analyse en distance-Doppler qui permet de mettre en évidence de manière indépendante chacune des parties du corps.
Comme pour les images mettant en évidence le mouvement de la marche, les échos liés aux réflexions sur la tête se situent à une distance inférieure de celle des pieds.

Il est plus difficile de mesurer la distance entre deux pas puisque les deux pieds ne se trouvent jamais au sol au même moment. En fait la notion de pas n'est pas la même que pour la marche. Il est possible de mesurer l'écart entre les deux pieds à un instant donné à partir d'une image mais il faut regarder plusieurs images pour pouvoir mesurer la distance entre deux appuis successifs.

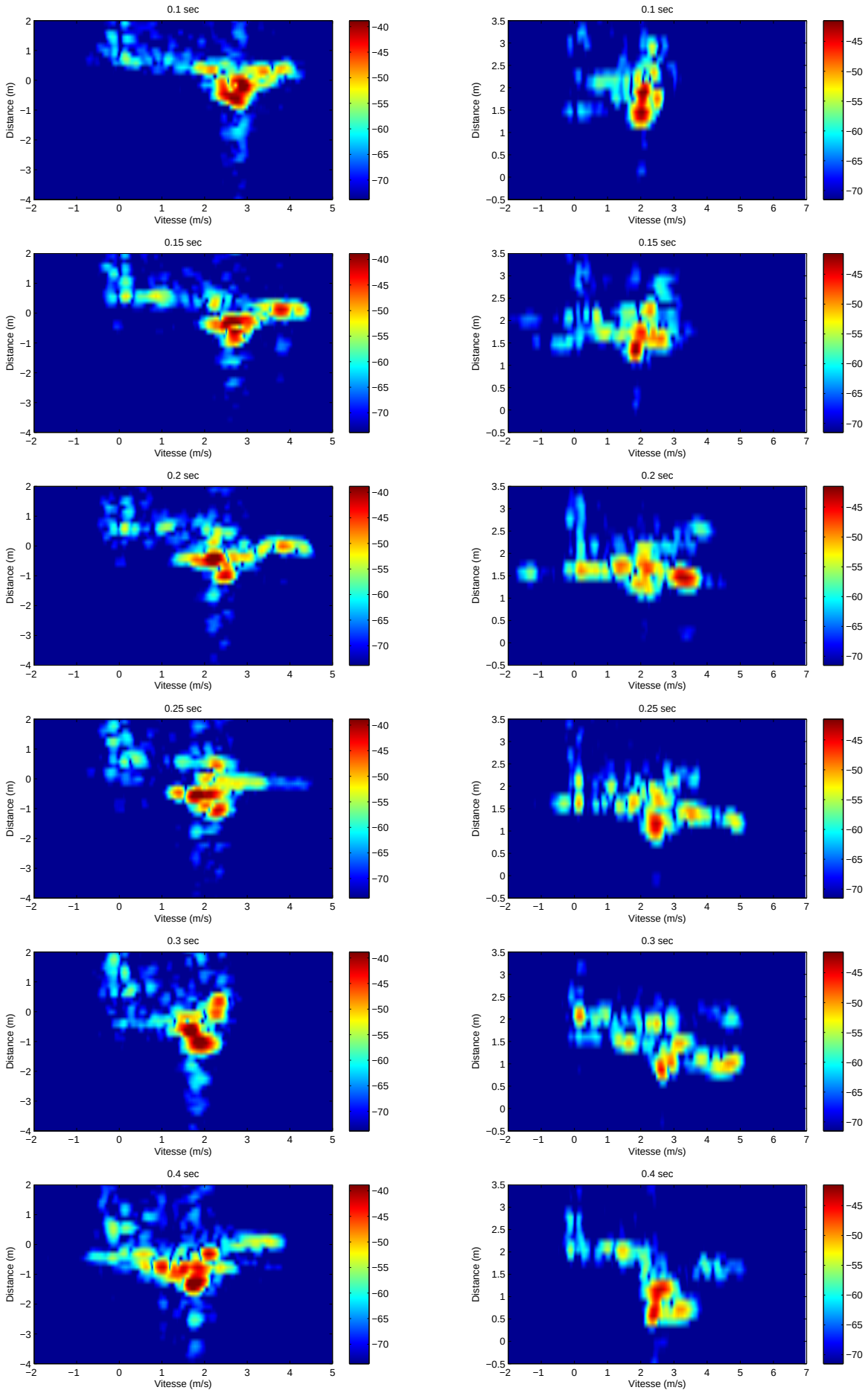


FIGURE 6.44 – Course à $V_0 = 3.3$ m/s ($\theta = 45^\circ$) : sans les bras (gauche), avec les bras (droite)

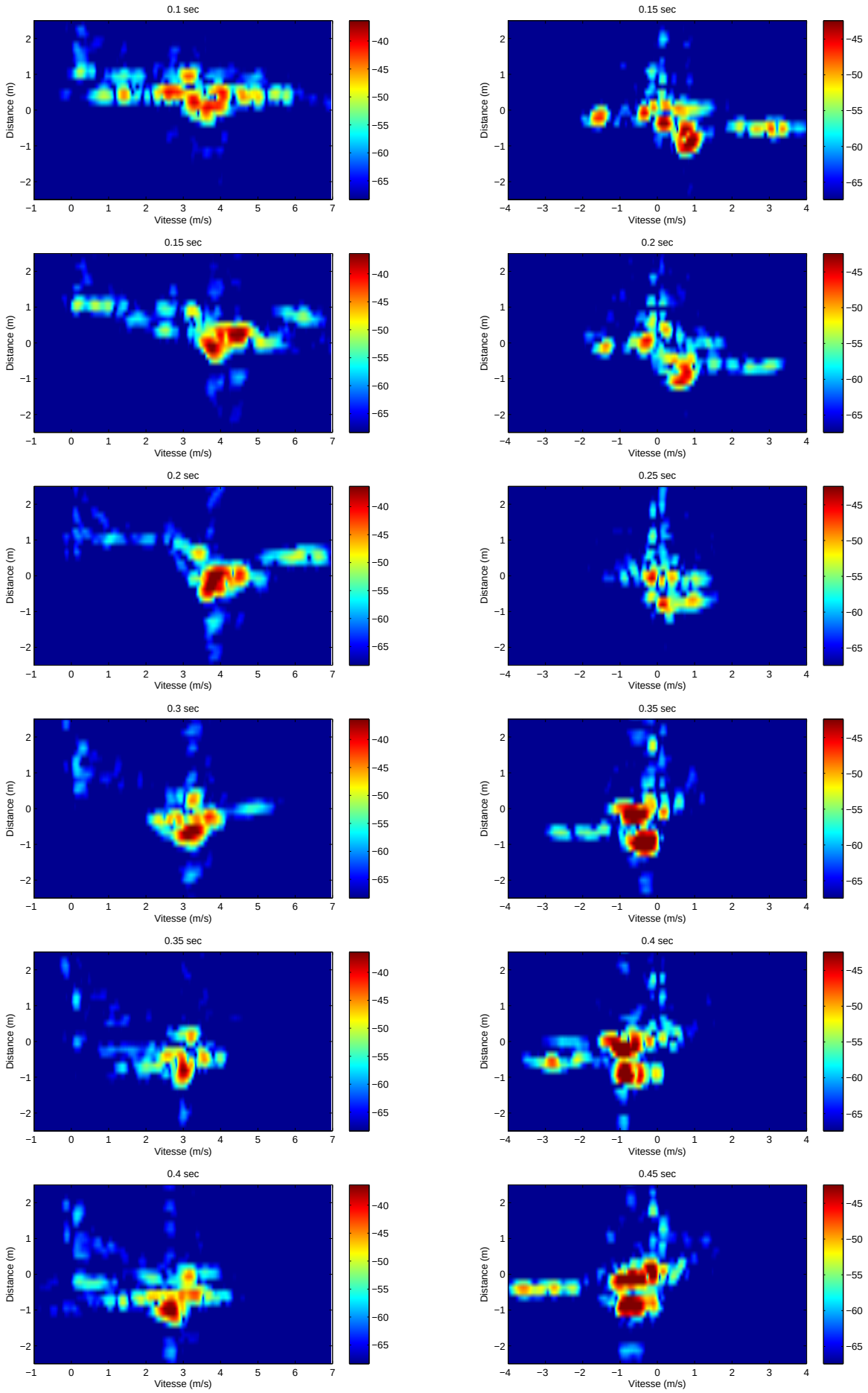


FIGURE 6.45 – Course avec les bras : $\theta = 0^\circ$ (gauche), $\theta = 90^\circ$ (droite)

6.3.2.4 Plusieurs personnes

Les études radar, mettant en évidence le mouvement du piéton, analysent uniquement la variation du Doppler de la cible au cours de temps. Cela permet d'extraire certaines caractéristiques de l'allure sans tenir compte de la distance de la cible. Cette méthode est plus difficile lorsque plusieurs personnes sont dans le champ de visée du radar. En effet, les composantes Doppler se mélangent et il n'est plus possible d'interpréter le signal reçu.

Marche Course

FIGURE 6.46 – Deux personnes en sens inverses $\theta = 45^{\circ}$: photo de l'acquisition

Grâce à la discrimination en distance, il est possible d'étudier plusieurs personnes simultanément.
Les deux acquisitions mettent en scène deux piétons qui se croisent. Comme pour les expériences sur la marche et la course, les individus se déplacent de manière à ce que toutes les parties du corps soient visibles par le radar.
Lors de la première acquisition, ils se croisent en marchant. Lors de la deuxième, ils se croisent en courant (Fig 6.46).

Spectrogramme Périodogramme

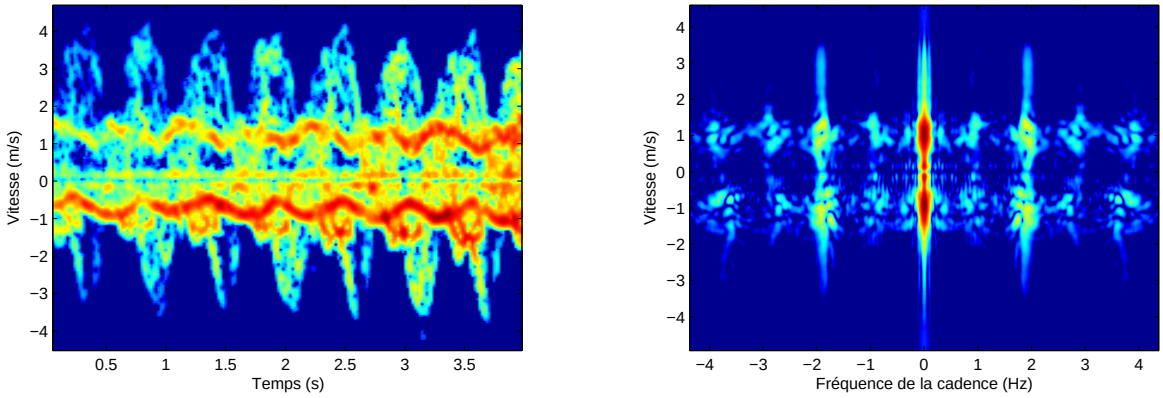


FIGURE 6.47 – Deux personnes se croisent en marchant : analyse temps long (données réelles)

Afin de mettre en évidence les limites de l'analyse sur un temps long. Nous avons calculé les spectrogrammes dans le cas de la marche (Fig 6.47) et de la course (Fig 6.48). Il est clair que l'interprétation de l'allure devient beaucoup plus délicate que lorsque le piéton est seul. Il est

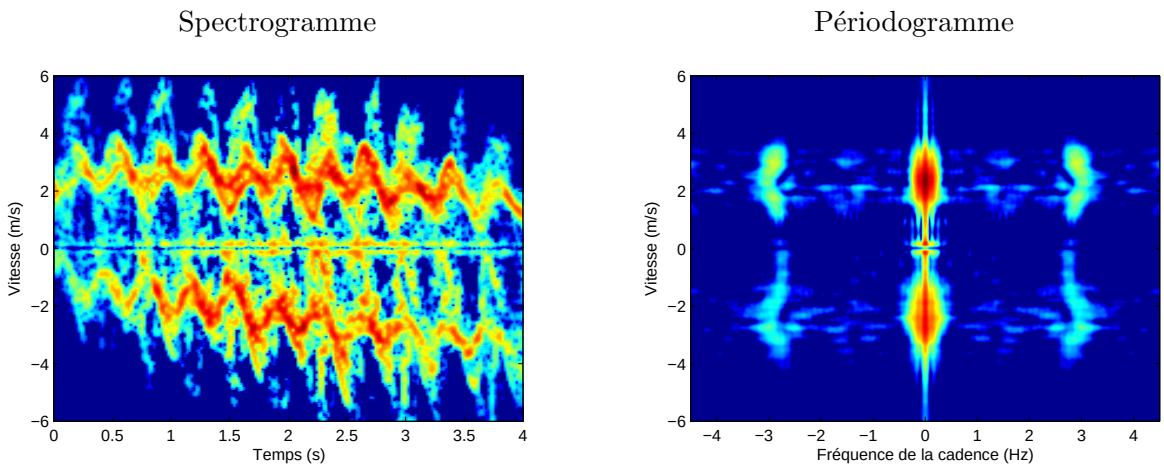


FIGURE 6.48 – Deux personnes se croisent en courant : analyse temps long (données réelles)

quand même possible de voir que les piétons se déplacent dans des directions opposées puisque le corps des deux cibles semblent avoir un Doppler opposé. En revanche, il est très difficile d'extraire des informations sur les autres parties du corps. Si les piétons se déplaçaient dans le même sens, les résultats seraient tout simplement illisibles.

L'analyse en distance dont les résultats sont visibles sur la figure 6.49 permet, d'une part de distinguer les deux individus ; d'autre part de les localiser en distance. De plus, connaissant la signature d'un piéton, il est possible de distinguer l'évolution des différentes parties du corps, comme dans le cas de la marche et de la course. Cela pose, néanmoins encore un problème lorsque les deux piétons se situent dans la la même case distance puisque leurs spectres Doppler entrent en interférence.

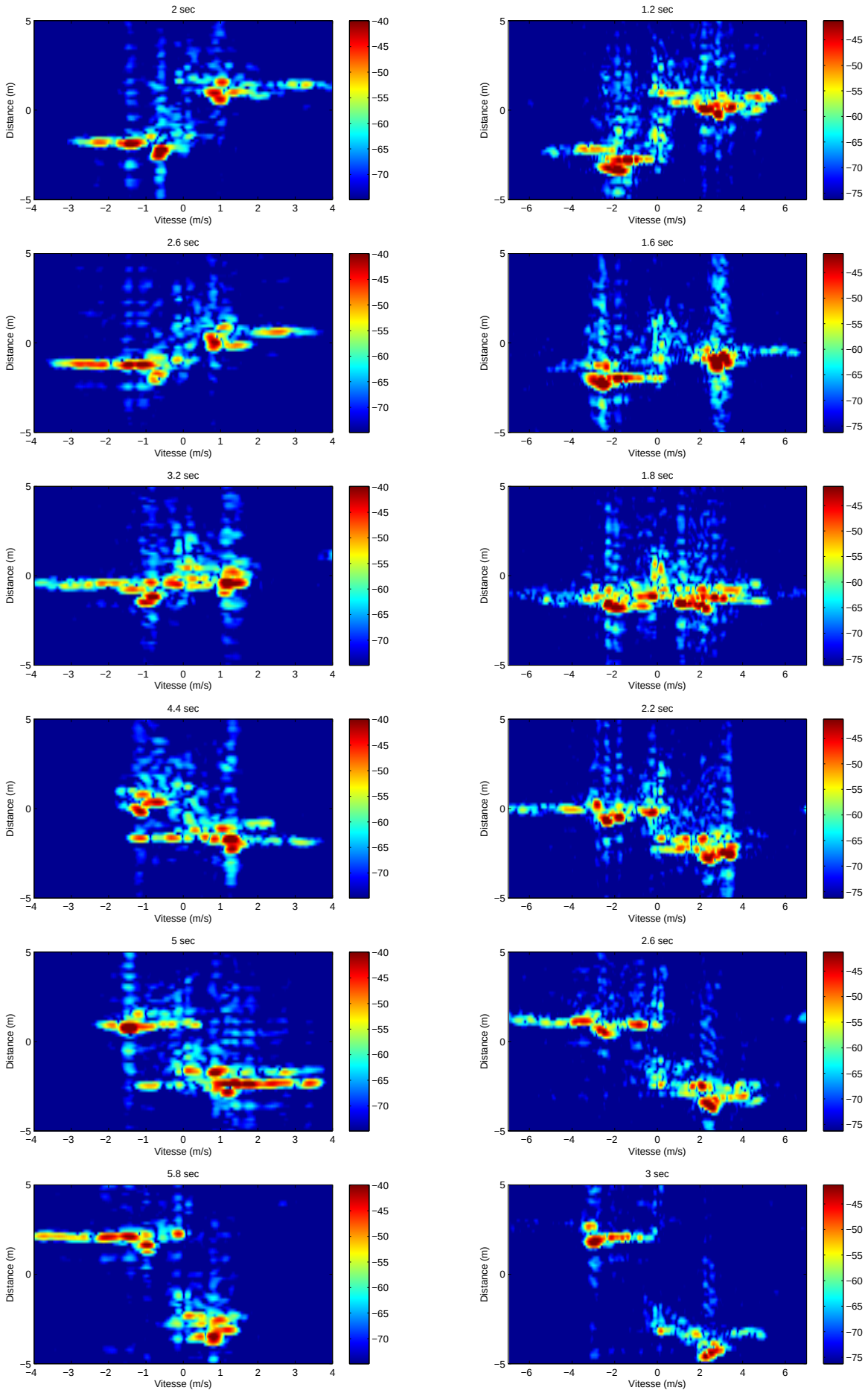


FIGURE 6.49 – Deux personnes se croisent : en marchant (gauche), en courant (droite)

6.4 Conclusion sur l'analyse d'un piéton

A travers cette thèse, nous avons pu mettre en évidence les résultats suivants :

- Par ses capacités d'acquisition, HYCAM est donc un système radar qui permet d'analyser dans le temps l'allure d'un piéton. Comme c'est un système large bande, il est possible d'observer finement la structure des différentes parties du corps en distance comme en Doppler.
- La trajectoire du piéton est modélisable par un ensemble de réflecteurs répartis sur chacune des parties du corps et qui varient au cours du temps. Il est donc possible de prédire l'interaction d'un signal radar avec chaque réflecteur en mouvement et ainsi créer des images radar à partir de données simulées.
- Les résultats obtenus à partir des mesures expérimentales concordent avec ceux obtenus grâce au modèle de mouvement.

Certains problèmes sont néanmoins restés en suspens. Ils concernent notamment le choix des points du modèle à prendre pour faire correspondre de manière plus fidèle les images réelles et les images simulées. Cette analyse offre donc des perspectives et ouvre la voie à de nouvelles études.

Conclusions et perspectives

Ces travaux de thèse ont été consacrés à l'analyse de l'effet micro-Doppler de cibles mobiles en imagerie radar. Dans ce manuscrit, nous nous sommes attachés d'une part à mettre en évidence et analyser les mouvements à l'origine des micro-Doppler, d'autre part à remonter aux caractéristiques de la cible à partir de sa signature micro-Doppler.

La démarche retenue a associé une partie modélisation et un large volet expérimental. La partie modélisation a permis de décrire les phénomènes à l'origine de l'effet micro-Doppler et d'analyser l'interaction d'objet mobiles déformables avec une onde radar. La partie expérimentale s'est appuyée sur un important dispositif existant : HYCAM, un radar large bande, conçu par l'ONERA pour étudier à haute résolution des cibles qui varient rapidement au cours du temps. Le système était donc particulièrement adapté à l'étude des micro-Doppler mais aucune mesure n'avait encore été réalisée dans ce domaine.

Les deux premiers chapitres ont permis de situer le sujet dans le contexte scientifique actuel. Le premier a introduit les concepts de base de l'imagerie radar puis s'est focalisé plus spécifiquement sur le sujet de la thèse. Nous avons ainsi vu que l'effet micro-Doppler est induit par les déformations de cibles dont le mouvement provoque une modulation en fréquence du signal émis. D'un point de vue spectral, cela se traduit par un étalement des fréquences autour de la fréquence Doppler moyenne.
Après avoir présenté les bases théoriques, le deuxième chapitre a exposé le matériel et les méthodes utilisées pour étudier l'effet micro-Doppler. Nous avons ainsi décrit le processus de la chaîne de traitement, depuis l'acquisition des données jusqu'à la formation d'images.

Deux applications représentatives de l'effet micro-Doppler sont apparues particulièrement intéressantes : la roue et le piéton. Nous avons donc étudié leur mouvement et analysé leur interaction vis-à-vis d'une onde radar, en proposant un outil permettant de calculer des images radar à partir d'un modèle de mouvement. Les images obtenues issues des données simulées ont ensuite été comparées aux résultats obtenus avec les données expérimentales du radar HYCAM.

Les deux chapitres suivants ont porté sur l'étude de la roue.
Dans le chapitre 3, nous avons étudié la trajectoire et les caractéristiques cinématiques des points d'une roue lorsqu'elle tourne autour d'un point fixe sans roulement puis lorsqu'elle roule sans glissement. L'étude de la vitesse a ainsi permis de calculer le Doppler réfléchi par chacun des points de la roue en fonction de la position du point d'observation.

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étendue du spectre micro-Doppler qui varie en fonction de l'orientation de la roue par rapport à la ligne de visée du radar. Nous avons ainsi pu montrer que lorsque l'observateur est au niveau du sol l'amplitude est maximale quand la roue se déplace dans la direction de visée du radar et qu'elle est nulle lorsque la direction de déplacement est perpendiculaire à la visée. En revanche, lorsque l'observateur prend de la hauteur par rapport à la roue, le calcul montre que l'étendue Doppler n'est pas nulle.
Étant donné qu'il est possible de connaître les caractéristiques du spectre micro-Doppler de la roue en fonction de son orientation, nous avons développé une méthode permettant d'effectuer l'inverse. Connaissant la hauteur de visée du radar, la distance radar-roue et les bornes du spectre micro-Doppler réfléchi par une roue, la méthode proposée a permis de déterminer la vitesse de translation de la roue ainsi que son orientation par rapport à l'axe de visée.

Les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre 4 ont apporté beaucoup d'enseignements sur l'interaction d'une onde radar avec une roue en mouvement. En nous appuyant sur des résultats issus de données réelles et de données simulées, nous avons analysé la signature Doppler d'une roue et d'un ventilateur en faisant varier leur vitesse et leur orientation par rapport au radar. Les résultats obtenus ne concordent pas toujours exactement avec les valeurs attendues mais il n'y a pas non plus de contradiction.
Nous avons vu dans le cas simulé comme dans le cas réel que l'étendue du spectre micro-Doppler varie proportionnellement à la vitesse de rotation. En revanche l'écart constaté sur les données réelles entre la vitesse mesurée et la vitesse réelle nous a conduit à conclure que le Doppler mesuré n'est pas celui de l'extrémité de la roue.
Une zone d'interrogation subsiste néanmoins quant à la réflexion des rayons de la roue. En effet l'étendue des vitesses reste constant quelque soit l'orientation de la roue par rapport au radar. Ces incertitudes sur la mesure remettent évidemment en question le modèle de réflexion proposé au chapitre 3. La raison pour laquelle la roue ne se comporte pas comme dans la simulation vient certainement du fait que le modèle de réflexion d'une roue de vélo (composée de rayons) n'est pas le même que celui d'une roue pleine.
Nous avons également mis en évidence le caractère échantillonné du spectre Doppler lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée. Connaissant la vitesse de rotation de la roue, nous avons ainsi pu déterminer le nombre de rayons d'après le modèle de Chen. Ce nombre, 4 fois inférieur à la réalité (9 au lieu de 36) montre que les rayons ne réfléchissent que pour une orientation donnée puisque, en fait, il faut noter que la disposition des rayons leur donne 9 orientations possibles .

Les deux derniers chapitres ont été consacrés à l'étude des piétons.
Pour comprendre le mouvement et analyser la vitesse des différentes parties du piéton, nous avons utilisé un modèle de points fourni par un système d'acquisition vidéo. Il a ainsi été possible d'obtenir, dans le cas de la marche et de la course, les coordonnées tridimensionnelles d'un ensemble de réflecteurs répartis sur le corps d'un piéton. Ce modèle a permis d'isoler chacune des parties du corps afin d'analyser, de manière indépendante leur mouvement. Une attention

particulière a été portée sur le déplacement des pieds, des mains et du torse, dans le cas de la marche et de la course.

Partant du modèle de mouvement issu de trajectoires réelles, nous avons formulé un modèle analytique empirique de la distance et de la vitesse radiale des différentes parties du corps. Nous avons ainsi identifié les principaux paramètres qui régissent le mouvement et essayé de dégager une fonction mathématique pour chacune des parties du corps. Si le mouvement des bras peut être assimilé à une sinusoïde, le mouvement des pieds est pour sa part beaucoup plus compliqué à décrire puisqu'il passe alternativement de la position fixe à une phase de balancement où il peut atteindre près de $3,5$ fois la vitesse du corps (cas de la marche).

Le modèle de mouvement a ensuite été injecté dans le simulateur d'images radar. Connaissant l'évolution de la vitesse et de la distance des différentes parties du corps, nous avons pu comprendre comment était formée l'image résultant de l'interaction d'un signal radar avec un piéton en mouvement.
Les images simulées ont ensuite été confrontées aux images calculées à partir des données du radar HYCAM. Les résultats des mesures, présentés dans le chapitre 6, se sont révélés particulièrement satisfaisants. Les images formées montrent que le système HYCAM est capable de détecter les micro-Doppler liés au mouvement des membres d'un piéton, ce qui n'était pas forcément évident à priori. Les résultats vont dans le même sens que le modèle proposé même s'il n'est pas toujours facile de faire coïncider images réelles et images simulées. Grâce au pouvoir de résolution du radar HYCAM, nous avons pu discriminer en distance et en Doppler les différentes parties du corps, puisque ces dernières sont animées d'un mouvement propre.

L'analyse des micro-Doppler, plus particulièrement ceux induits par le mouvement des piétons, fait l'objet d'un intérêt croissant, compte tenu du nombre de publications récentes. Les travaux réalisées au cours de cette thèse ont été menées parallèlement à certains articles [Thaya-07, And-07, Yang-08, Ram-08, Smith-08, And-08, Dorp-08]. Cela prouve que le sujet est intéressant tant par son originalité que par sa portée scientifique. La particularité de cette thèse a été de proposer une étude sur la structure fine du micro-Doppler. Nous avons analysé le phénomène en distance comme en Doppler alors que toutes les études sur le piéton exploitent uniquement la variation du Doppler des différentes parties du piéton.

De plus il existait très peu de données expérimentales, pour la roue comme pour le piéton, encore moins en haute résolution. Les travaux de thèse auront permis de constituer une base de données selon un protocole expérimental qui a décliné le mouvement d'un piéton et d'une roue à travers une multitude de scénarios.
L'ensemble des données recueillies lors des différentes campagnes de mesures représente une source d'information très riche. Ces données sont très précieuses car ce sont actuellement les seules qui permettent de fournir une résolution en distance aussi fine. L'ensemble des travaux effectués sur le mouvement du piéton et de la roue associé aux données expérimentales peut ainsi servir de base à de futures études.

Les résultats obtenus ont donc démontré que les effets micro-Doppler peuvent être observés en imagerie radar. Cela donne à penser que le sujet et les applications associées devraient être étudiées plus en profondeur.

Concernant l'étude sur les roues, l'utilisation d'un modèle plus réaliste fait partie des points à améliorer. Actuellement, ce modèle suppose que tous les points de la roue réfléchissent dans la direction du radar, ce qui n'est évidemment pas le cas dans la réalité. Cette remarque intervient après l'analyse des résultats de la roue de vélo où seul une partie des rayons rétrodiffusent le signal émis.

Nous n'avons malheureusement pas pu compléter la base de données par de nouvelles acquisitions lorsque cela était nécessaire, en raison de l'indisponibilité du système de mesure. Lors de la campagne d'acquisition, le plan du ventilateur était orthogonal à l'axe de visé, ce qui n'était pas le cas de la roue. Il aurait ainsi été judicieux d'effectuer de nouvelles mesures de la roue et du ventilateur dans les mêmes conditions d'orientation.
Pour mieux comprendre le comportement de la roue, il aurait également été intéressant d'utiliser d'autres types de roue (roue lenticulaire, roue de tracteur, de voiture, de moto). Compte tenu de la résolution du radar, nous aurions également pu analyser la structure micro-Doppler d'un véhicule à chenilles.

Le champ d'investigation sur l'étude des piétons s'est également révélé très riche et offre de nombreuses perspectives.

La bande passante du radar HYCAM devrait passer d'ici deux ans de 800 MHz à $3,2$ GHz puis à $6,4$ GHz. Cette dernière valeur correspond à une résolution en distance de $2,3$ cm au lieu des $18,5$ cm disponibles actuellement. Avec une telle résolution, il serait possible d'étudier encore plus finement les phénomènes. Il devrait notamment être possible de distinguer les membres gauches des membres droits d'un piéton. En affinant la résolution, le pied ne pourra plus être considéré comme un point. Celui-ci pourrait donc s'étendre en distance comme en Doppler et occuper plusieurs pixels de l'image. Cela nous amènerait à reconsidérer le modèle de piétons qu'il serait intéressant de faire tendre vers une répartition continue des réflecteurs.

Le modèle de piéton qui a été choisi repose sur un système d'acquisition vidéo. Ce genre de matériel, très coûteux, est principalement utilisé par les studios d'animation pour reproduire de manière fidèle les mouvements complexes de personnages virtuels. Quelques échantillons de données, récupérées sur le web, ont permis d'étudier la caractéristique des différentes parties du corps et de constituer les premières images simulées. Malheureusement, les situations et les scénarios de mouvement ne sont disponibles que de manière restreinte. De plus il n'est pas possible de régler les paramètres de mouvement, telle que la vitesse, la cadence ou même la taille du piéton.
Nous avons proposé une approche pour modéliser empiriquement la position et la vitesse pour

un nombre réduit de points du corps, à partir de quelques paramètres. Cette démarche est à approfondir pour tendre vers un modèle complètement analytique. Cette perspective pourrait permettre de calculer de nouvelles trajectoires sans avoir recours à un système de capture. De plus, il serait envisageable de mettre au point une méthode permettant d'estimer les paramètres du mouvement à partir d'une image radar. L'objectif serait de déterminer les coordonnées spatiales d'un piéton en trois dimensions à partir d'une image distance Doppler. En répétant la procédure pour chaque image, il serait possible de reproduire le mouvement du piéton.

L'analyse de l'effet micro-Doppler est incontestablement un outil prometteur. Les perspectives d'un tel système sont donc réelles et variées et il est donc fortement recommandé d'approfondir le potentiel de cette technique dans le domaine de la reconnaissance de cibles mobiles.

Bibliographie

[Ahma-07] F. Ahmad, M. Amin, et P. Zemany, *Performance analysis of dual-frequency CW radars for motion detection and ranging in urban sensing applications*, in Proceedings of the SPIE Symposium on Defense and Security, Radar Sensor Technology XI Conference, vol. 6547, 2007.

[And-07] M. G. Anderson et R. L. Rogers, *Micro-Doppler analysis of multiple frequency continuous wave radar signatures*, in Proceedings of SPIE, vol. 6547, 2007.

[And-08] M. G. Anderson, *Design of Multiple Frequency Continuous Wave Radar Hardware and Micro-Doppler Based Detection and Classification Algorithms*, Thèse de doctorat, University of Texas at Austin, 2008.

[Boul-04] R. Boulic, B. Ulciny, et D. Thalmann, *Versatile walk engine*, in Journal Of Game Development, vol. 1(1), 2004, pp. 29–50.

[Boul-90] R. Boulic, M. Thalmann, et D. Thalmann, *A global human walking model with real-time kinematic personification*, in Vision Computer, vol. 6, 1990, pp. 344–358.

[Carr-91] W. Carrara, R. Goodman, et R. Majewski, *Spotlight Synthetic Radar : Signal Processing Algorithms*, Artech House, 1995.

[Chan-70] R. Chang, *Orthogonal frequency multiplex data transmission system*, in US Patent, vol. 3, 1970, pp. 445–488.

[Chen-00] V. C. Chen, *Analysis of micro-Doppler signatures with time-frequency transform*, in Proceedings of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, 2000, pp. 463–466.

[Chen-02] V. C. Chen et H. Ling, *Time frequency transforms for radar imaging and signal analysis*, Artech House, 2002.

[Chen-03] V. C. Chen, F. Li, S. Ho, et H. Wechsler, *Analysis of micro-Doppler signatures*, in IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 150, 2003, pp. 271–276.

[Chen-05] V. C. Chen, *Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features*, in IEEE radar conference, 2005, pp. 348–353.

[Chen-06] ——, *Micro-Doppler effect in radar : phenomenon, model, and simulation study*, in IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, vol. 42(1), 2006, pp. 2–21.

[Chen-80] C. Chen et H. Andrews, *Target motion induced radar imaging*, in IEEE Transactions on Aerospace Electronics Systems, vol. 16, 1980, pp. 2–14.

[Cutt-77] J. Cutting et L. Kozlowski, *Recognizing friends by their walk : Gait perception without familiarity cues*, in Bulletin of the Psychonomic Society, vol. 9, 1977, pp. 353–356.

[Dorp-03] P. van Dorp et F. Groen, *Human walking estimation with radar*, in IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 150, 2003, pp. 356–365.

[Dorp-08] ——, *Feature-based human motion parameter estimation with radar*, in IET Radar, Sonar and Navigation, vol. 2, 2008, pp. 135–145.

[Floc-95] B. L. Floch, M. Alard, et C. Berrou, *Coded orthogonal division multiplex*, in Proceedings of the IEEE, vol. 83, 1995, pp. 982–996.

[Garm-06] D. Garmatyuk, *Ultrawideband imaging radar based on OFDM : System simulation analysis*, in Proceedings of the SPIE, vol. 62, 2006, pp. 1–11.

[Geish-01] J. L. Geisheimer, W. Marshall, et E. Greneker, *A continuous-wave (CW) radar for gait analysis*, in IEEE Conference Signals, Systems and Computers, vol. 1, 2001, pp. 834–838.

[Geish-02] ——, *High-resolution Doppler model of the human gait*, in Proceedings of SPIE, 2002, pp. 8–18.

[Haie-93] I. J. L. Haie, E. I. LeBaron, C. J. Roussi, et K. Quinlan, *Processing techniques for the removal of target support contamination*, in IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 1, 1993, pp. 488–491.

[Lai-07] C. Lai, Q. Ruan, et R. Narayanan, *Hilbert-Huang Transform (HHT) processing of through-wall noise radar data for human activity characterization*, in Proceedings of the IEEE SAFE 2007 Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics, vol. 1, 2007.

[Lei-05] J. Lei et C. Lu, *Target classification based on micro-Doppler signatures*, in IEEE radar conference, 2005, pp. 179–183.

[Li-02] J. Li et H. Ling, *Micro-Doppler features extraction from ISAR data using adaptive chirplet representation*, in IEEE radar conference, 2002.

[Li-03] ——, *Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts*, in IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 4, 2003, pp. 284–291.

[Li-90] H. J. Li, S. H. Yang, T. Y. Liu, S. L. Yen, Y. Shen, et N. H. Farhat, *Microwave imaging of moving objects*, in International Journal of Imaging Systems and Technology, vol. 2, 1990, pp. 219–230.

[Litt-98] J. Little et J. Boyd, *Recognizing people by their gait : the shape of motion*, in Journal of Computer Vision Research, vol. 1, 1998.

[Loul-05] F. Loula, S. Prasad, K. Harber, et M. Shiffrar, *Recognizing people from their movement*, in Journal of Experimental Psychology, 2005.

[Mens-91] D. Mensa, *High Resolution Radar Cross-Section Imaging*, Artech House, 1991.

[Mult-99] F. M. et al, *Computer animation of human walking : a survey*, in The Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 10(1), 1999, pp. 39–54.

[Niyo-94] S. Niyogi et E. Adelson, *Analyzing and recognizing walking figures in XYT*, in IEEE Proceedings on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994, pp. 469–474.

[Otero-05] M. Otero, *Application of a continuous wave radar for human gait recognition*, in Proceedings of SPIE, Signal Processing Sensor Fusion and Target Recognition, vol. 5809, 2005, pp. 538–548.

[Paich-07] Y. Paichard, *Caméra Hyperfréquence pour la mesure et l'analyse de la SER de cibles scintillantes*, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 2007.

[Park-92] K. J. Parker, R. M. Lerner, et S. R. Huang, *Method and apparatus for using Doppler modulation parameters for estimation of vibration amplitude*, in U.S. Patent 5,086,775, 1992.

[Ram-07] S. S. Ram et H. Ling, *Analysis of micro-Dopplers from human gait using reassigned joint time-frequency transform*, in Electronics Letters, vol. 43, 2007.

[Ram-08] S. S. Ram, Y. Li, A. Lin, et H. Ling, *Doppler-based detection and tracking of humans in indoor environments*, in J. Franklin Institue (Special issue on Indoor Radar Imaging), 2008.

[Ram2-08] S. S. Ram et H. Ling, *Simulation of human micro-Dopplers using computer animation data*, in IEEE radar conference, 2008.

[Saba-98] A. M. Sabatini et V. Colla, *A method for sonar based recognition of walking people*, in Robotics and Autonomous Systems, vol. 25, 1998, pp. 117–126.

[Setl-06] P. Setlur, M. Amin, et F. Ahmad, *Analysis of micro-Doppler signals using linear FM basis decomposition*, in Proceedings of SPIE, vol. 6210, 2006.

[Setl-07] P. Setlur, F. Ahmad, M. Amin, et P. Zemany, *Experiments on through-the-wall motion detection and ranging*, in Proceedings of the SPIE Symposium on Defense and Security, Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense VI Conference, vol. 6538, 2007.

[Show-97] G. A. Showman, K. J. Sangston, et M. Richards, *Correction of artifacts in turntable inverse synthetic aperture radar images*, in Proceedings of the SPIE, vol. 3066, 1997.

[Show-98] G. A. Showman, M. Richards, et K. J. Sangston, *Comparison of two algorithms for correcting zero-Doppler clutter inturntable ISAR imagery*, in Conference on Signals, Systems and Computers, vol. 1, 1998, pp. 411–415.

[Smith-06] G. E. Smith, K. Woodbridge, et C. J. Baker, *Micro-Doppler signature classification*, in IEEE radar conference, 2006.

[Smith-08] ——, *Multistatic micro-Doppler signature of personnel*, in IEEE radar conference, 2008.

[Spar-03] T. Sparr et B. Krane, *Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR*, in IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 150, 2003, pp. 277–283.

[Stan-06] L. Stankovic, T. Thayaparan, et I. Djurovic, *Time-frequency representation based approach for separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging*, in IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 2006.

[Stur-85] D. Sturman, *Interactive keyframe animation of 3D articulated models*, in Course Note, SIGGRAPH Course Number 10, Computer Animation : 3D Motion Specification and Control, 1985, pp. 17–25.

[Thaya-04] T. Thayaparan, S. Abrol, et E. Riseborough, *Micro-doppler radar signatures for intelligent target recognition*, in Technical Report DRDC Ottawa TM, vol. 170, 2004.

[Thaya-07] T. Thayaparan, S. Abrol, E. Riseborough, L. Stankovic, D. Lamothe, et G. Duff, *Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data*, in IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, vol. 4, 2007, pp. 288–299.

[Thaya-08] T. Thayaparan, L. Stankovic, et I. Djurovic, *Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments*, in J. Franklin Institue, 2008.

[Vign-96] L. Vignaud, *Imagerie micro-ondes des scènes instationnaires*, Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1996.

[Walk-80] J. L. Walker, *Range-Doppler imaging of rotating objects*, in IEEE Transactions on Aerospace Electronics Systems, vol. 16, 1980, pp. 23–52.

[Wehn-87] R. Wehner, *High Resolution Radar*, Artech House, 1991.

[Wein-71] S. Weinstein et P. Ebert, *Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform*, in IEEE Transactions on Communications, vol. 19, 1971, pp. 628–634.

[Weir-97] R. Weir et D. Childress, *A new method of characterizing gait using a potable, real-time, ultrasound ranging device*, in Proceedings of the 19th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1997, pp. 1810–1812.

[Wint-90] D. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, Wiley, 1990.

[Yang-08] Y. Yang, W. Zhang, et C. Lu, *Classify human motions using micro-Doppler radar*, in Proceedings of the SPIE, vol. 6944, 2008.

[Zedi-98] M. S. Zediker, R. R. Rice, et J. H. Hollister, *Method for extending range and sensitivity of a fiber optic micro-Doppler ladar system and apparatus therefore*, in U.S. Patent 6,847,817, 1998.

[Zha-07] Z. Zhang et P.Pouliquen, *Acoustic micro-Doppler radar for human gait imaging*, in The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 121, 2007, pp. 110–113.

[Zha2-07] Z. Zhang, P. Pouliquen, A.Waxmant, et A. Andreou, *Acoustic micro-Doppler gait signatures of humans and animals*, in Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2007, pp. 627–630.

Résumé

Les méthodes traditionnelles de formation d'images ISAR supposent que la cible est rigide et ne tiennent pas compte de ses déformations géométriques. Ces mouvements, qui s'ajoutent au déplacement global de la cible, créent une modulation en fréquence sur le signal réfléchi. Ce phénomène, aussi appelé effet micro-Doppler, se traduit d'un point de vue spectral par un étalement des fréquences autour de la fréquence Doppler centrale. Comme les caractéristiques de ces modulations sont directement reliées aux propriétés géométriques et dynamiques de la cible, l'analyse de l'effet micro-Doppler peut apporter des informations complémentaires aux méthodes existantes de reconnaissance de cibles mobiles.
Les travaux précédents ont principalement été consacrés à l'analyse temporelle de l'effet micro-Doppler sans tenir compte de la dimension spatiale. En outre, mis à part les cas d'étude théoriques, il existe très peu de modélisations et de données réelles de cibles déformables.
A travers les exemples de la roue et du piéton, cette thèse consiste à caractériser finement les effets des déformations géométriques en imagerie radar, en combinant l'analyse en distance et en Doppler. En outre, un accent est mis sur l'influence de la géométrie relative entre le radar et la cible.
Ces travaux s'appuient sur un large volet expérimental où sont exploitées les données issues du radar HYCAM, un système d'acquisition large bande développé par l'ONERA. En complément des mesures, le développement d'un outil de simulation permet de faire le lien entre les données réelles et le modèle de l'objet afin d'extraire des grandeurs physiques du phénomène étudié.

Mots clés : Micro-Doppler, Imagerie ISAR, Reconnaissance de cibles.

Abstract

In traditional ISAR imaging, rigid-body motion is usually assumed without considering non-stationary targets. Relative motion or deformation of parts of illuminated objects induce additional features in the Doppler frequency spectra. These features are called micro-Doppler effect and appear as sidebands around the central Doppler frequency. They can provide valuable information about the structure of the moving parts and may be used for recognition purposes.
Previous papers have mostly focused on temporal micro-Doppler analysis. Besides except theoretical case studies, there are very few models and real data of non-stationary targets.
Through the study of the wheel and the human motion, we propose in this thesis to emphasize and model the motion involving a micro-Doppler effect. We use both the micro-Doppler and a high range resolution analysis to finely characterize such non-stationary targets in radar imaging. Moreover we emphasize the influence of the relative geometry between the radar and the target.
This thesis lies on a significant experimental part with the use of data provided by the ultra-wide band radar HYCAM developed by ONERA. In addition, the development of a simulator tool permits to link experimental data and models in order to extract physical features.

Keywords : Micro-Doppler, ISAR Imaging, Target recognition.