

Mémoire

Auteur : Stevens, Florian

Promoteur(s) : Vandewalle, Nicolas

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences physiques, à finalité approfondie

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/14800>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

FACULTÉ DES SCIENCES

Fabrication et études de vibrobots autonomes

F. STEVENS

Promoteur

Prof. N. VANDEWALLE

Comité de lecture

Dr. É. OPSOMER

Prof. N.D. NGUYEN

Prof. P. SCHLAGHECK

Mémoire présenté par Florian Stevens en vue de l'obtention du grade de Master en Sciences Physiques à Finalité Approfondie.

Université de Liège / 2021-2022

Remerciements

Mes remerciements vont à mon promoteur Prof. N.Vandewalle pour l'aide ainsi que le temps qu'il m'a consacré lors de la réalisation de ce mémoire. Je tiens à également remercier les membres de mon comité de lecture, Prof. N.D. Nguyen, Prof. P. Schlagheck et Dr. É. Opsomer pour l'attention qu'ils m'ont apportée.

Un tout grand merci à Médéric Mélard pour la conception de l'électronique des vibrobots. Je remercie également Nathan Vanesse pour son expertise et son aide dans les mouvements collectifs mais encore Joséphine Van Hulle et Jean Metzma-cher et leurs idées apportées dans le traitement d'images et de données mais encore tous les membres du GRASP pour leur soutien.

J'adresse également mes remerciements à mes collègues du bureau des mémorants. Mes remerciements les plus sincères à ma famille et mes proches pour leurs encourage-ments.

Table des matières

1	Introduction	1
2	État de l’art	5
2.1	Mouvements collectifs	6
2.1.1	Interactions	6
2.2	Déplacements individuels	11
2.2.1	Caractérisation des mouvements	11
2.2.2	Déplacement dans un piège	18
3	Matériels et méthodes	21
3.1	Vibrobot autonome	21
3.2	Arène	23
3.3	Électronique embarquée	23
3.4	Interactions	25
3.4.1	Stériques	25
3.4.2	Magnétiques	25
3.5	Logiciels de traitement d’images	26
4	Résultats	30
4.1	Système à un vibrobot	30
4.1.1	Trajectoire simple	30
4.1.2	Mouvement dans un paysage énergétique	36
4.2	Interactions entre vibrobots	39
4.2.1	Trois vibrobots	39
4.2.2	Dix et quinze vibrobots	42
5	Discussion	45
5.1	Système à un vibrobot	45
5.1.1	Modèle du déplacement individuel	45
5.1.2	Mouvement dans un paysage énergétique	48
5.2	Système avec plusieurs vibrobots	51
5.2.1	Le tourbillon	52
5.2.2	La chaîne	53
5.3	Effet du nombre de vibrobots sur les chaînes, les tourbillons et sur le piège	53
6	Conclusion et perspectives	56
6.1	Conclusion	56
6.2	Perspectives	57

Liste des abréviations

MA Marche Aléatoire

MAC Marche Aléatoire Corrélée

VL Vol de Levy

CM Centre de Masse

CS Centre de Symétrie

DQM Déplacement Quadratique Moyen

PAP Particule Auto-Propulsée

Chapitre 1

Introduction

Plusieurs espèces animales peuplant notre planète se déplacent en formant des groupes. Ceux-ci possèdent des conformations, des directions et des sens de déplacement différents en fonction du lieu et des contraintes auxquelles ils sont soumis. Prenons le cas d'une nuée d'oiseaux. Ils se déplacent dans une direction privilégiée avec une configuration particulière telle que la forme en V (Fig. 1.1(a)) lors des migrations [1]. Sous l'effet d'une influence externe telle que le vent ou la présence d'un prédateur, le groupe subit un changement brusque de direction et/ou de configuration pour contourner cette contrainte. Ces mouvements sont surtout observables lors des migrations (Fig. 1.1.a), lors de recherche de nourriture [2] ou de partenaire sexuel.

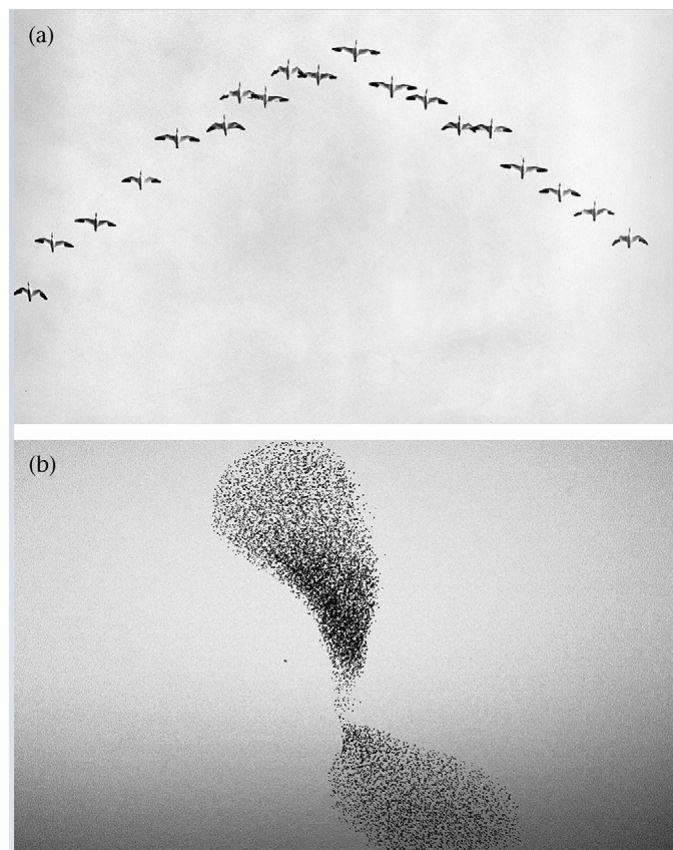


FIGURE 1.1 – (a) Formation en ligne d'oiseaux donnant une configuration en vol en forme de V. (b) Formation d'un groupe de Sturnidés [1].

La forme en V (Fig. 1.1(a)) permet un gain énergétique dû à des raisons aérodynamiques. Cette configuration permet à un oiseau situé à gauche ou à droite de son voisin de capturer l'énergie perdue lors du courant d'air généré par le battement d'aile de l'oiseau précédent. Si l'aile est légèrement inclinée vers l'avant par rapport au courant d'air, on obtient une force verticale poussant l'oiseau vers le haut. Une raison de l'adoption de cette forme est une visibilité accrue. Les oiseaux étant décalés, la visibilité sur les voisins adjacents est maximale et la visibilité sur le meneur accrue, on obtient une meilleure synchronisation du mouvement. Ce décalage permet aussi d'éviter les collisions lors d'une perturbation survenant perpendiculairement au groupe.

D'autres groupes se forment pour se défendre d'un prédateur, quand les sturnidés sont effrayés, ils s'élèvent en formant le groupe le plus compact possible (Fig. 1.1(b)), une collectivité entre chaque individu émane sans la présence d'un meneur.

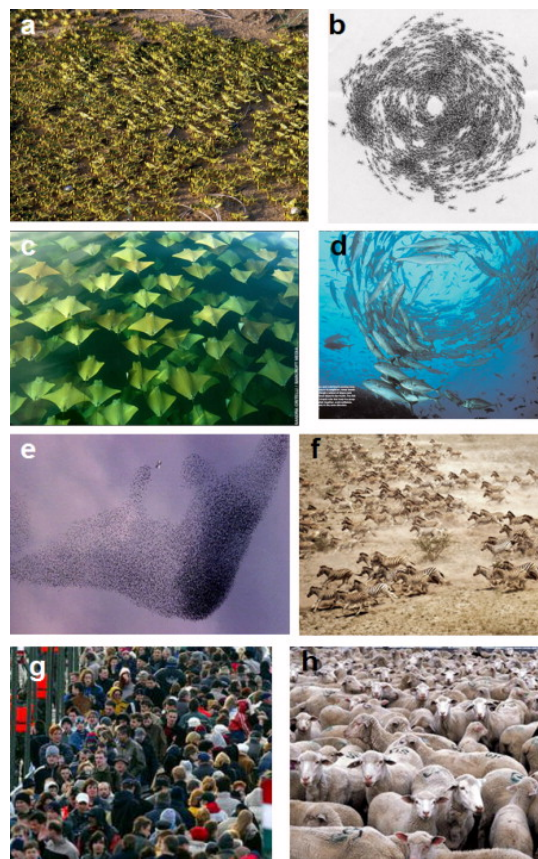


FIGURE 1.2 – Différents cas de mouvement groupes observables dans la nature. (a) Un groupe de criquets se déplaçant dans un champ. (b) Une colonne de fourmis en rotation. (c) Une formation en trois dimension d'un groupe de raies dorées. (d) Un vortex de poisson. (e) Nuée d'oiseaux essayant d'éviter un prédateur. (f) Un troupeau de zèbres. (g) Des piétons se déplaçant dans une rue. (h) Un troupeau comptant un grand nombre de moutons au repos [3].

D'autres exemples de groupes sont observables aussi bien sur la terre ferme que dans le ciel ou en mer : des foules d'humains dans les rues, des chaînes ou vortex de fourmis [4], des colonies de bactéries, des troupeaux de moutons ou encore des tourbillons de poissons (Fig. 1.2). Des mouvements collectifs peuvent donc aussi survenir pour des organismes très simples comme des bactéries mais donner néanmoins des mouvements macroscopiques non-triviaux comme ce disque contenant des centaines de bactéries en rotation (Fig. 1.3) [3]. Ces systèmes surviennent pour des tailles de groupes allant d'une centaine à des milliers d'individus ; ils sont également présents dans des systèmes biologiques, chimiques ou même encore en robotiques.

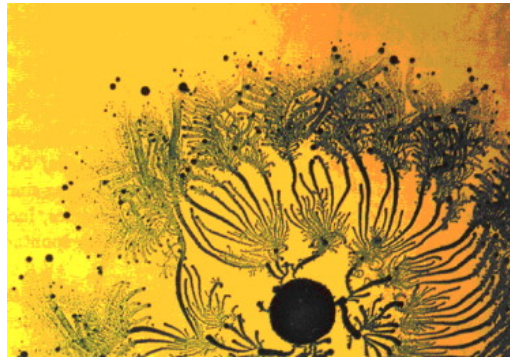


FIGURE 1.3 – Colonie de bactéries formant un vortex glissant vers l'extérieur lors de la croissance de la colonie [3].



FIGURE 1.4 – Mouvement collectif de robots auto-propulsés par vibration dans une arène circulaire. Ces robots modifient leur direction et vitesse en fonction de leurs voisins conduisant à un regroupement au niveau des bords de l'arène [5].

Les robots, bien qu'ils ne soient pas des êtres vivants, agissent individuellement en fonction de l'ordre imposé et leurs interactions sont limitées par un algorithme qui les contrôle ; elles restent néanmoins assez complexes pour produire des mouvements collectifs (Fig. 1.4) [5]. Au contraire dans le monde du vivant, les interactions et mouvements entre les êtres sont dominés par l'instinct.

Halloy et al. (2007) [6] ont mis en place des robots interagissant avec des cafards pour influencer leurs dynamiques. Dans cette expérience, des abris pour cafards sont disposés dans l'arène et les robots ont pour consigne d'aller se cacher

en dessous. En se déplaçant, les robots incitent les cafards voisins à se mouvoir et influencent la dynamique du groupe. Cette expérience a donc mis en lumière que des robots aux dynamiques a priori simplistes comme de se déplacer sous un abri, pouvaient influencer le mouvement d'espèces vivantes. L'utilisation de la robotique dans ce domaine permet de modéliser et de comprendre les mouvements de groupe des différentes espèces, en fonction des ordres et interactions imposés aux robots. Lorsque des configurations semblables à celles observables dans la nature émergent grâce aux robots, il devient donc possible de comprendre comment les espèces communiquent et interagissent entre elles pour former des configurations de mouvements collectifs. On possède d'un outil fiable qui permet de réaliser et de comprendre certaines formes émergentes à tout type d'échelle et pour différentes espèces.

Le but de ce mémoire est de fabriquer des particules actives autonomes qui communiquent entre elles pour obtenir des mouvements de groupe observables dans le monde du vivant. Nous avons donc fabriqué des robots de forme elliptique possédant une source d'énergie intrinsèque que nous appellerons vibrobot. Ils peuvent interagir entre eux via des interactions stériques et des détections magnétiques afin d'observer différentes configurations de dynamique de groupe survenant dans divers systèmes biologiques. Les interactions stériques sont des interactions de répulsion intervenant lorsque les particules se trouvent trop proches l'une de l'autre. Les interactions magnétiques sont générées par la présence de dipôles magnétiques pouvant être détectés par un magnétomètre.

Avant toute chose, pour bien comprendre le mouvement d'un vibrobot, il faut approfondir sa cinématique. La modification du frottement entre les pattes et la surface sur laquelle il se déplace constitue la première étape. Ensuite, il faudra réaliser un algorithme régissant le mouvement des vibrobots et leur dictant comment se comporter. Une fois cette caractérisation faite, nous faisons interagir nos vibrobots entre eux dans une arène. Au milieu de celle-ci est placé un aimant servant à attirer les vibrobots. Cet aimant crée un bassin attractif agissant de façon semblable à un puits de potentiel, qui permet de piéger les robots et de faire survenir des mouvements de groupe, hors ou dans celui-ci. Ces mouvements peuvent être des tourbillons, des troupeaux ou encore des chaînes.

Par cet aimant, on peut faire une analogie avec le monde vivant, où le bassin attractif qu'il génère peut représenter une zone favorable aux animaux d'un point de vue reproductif ou nutritionnel et donc énergétique. S'ils se trouvent loin de cette région, ils vont se regrouper pour former des configurations telles que des chaînes cherchant une zone favorable à leur survie ou alors rester où ils se trouvent et former des groupes dynamiques pour minimiser leur énergie et maximiser leur survie. Précisons que les animaux sont des êtres vivants, ils ne sont donc pas uniquement régis par des règles magnétodynamiques mais que pour eux, il existe un aspect comportemental qui ne peut être amené par nos vibrobots.

Chapitre 2

État de l'art

Afin de mieux comprendre les mouvements de groupe, il est important de rappeler les modèles décrivant cette dynamique. Dans le monde qui nous entoure, les mouvements collectifs se produisent dans des groupes d'êtres vivants ayant chacun leur propre volonté mais aussi pour des particules synthétiques. La présence de particules voisines et de l'environnement impacteront leur prise de décision pour conduire à différentes dynamiques collectives.

Les particules vivantes subviennent à leurs besoins sans interventions externes. Elles vont automatiquement s'organiser sous différentes formes selon les missions à accomplir qui peuvent être la recherche de nourriture, d'un abri ou de protection d'un prédateur. En revanche, des particules synthétiques comme des robots, ne peuvent initialement effectuer ces actions car elles ont besoin d'intervention humaine pour leur dicter un comportement initial.

Chaque particule synthétique possède des capteurs permettant de créer des interactions avec leurs voisines. L'utilisation des capteurs va dépendre de l'ordre imposé aux robots. En fonction de celui-ci, ils peuvent soit se diriger vers une situation énergiquement plus stable soit s'en éloigner. Comme tout système physique tend à minimiser son énergie, on peut donc étudier les situations qui émergent. On peut donc leur donner un ordre simple dictant leurs mouvements pour ainsi obtenir des déplacements et des configurations identiques à celles des particules vivantes.

Les mouvements collectifs sont régis par deux grandes dynamiques. Les interactions entre individus et celles avec le milieu dans lequel ils se trouvent. Ce sont elles qui impactent les configurations du groupe et leur façon de se mouvoir. Nous allons donc décrire ces dynamiques en deux sections. La première, les interactions entre particules que nous appellerons « Interactions ». La seconde, la dynamique du groupe traduisant l'exploration des particules portant le nom de « Caractérisation des mouvements ».

2.1 Mouvements collectifs

2.1.1 Interactions

Les mouvements collectifs sont des dynamiques de groupe se produisant lorsque des particules vivantes ou non [7] entrent en contact et interagissent entre elles sans l'intervention d'un leader ou de contraintes externes. Lorsque les particules possèdent leur propre source d'énergie, elles convertissent celle-ci en un mouvement de translation et/ou de rotation [8]. On les appelle des Particules Auto-Propulsées (PAP). Ces particules peuvent interagir et conduire à des auto organisations pouvant s'étendre. En s'étendant, différentes structures peuvent émerger.

Ces structures possèdent chacune leurs propres spécificités et caractéristiques. Elles peuvent se mouvoir ou rester immobile ou encore être organisées de façon ordonnée ou plutôt chaotique [9]. Il faut noter qu'une particule qui ne peut initialement pas accomplir une tâche, pourra en devenir capable par coopération avec ses voisines. On a donc des tâches initialement non réalisables pour un individu qui peuvent émerger collectivement. Différents modèles mettant en place l'auto organisation et l'émergence des structures de groupe ont donc été étudiés.

Les dynamiques de groupes sont des phénomènes de la physique statistique intéressant fortement les scientifiques. Ce phénomène non trivial se formant via des interactions entre particules est fortement étudié par les physiciens [10] afin d'obtenir des modèles pouvant décrire les différentes configurations qui se produisent au sein d'un groupe. Les propriétés des systèmes générées par les PAP existent dans la nature comme dans les déplacements d'oiseaux [1, 11], de singes [12] ou dans les colonies d'insectes [13]. Pour une même action initiale comme pour la recherche de nourriture, différentes configurations peuvent émerger en fonction des interactions entre individus ; on observe alors des tourbillons, des chaînes ou encore des bandes. Ces différentes configurations et leur formation sont fortement étudiées aussi bien expérimentalement que numériquement.

Modèles

Présentons un modèle pouvant donner lieu à des dynamiques complexes et captivantes. Le Modèle de Vicsek (MV) est un modèle introduit en 1995 établissant une approche quantitative pour le comportement d'un large groupe de PAP en présence de perturbations [3]. Les particules possèdent chacune un rayon d'interaction r_p (Fig. 2.1) et un angle de vue ϕ , représentant le champ de vision de la particule i . Toutes les particules j présentes dans le rayon d'interaction de la particule i vont interagir avec celle-ci uniquement si elles la perçoivent, c'est à dire si elles se trouvent dans son champ de vision. Si tel est le cas, la particule i modifiera sa position \vec{r}_i et sa vitesse \vec{v}_i . Les équations de sa position (\vec{r}_i) et sa vitesse (\vec{v}_i) sont [3]

$$\vec{v}_i(t+1) = v_0 \frac{\langle \vec{v}_j(t) \rangle_{r_p}}{|\langle \vec{v}_j(t) \rangle_{r_p}|} \quad (2.1)$$

$$\vec{r}_i(t+1) = \vec{r}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \quad (2.2)$$

où $\langle \cdot \rangle_{r_p}$ représente la moyenne des vitesses voisines de la particule i dans un rayon d'interaction r_p . À chaque particule i est associé un angle $\theta_i(t)$ indiquant la direction de son mouvement. À l'instant $t + 1$, cet angle $\theta_i(t + 1)$ peut être obtenu à partir de $\theta_i(t) = \arctan \left[\frac{\langle v_{j,x} \rangle_{r_p}}{\langle v_{j,y} \rangle_{r_p}} \right]$, comme

$$\theta_i(t + 1) = \theta_i(t) + \Delta_i(t) \quad (2.3)$$

où $v_{j,x}$ et $v_{j,y}$ sont les coordonnées de la vitesse de la particule j dans le voisinage de la particule i , et la perturbation $\Delta_i(t)$ est une valeur aléatoire dans l'intervalle $[-\eta\pi, +\eta\pi]$ avec $\eta < 1$ étant un niveau de perturbation. Celle-ci perturbe l'orientation de la particule qui va alors changer de direction. On a donc une corrélation des positions et des vitesses entre une particule et ses voisines.

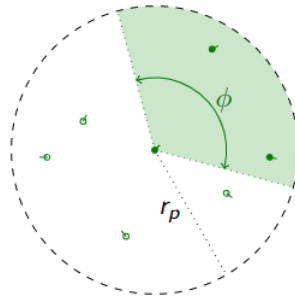


FIGURE 2.1 – Zone d'interaction de rayon r_p pour la particule pleine. Le paramètre ϕ représentant son angle de vue.

Un paramètre d'ordre est une grandeur apparaissant pour tout type d'échelle, de la colonie de bactéries à des groupes de robots [14]. Ce paramètre mesure le degré d'ordre dans un système en transition de phase, indiquant la polarisation du milieu et se calcule comme

$$\Phi = \frac{1}{Nv_0} \left| \sum_{i=1}^N \vec{v}_i \right|, \quad (2.4)$$

N étant le nombre de particules dans notre système, v_0 la vitesse moyenne du système. Si le système est désordonné, les vitesses pointent vers des directions différentes et le paramètre tend vers 0. Dans le cas contraire, le paramètre Φ tend vers 1 et les particules sont orientées dans la même direction. Le système est dit ordonné. Une grandeur complémentaire sur la caractérisation du mouvement du groupe peut être utilisée : le moment angulaire. Cette grandeur mesure le degré de rotation du groupe autour de son centre et est calculé comme

$$\vec{L}_{Gr} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \vec{r}_i(t) \times \vec{v}_i \right| \quad (2.5)$$

où $\vec{r}_i = \vec{r}_i - \vec{r}_{Gr}$, est la différence vectorielle entre la position de l'individu i et le centre du groupe et \vec{v}_i représente la vitesse de la particule i .

Des modèles sur des mouvements en trois dimensions (principalement d’oiseaux et de poissons) ont été réalisés pour produire des effets de mouvements collectifs [15] plus proches du monde réel et créer des modèles se rapprochant le plus possible du monde biologique en prenant des paramètres tels que la densité ou le contact des plus proches voisins [16]. Il fut aussi montré que la taille de l’animal (des poissons dans ce cas [17]) influence les mouvements collectifs du groupe en modifiant la densité du groupe. On a donc une corrélation directe entre la densité et le mouvement collectif.

Les règles les plus communes pour ces modèles inspirés du règne animal sont [3] : (i) une répulsion à courte distance entre les voisins et l’environnement, (ii) un ajustement de leur vitesse selon celles des voisins, (iii) une force dirigeant l’individu vers le centre de masse du groupe, (iv) la présence de bruit, (v) une force de frottement dépendant du milieu dans lequel se déplace l’animal. Chaque individu réagit selon ces différentes règles en fonction de la zone d’interaction dans laquelle il se trouve [18]. Sur la Fig. 2.2 sont représentés ces trois zones portant le nom de :

1. Zone de répulsion (ZOR)
2. Zone d’orientation (ZOO)
3. Zone d’attraction (ZOA)

La ZOR est une sphère pleine de rayon R_p (un disque plein si on est en deux dimension), elle représente le volume de la particule. Les individus ne pouvant se superposer, cette sphère est donc une zone interdite d’accès pour laquelle une force de répulsion existe afin d’éviter toutes collisions. S’il n’y a pas de collisions (la règle (i) n’est pas appliquée), la particule est attirée par les individus présents dans la ZOA (règle (iv)), dont il possède l’information (ces particules sont présentes dans le cône d’angle ϕ représentant l’angle de vue de la particule). Ensuite, elle va s’orienter selon ses voisines (règle (iii)) présentes dans la zone d’orientation. Dans la ZOO, les vitesses et positions se modifient en suivant l’équation (2.1).

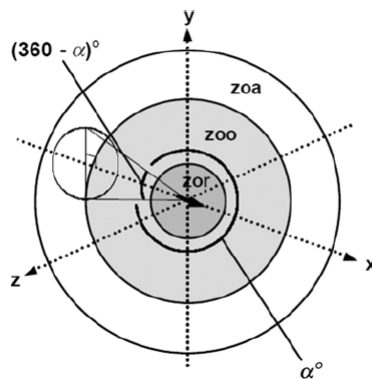


FIGURE 2.2 – Différentes zones d’interactions pour chaque individu. « ZOR » est la zone de répulsion, elle représente le volume dur de la particule. « ZOO » zone d’orientation et « ZOA » zone d’attraction. α représente le champ de perception [18].

La Fig. 2.3 montre quatre cas basiques générés par les règles précédentes. Ils sont décrits ci-après :

- (a) L'essaim est une formation possédant un très faible paramètre d'ordre et très peu d'orientation, le moment angulaire est non nul mais reste néanmoins assez faible.
- (b) Dans le tore, les individus tournent autour d'un noyau vide ayant une direction préférentielle aléatoire. Le paramètre d'ordre Eq. (2.4) est assez faible mais le moment angulaire Eq. (2.5) est élevé. Cette configuration survient lorsque le rayon de la zone d'attraction est plus large que celle d'orientation. Cette configuration est adoptée par certaines espèces de poissons [19].
- (c) Dans la dynamique de groupe parallèle, le paramètre d'ordre est élevé mais le moment angulaire est très faible. Cette situation existe pour des valeurs intermédiaires de largeur de la ZOA et ZOO.
- (d) Les bandes sont des groupes fortement alignés (cas extrême de la « Dynamique de groupe parallèle ») et survient lorsqu'on augmente la largeur de la ZOO en gardant pour la ZOA, les mêmes valeurs que pour le cas précédent.

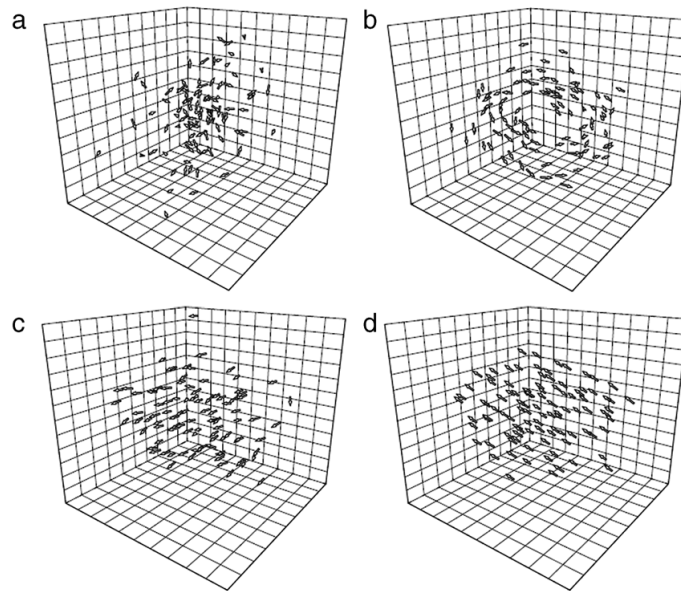


FIGURE 2.3 – Les mouvements « basiques » de mouvements collectifs suivant les règles définie par la ZOA, ZOO, ZOR avec des rayons variants pour les différentes zones d'interactions [18].

Une fois les équations de réorientations des particules et les trois zones d'interactions définies, ces conditions peuvent être implémentées dans les robots comme des ordres dictant leurs mouvements. Les robots vont donc pouvoir soit s'aligner soit se repousser ou ne rien faire en fonction de la distance définie pour chacune de ces interactions. En revanche, contrairement à des simulations informatiques, les vibrobots seront toujours limités par le matériel. On aura donc des paramètres limitants et limités tels que les capteurs, les moteurs, etc.

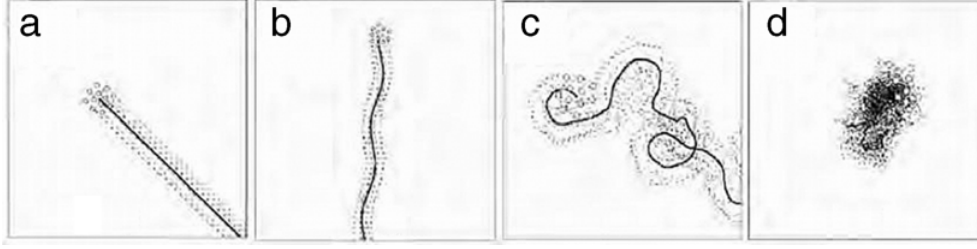


FIGURE 2.4 – Trajectoires avec différents paramètres de contrôles α_{ij} obtenues depuis des simulations numériques basées sur des robots. Les lignes solides représentent le centre de masse. Ces trajectoires sont (a) la marche, (b) les oscillations, (c) l'errant, (d) l'essaim [20].

Un autre modèle de simulation de robots a été proposé. Les résultats de ce modèle sont visibles sur la Fig. 2.4 et représentent les trajectoires possibles pour un groupe de robots dont leurs paramètres de contrôle, tel que leur champ de vision, leur vitesse, la viscosité du milieu sont basés sur ceux du monde animal. Les robots de ce modèle possèdent un facteur déterminant l'anisotropie de l'interaction, dénoté α_{ij} et appelé « facteur de sensibilité de direction ». Il est défini par

$$\alpha_{ij} = 1 + d \cos \Phi_{ij} \quad (2.6)$$

où Φ_{ij} est l'angle compris entre le vecteur unitaire indiquant la direction de la vitesse du $i^{\text{ème}}$ robot et le vecteur $\vec{r}_j - \vec{r}_i$, et d désigne le paramètre de contrôle de sensibilité, $0 \leq d \leq 1$. Par exemple, si les voisins sont dans le champ de vision de la caméra, alors les interactions entre robots dans ce champ de vision seront fortes. Dans ce cas, le paramètre $d \rightarrow 1$ dans cette zone de détection et vaut zéro en dehors.

Sur la Fig. 2.4 quatre configurations de mouvement collectif sont observés :

- (I) La « Marche » obtenue pour une valeur d'anisotropie d'interactions très faible (Fig. 2.4(a)). Dans cette configuration, les PAP s'alignent entres elles dans une direction privilégiée et cette configuration est fortement résistante aux perturbations externes. Notons qu'elle est uniquement possible si la densité de PAP n'est pas trop faible : à faible densité, le mouvement est totalement désordonné [21].
- (II) Le cas « oscillation » inclut un mouvement possédant de faibles oscillations le long du déplacement linéaire du groupe (Fig. 2.4(b)), cette configuration est moins stable que le cas de « Marche ».
- (III) Le cas « Errant » survient lorsque les individus changent brusquement d'orientation ($d \neq 0$), elle est souvent présente chez les animaux en migration [22].
- (IV) Pour l'« Essaim », la mobilité du groupe est très faible, la distribution de vitesse pour les PAP est très variée, et le groupe présente des mouvements d'individus très irréguliers.

La Fig. 2.5 montre les résultats expérimentaux pour des robots dotés de caméra pour s'orienter en fonction de la position de leurs voisins détectés par la caméra. Le mouvement de ces robots se compose de deux phases : la phase de mise à niveau de leurs positions et la phase de mise à jour de leurs directions. On obtient donc les mêmes cas que ceux observés en simulation numérique [8] (Fig. 2.4) ainsi que dans le règne animal.

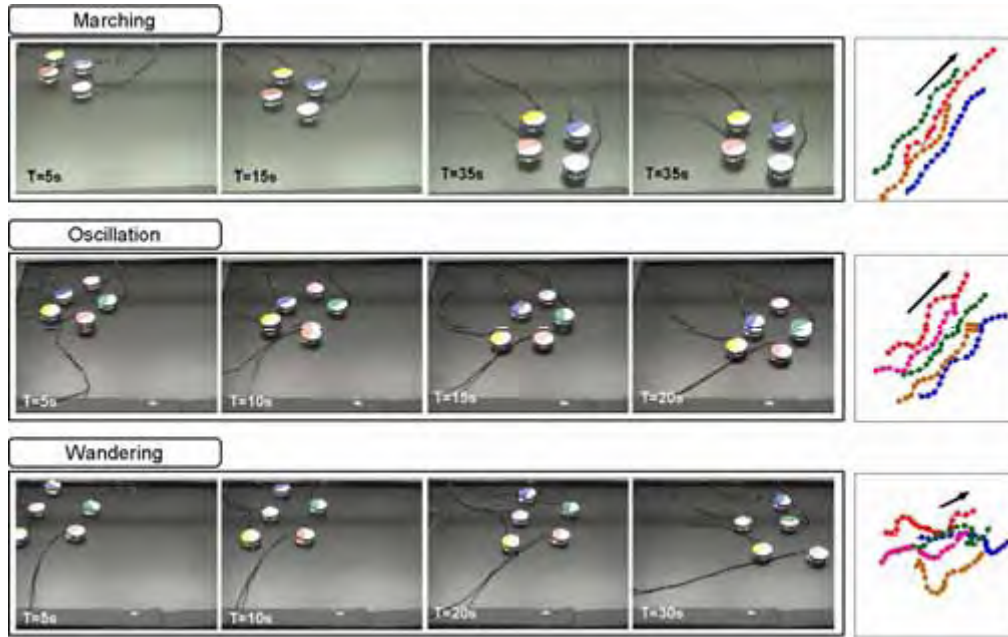


FIGURE 2.5 – Snapshots des différentes marches pour des robots dans le cas de configuration : « marche », « oscillations » et « errant » [20].

2.2 Déplacements individuels

2.2.1 Caractérisation des mouvements

Marche aléatoire

Le mouvement Brownien est une marche aléatoire effectuée par une PAP. Cette particule, dans un système en une dimension, possède une certaine probabilité au temps t de se déplacer à gauche ou à droite par rapport à sa position initiale. Ce mouvement fut étudié de façon continue par Einstein [23]. Une façon simple de représenter cette marche est de projeter le mouvement d'une particule sur une ligne droite que l'on appellera l'axe x . Einstein considéra le cas général d'une particule libre en contact avec les molécules du milieu dans lequel elle se trouve [24]. Cette particule se trouvant à une position initiale x_0 sur l'axe x a une probabilité au temps t de se trouver soit en la position x_1 ou en x_2 . Cette probabilité $P(x_0|x; t)$ doit satisfaire l'équation différentielle appelée équation de diffusion

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

où D est une constante physique portant le nom de constante de diffusion. Les conditions imposées sur cette probabilité sont

$$\begin{aligned} (a) & P \geq 0 \\ (b) & \int_{-\infty}^{+\infty} P(x_0|x; t) dx = 1 \\ (c) & \lim_{t \rightarrow 0} P(x_0|x; t) = 0 \text{ pour } x \neq x_0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

La solution unique à cette équation s'exprime comme une gaussienne

$$P(x_0|x; t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4Dt}\right) \quad (2.9)$$

par laquelle le coefficient de diffusion vaut

$$D = \frac{2k_B T}{f} \quad (2.10)$$

où k_B est la constante de Boltzmann, T la température absolue et f le coefficient de friction du milieu.

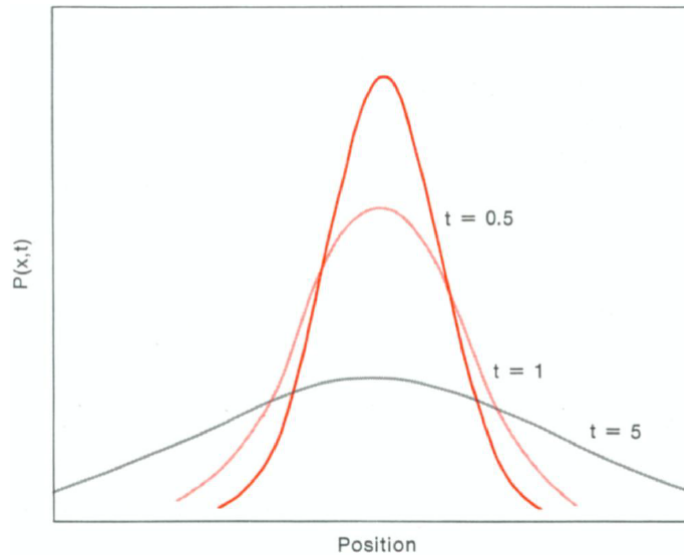


FIGURE 2.6 – Probabilité pour un mouvement Brownien de trouver la particule entre une position x et $x + dx$ après un temps t [25].

Fig. 2.6 montre l'évolution de cette loi normale (Eq. (2.9)) au cours du temps. Lorsque le temps augmente, la probabilité de trouver une particule ayant un mouvement de type Brownien entre deux positions x et $x + dx$ diminue. Cette propriété donne des informations sur le nombre de fois que la particule a visité cet intervalle. Elle permet donc d'obtenir plus de renseignements sur le processus diffusif du système.

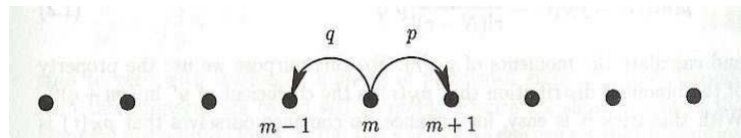


FIGURE 2.7 – Déplacement d'une particule sur un axe composé de positions notées de m et espacées de Δx . Avec p et q , la probabilité de se déplacer respectivement d'un saut Δx vers la droite ou vers la gauche [26].

Le mouvement Brownien peut aussi être étudié par une approche discrète appelée la Marche Aléatoire (MA). Dans le cas d'une particule libre se déplaçant sur un axe x défini par un ensemble de positions nommé par un set de valeurs de m . À

chaque étape de temps Δt , elle peut se déplacer de soit Δx à gauche ou de Δx à droite. Ayant affaire à une particule libre de tout mouvement, la probabilité d'aller à gauche ou à droite est identique et donc égale à $\frac{1}{2}$. La particule pouvant faire n_1 sauts vers la droite et n_2 sauts vers la gauche; on a un nombre de sauts total $N = n_1 + n_2$. Si cette particule se trouve à la position $m = 3$ après trois sauts, elle s'est donc déplacée de trois sauts à droite ($n_1 = 3$) sans effectuer de sauts à gauche ($n_2=0$). On peut donc écrire

$$n_1 = \frac{1}{2}(N + m) \quad (2.11)$$

$$n_2 = \frac{1}{2}(N - m) \quad (2.12)$$

Ce résultat nous donne donc $n_1 = m + n_2$. Dès lors, la probabilité de se trouver à une position m après N sauts va dépendre de la probabilité d'avoir effectué n_1 sauts à droite avec une probabilité p et n_2 sauts à gauche avec une probabilité de q . Cette probabilité doit aussi être multipliée par le nombre de chemins avec n_1 et n_2 étapes vers la droite et la gauche. Cette probabilité appelée distribution binomiale est exprimée comme

$$p(m, N) = \frac{N!}{\left(\frac{N+m}{2}\right)! \left(\frac{N-m}{2}\right)!} p^{\frac{1}{2}(N+m)} q^{\frac{1}{2}(N-m)} \quad (2.13)$$

Connaissant la probabilité de se trouver à un point m pour un nombre de sauts N , on peut pour un nombre de pas vers la droite $n = (N + m)/2$ écrire

$$p(m, N) = p_N(n) = \frac{N!}{n!(N - n)!} p^n q^{N-n} \quad (2.14)$$

La valeur moyenne de n appelé espérance de n et son moment d'ordre 2 peut donc être calculée

$$E[n] = \langle n \rangle = \sum_{n=0}^N n p_N(n) = Np \quad (2.15)$$

$$E[n^2] = \langle n^2 \rangle = Np + N(N - 1)p^2 \quad (2.16)$$

Une mesure de la variance de n , σ^2 peut aussi être calculé et connaissant la valeur moyenne de n (Eq. (2.15)), on peut écrire

$$\begin{aligned} \text{Var}[n] = \sigma^2 &= \langle (n - \langle n \rangle)^2 \rangle = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 \\ &= Np - Np^2 = Np(1 - q) \\ &= Npq \end{aligned} \quad (2.17)$$

Sachant que le nombre de pas vers la droite $n = (N + m)/2$, on peut aussi calculer la valeur moyenne du déplacement du marcheur après N étapes ainsi que la moyenne du carré du déplacement. Cette valeur moyenne de m ainsi son moment d'ordre 2 appelé distance quadratique moyenne (DQM) sont donnés par

$$\langle m \rangle = 2\langle n \rangle - N = N(p - q) \quad (2.18)$$

$$\langle m^2 \rangle = 4\langle n^2 \rangle - 4\langle n \rangle N + N^2 = 4\sigma^2 + \langle m \rangle^2 \quad (2.19)$$

et sa variance, s'exprime comme

$$\begin{aligned}\sigma_m^2 &= \langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2 \\ &= 4\sigma^2 \\ &= 4Npq\end{aligned}\tag{2.20}$$

Dans le cas d'une marche symétrique, la probabilité de se déplacer vers la gauche ou vers la droite est identique. Dès lors, comme $p = q = 1/2$, la valeur moyenne du déplacement m et le déplacement quadratique moyen deviennent

$$\langle m \rangle = 0 \text{ et } \langle m^2 \rangle = \sigma_m^2 = N\tag{2.21}$$

Sachant que le nombre de pas N est dépendant du temps, on observe donc que la distance quadratique moyenne parcourue par le marcheur est proportionnelle au temps. Ce procédé porte le nom de *diffusion libre* ou encore *diffusion normale*.

Chacun des sites m étant espacés d'une distance Δx , on peut donc exprimer le déplacement réel $x = m\Delta x$ comme étant le déplacement effectué sur un temps $t = N\Delta t$. Ces notations impliquent donc

$$\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = 4pq(\Delta x)^2 N = 4pq \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} N \Delta t = 2Dt\tag{2.22}$$

avec D le coefficient de diffusion étant défini comme $D = 2pq(\Delta x)^2/\Delta t$.

La distance moyenne parcourue par le marcheur est

$$\langle x \rangle = \langle m \rangle \Delta x = (p - q) \Delta x N = vt\tag{2.23}$$

avec la vitesse de dérive $v = (p - q)\Delta x/\Delta t$. Dans le cas d'une marche symétrique, vu les résultats obtenus en (2.21), la distance moyenne parcourue par le marcheur est donc nulle tout comme la vitesse de dérive et le coefficient de diffusion devient

$$D = \frac{(\Delta x)^2}{2\Delta t}\tag{2.24}$$

Vu la distribution binomiale de la probabilité du déplacement du marcheur, il est possible de relier cette probabilité à la solution unique de l'équation de diffusion (2.7). En effet, si on assume que la variance de m devient extrêmement grande, c'est à dire lorsque $N \rightarrow \infty$, cette distribution tend vers une gaussienne

$$\lim_{\sigma_m^2 \rightarrow \infty} p(m, N) = \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{m^2}{2\sigma_m^2}\right)\tag{2.25}$$

Si $x = m\Delta x$, $t = N\Delta t$ sont considérés comme des variables continues, alors la probabilité de se trouver en x à un instant t s'exprime comme

$$p(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{(x - vt)^2}{4Dt}\right)\tag{2.26}$$

où D étant le coefficient de diffusion définit par $2pq\Delta x^2/\Delta t = \text{const}$ et $v = (p - q)\Delta x/\Delta t = \text{const}$ lorsque Δx et Δt tendent vers 0. Dans le cas d'une

marche symétrique, n'ayant pas direction privilégiée, la vitesse de dérive étant nulle, la gaussienne s'exprime comme

$$p(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.27)$$

avec le coefficient de diffusion $D = \frac{\Delta x^2}{2\Delta t}$. Cette démarche est valable uniquement lorsque le temps d'observation t est plus grand que la durée entre chaque pas aléatoire Δt .

De façon plus générale, le DQM à un instant t pour un groupe de N individus s'exprime comme

$$\text{DQM}(t) \equiv \langle |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_0(t)|^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x^i(t) - x^i(0)|^2 \quad (2.28)$$

où $\mathbf{x}^i(t)$ et $\mathbf{x}^i(0)$ sont les vecteurs positions à l'instant t et au temps initial de la particule i . Cette valeur peut être liée au coefficient de diffusion D via la relation

$$\text{DQM}(t) = 2nDt \quad (2.29)$$

n représentant le degré du système et t la durée du mouvement Brownien. Vu le mouvement Brownien, la moyenne du déplacement $\langle x \rangle$ est nulle et si $n = 1$, on retrouve l'équation (2.22).

Il est intéressant de calculer la valeur moyenne du déplacement de x ainsi que le déplacement quadratique moyen (DQM) pour les diffusions dans le cas symétrique et non symétrique donnés par les équations (2.26) et (2.27). Elles peuvent être calculées respectivement via

$$\begin{aligned} \text{E}[x] &= \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x,t) dx \\ \text{E}[x^2] &= \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x,t) dx \end{aligned} \quad (2.30)$$

Pour le cas symétrique, on obtient des résultats identiques à l'équation (2.21). C'est à dire $\text{E}[x] = 0$ et $\text{E}[x^2] = 2Dt$. On a donc bien le cas d'un marcheur se déplaçant sans aucune influence d'une direction préférentielle.

En revanche, pour le cas non symétrique, comme $p \neq q$, la vitesse de dérive $v = (p - q)\Delta x/\Delta t$ n'est plus nulle. Les valeurs de la moyenne du déplacement et du déplacement quadratique moyen vont donc être modifiées car une direction préférentielle survient via la vitesse de dérive. En effet, on obtient que $\text{E}[x] = vt$ et $\text{E}[x^2] = v^2t^2 + 2Dt$. Le déplacement quadratique moyen proportionnel au carré du temps est signe d'un mouvement balistique, représentant un mouvement direct avec une direction préférentielle. De plus, la moyenne non nulle prouve la présence d'une vitesse de dérive [27].

La marche aléatoire survient aussi pour des systèmes en deux dimensions. Pour ces systèmes, la particule possède sur un système quadrillé quatre directions possible. Pour une marche en deux dimensions, la particule ne se déplace pas en moyenne. Elle revient donc comme pour une dimension à sa position initiale.

Marche aléatoire corrélée et vol de Levy

Il existe autre type de marche aléatoire et plus représentatif du monde animal, il s'agit de la Marche Aléatoire Corrélée (MAC). Elle est basée sur le même principe que la MA, à la différence que le mouvement de chaque individu est dépendant de la direction du mouvement précédent [28]. Contrairement à la MA où le mouvement était indépendant du mouvement précédant. Un mouvement privilégié est pris en compte et les propriétés de la MAC lient le mouvement individuel aux formes de déplacement du groupe [29]. La fonction de distribution des positions est constituée de la même gaussienne obtenue pour la MA (Eq. (2.9)), à laquelle une distribution non uniforme angulaire fut ajoutée (distribution de Cauchy). Cette distribution des angles tient compte des événements de réorientation des individus et possède un paramètre ρ variant de 0 à 1 (Fig. 2.8(a)).

Pour $\rho = 0$, la distribution est uniforme et aucune corrélation entre chaque étape n'existe, il s'agit donc d'une simple MA. Si $\rho = 1$, on a une distribution des angles tendant vers 0° , conduisant à une trajectoire balistique (Fig. 2.8(b)). En revanche, pour des échelles spatio-temporelles grandes, la MAC tend à la création de mouvements non corrélés car elle ne peut générer des corrélations entre mouvements sur de longs intervalles. Dès lors, uniquement un mouvement Brownien peut survenir [30].

Le modèle de Vol de Levy (VL) présente des propriétés à grandes échelles spatio-temporelles et ne converge donc pas vers un MA. Ce modèle, tout comme la MAC, implique une distribution pour les angles mais possède une distribution en loi de puissance pour la taille des mouvements (Fig. 2.8(c)). Le marcheur suivant un modèle de marche de Levy va à chaque étape j se déplacer instantanément d'une longueur l_j qui sera choisie dans la fonction de distribution $P(l)$ [31]

$$P(l) \sim l^{-\mu} \quad (2.31)$$

Cette distribution permet des corrélations entre mouvements sur de grands intervalles contrairement à la MAC et cette corrélation est contrôlée par un index de Levy μ compris entre 1 et 3. Pour $\mu \rightarrow 3$, le mouvement se dirige vers un mouvement Brownien et lorsqu'il tend vers 1 vers un mouvement de type balistique (Fig. 2.8(d)). Le changement de ce paramètre implique donc un changement macroscopique et une modification des propriétés à long terme dans le déplacement du groupe. Ces modifications de déplacement induisent un changement du type de diffusion.

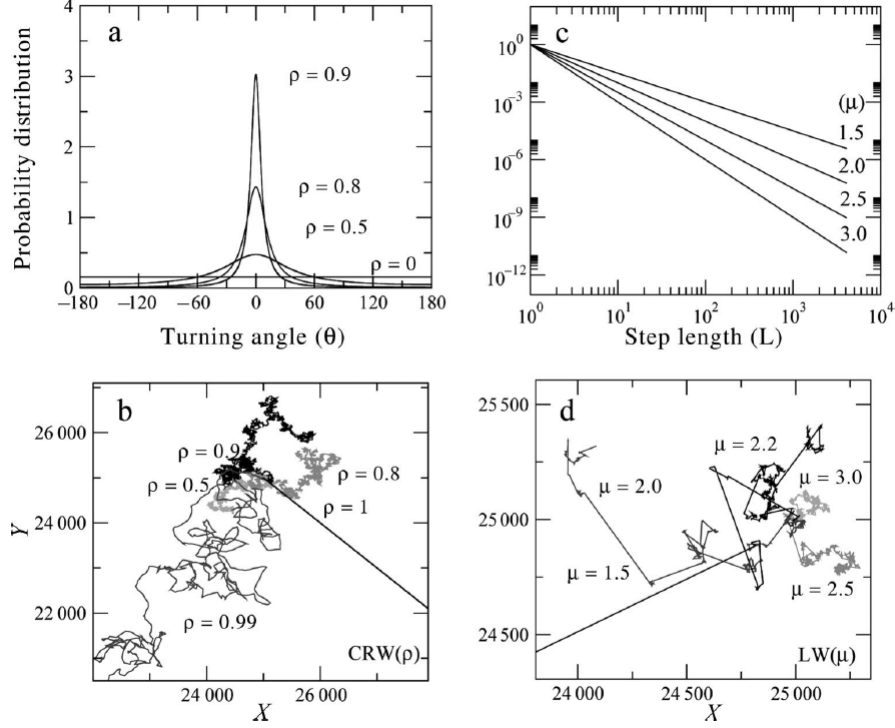


FIGURE 2.8 – (a) Distribution de Cauchy pour la MAC avec différentes valeurs pour le paramètre ρ . (b) Exemples de MAC en fonction des valeurs du paramètre ρ . (c) Distribution en loi de puissance pour la VL pour différentes valeurs de l’index de Levy μ . (d) Exemples de VL générés via la distribution en loi de puissance pour différents exposants de Levy. Image titrée de [29].

Ces mouvements de type Brownien ou encore balistiques, peuvent être caractérisés par des processus de diffusion via le DQM des particules en diffusion au cours du temps :

$$\langle R(t)^2 \rangle \sim t^\alpha \quad (2.32)$$

Fig. 2.9 présente les trois types de diffusion [32] : (I) *diffusion normale* pour laquelle le paramètre α de l’Eq. (2.32) est égale à un. Cette diffusion est caractéristique d’un mouvement Brownien et on retrouve bien quelque chose de similaire au DQM de la MA (2.29). Vu les faibles corrélations du mouvement aux grandes échelles de la MAC, le DQM va au long terme toujours tendre vers une relation linéaire.

(II) $0 < \alpha < 1$ donne lieu à de la *sous-diffusion*. La sous-diffusion est possible lorsque l’espace des particules est restreint ou qu’un temps entre chaque pas existe.

(III) Le dernier cas représente la *super-diffusion* ($\alpha > 1$). Dans le cas où la longueur de pas du mouvement d’une marche aléatoire provient d’une distribution en loi de puissance (2.31) comme pour la marche de Levy, on peut obtenir une super-diffusion. Ce phénomène donne des déplacements semblables au cas appelé « directed motion » présente sur la Fig. 2.9. Le cas limite de $\alpha = 2$ représente un mouvement *balistique* d’organisme à vitesse finie correspondant à un mouvement rectiligne. Finalement, si $\alpha = 0$, le DQM est une constante au cours du temps et aucune diffusion n’est présente.

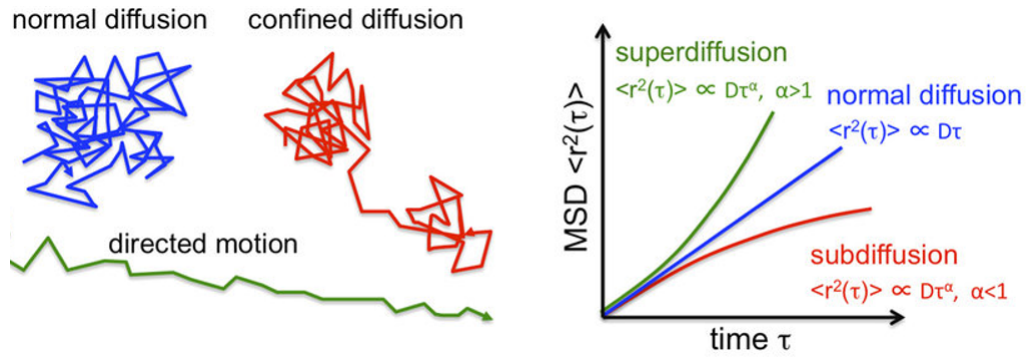


FIGURE 2.9 – Exemple de diffusion normale, de super-diffusion et de sous-diffusion. La figure de droite représente la variation de le DQM au cours du temps pour les particules diffusantes avec le paramètre α caractérisant le type de diffusion [32].

2.2.2 Déplacement dans un piège

Particule passive

Pour une particule passive, c'est à dire une particule non autopropulsée, lorsqu'elle est posée dans un puits de potentiel harmonique, ce puits agit comme un piège sur celle-ci. Cette particule peut être représentée comme un oscillateur harmonique amorti selon une dimension. Elle possède une énergie initiale diminuant due à l'amortissement.

Les trajectoires de phases correspondant à ce mouvement sont des spirales qui convergent vers l'origine du système (Fig. 2.10). L'origine correspond à la situation possédant le minimum d'énergie, soit la position qui est la plus stable. La particule oscille dès lors dans le puits de potentiel avec des amplitudes décroissantes jusqu'à posséder une énergie nulle.

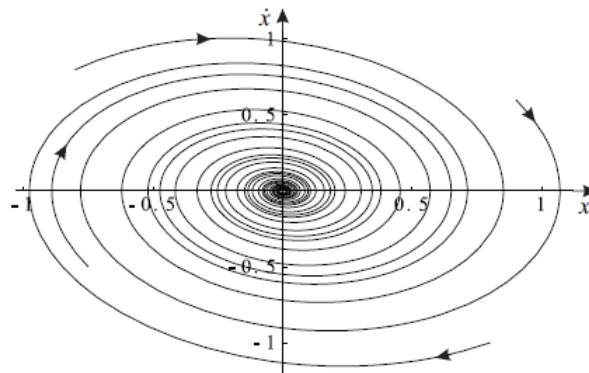


FIGURE 2.10 – Portrait de phase de l'oscillateur harmonique amorti. L'origine correspond au minimum énergétique représentant la position la plus stable [33].

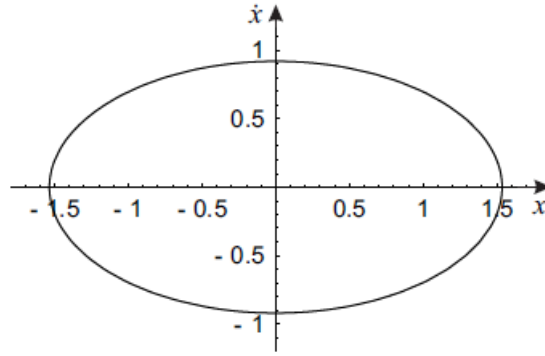


FIGURE 2.11 – Portrait de phase d’une particule liée à un ressort et soumise à une force de frottement et une force motrice. Le système agit comme un oscillateur harmonique amorti forcé [33].

Particule active

La particule passive peut devenir active si de l’énergie lors de son mouvement lui est fournie directement ou indirectement. Une particule active peut dans un premier temps être représentée par un oscillateur harmonique amorti mais forcé. La particule active voulant minimiser son énergie, une force de frottement dans le modèle doit toujours être prise en compte. La partie forcée provient du moteur qui fournit l’énergie nécessaire au mouvement de la particule.

Pour cette configuration, l’oscillateur oscille tant que de l’énergie lui est fournie. On obtient des oscillations périodiques d’amplitude constante ; elles sont représentés dans l’espace des phases par une ellipse centrée sur la position $(x, \dot{x}) = (0, 0)$ (Fig. 2.11). Cette position correspondant à la position d’équilibre du système d’énergie nulle. Soit le centre du puits de potentiel.

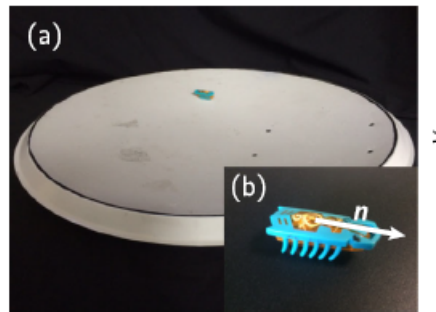


FIGURE 2.12 – Hexbug (b) placé dans un plateau parabolique servant de piège (a) [34].

Des expériences mettant en place un robot appelé hexbug possédant un moteur sur une plaque parabolique vibrante (Fig. 2.12) furent réalisés par Dauchot et *al* [34]. Dans cette expérience, la plaque parabolique représente un puits de potentiel harmonique piégeant le robot. Deux sources d’énergie sont présentes et induisent différents mouvements dans la parabole. L’une des sources provient de la vibration de la parabole tandis que la seconde est un moteur dans le robot. La particularité de l’hexbug est qu’il peut se déplacer uniquement via des translations.

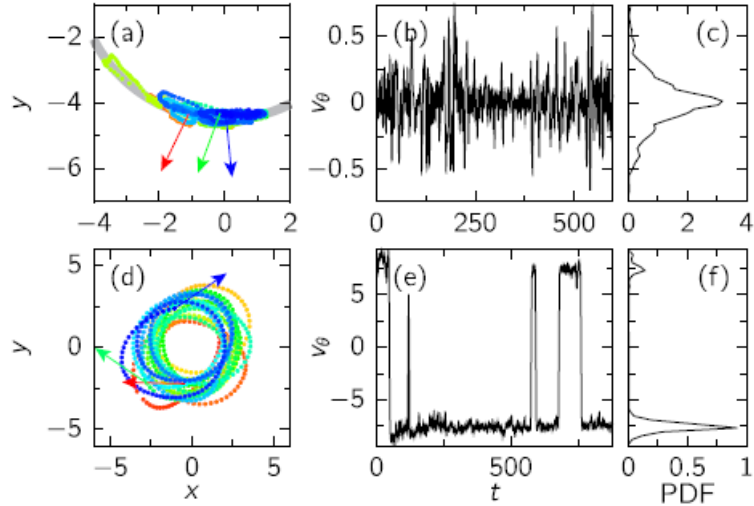


FIGURE 2.13 – Dynamique expérimentale pour un hexbug dans la parabole. (a)-(c) Mouvement d’escalade, le robot est coincé face à la pente et diffuse latéralement. (d)-(f) Mouvement orbital provoqué par la plaque vibrante. (b), (e) : la vitesse azimutale en fonction du temps. (c), (f) la probabilité de distribution de la vitesse azimutale.

Lorsque le moteur du robot est allumé et que le plateau ne vibre pas, un déplacement appelé escalade est présent. Dans ce mode, le robot se déplace longitudinalement dans la parabole (Fig. 2.13(a)) et possède en moyenne une vitesse azimutale nulle (Fig. 2.13(c)). Si on intervertit les deux sources, le moteur est éteint et le plateau vibre. Le robot effectue alors des orbites de rayon constant dans la parabole (Fig. 2.13(d)). La vitesse azimutale étant non nulle dans ce cas, on obtient donc une transition de configuration en fonction de la source.

On peut donc constater la différence de comportement entre une particule passive et active. En présence de frottements, la particule passive va se déplacer jusqu’au moment où elle aura dissipée toute l’énergie qui lui a été fournie. Dans le cas d’un potentiel harmonique, elle va osciller autour de sa position d’équilibre avec des amplitudes d’oscillations décroissantes au cours du temps. En revanche, la particule active reçoit constamment de l’énergie du milieu extérieur ou d’elle-même, l’amplitude de son mouvement est donc constante. Elle oscille donc autour d’un point qui correspondrait à sa position d’équilibre si elle ne possédait plus d’une source d’énergie constante. Ce mouvement est encore différent du cas classique de l’oscillateur harmonique forcé pour lequel la particule orbite sans oscillations autour de ce même point.

Chapitre 3

Matériels et méthodes

Dans le but de comprendre et de créer des mouvements collectifs au laboratoire, des robots vibrants ont été fabriqués et étudiés. Ces robots sont appelés des vibrobots autonomes.

3.1 Vibrobot autonome

Des robots elliptiques à quatre pattes inclinées ont été réalisés par impression 3D. Cette structure est développée sur un logiciel qui permet la construction d'objet en trois dimensions. L'imprimante 3D vient alors déposer des gouttes d'un liquide qui polymérise pour construire la structure souhaitée lorsqu'il est exposé à des UV. L'impression d'une dizaine de vibrobots peut durer entre 6 à 8 heures. Une fois imprimées, il faut les nettoyer délicatement à la main puis à l'eau pour retirer les résidus de l'impression. Cette phase de nettoyage est minutieuse et chronophage. Leurs dimensions sont de 5.5 cm pour le grand axe, 3 cm pour le petit axe et une aire totale d'environ 11 cm². Le corps est elliptique pour leur donner une forme pratique pour la comparaison avec les simulations et il possède en son centre, toute l'électronique utile au contrôle du vibrobot. Le circuit électronique embarqué sert à la programmation des vibrobots pour activer différents capteurs étant utiles à la création d'interactions. Notons que les pattes inclinées ne sont pas toutes identiques. Les pattes avant sont légèrement plus longues que les arrières et leurs extrémités sont plus aplaties pour permettre la fixation de patins nécessaires pour mettre le vibrobot en mouvement.

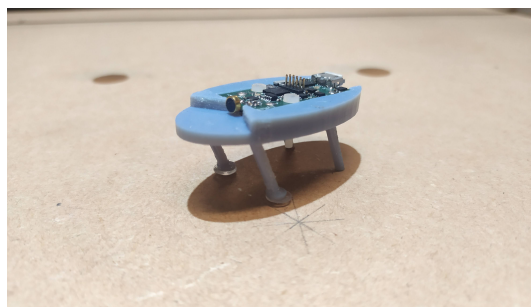


FIGURE 3.1 – Photo d'un vibrobot typique dans l'arène. On observe les quatre pattes inclinées et l'électronique embarquée sur son dos.

La mise en mouvement du vibrobot est induite par un moteur qui gère le mouvement de rotation et de translation des vibrobots. Lors du mouvement, les pattes inclinées se déforment et propulsent le vibrobot ce qui lui permet de se déplacer [35]. Des pattes totalement verticales ne pourraient se déformer et aucun mouvement ne surviendrait. Lors de cette déformation, des frottements entre les extrémités des pattes et l'arène surviennent. Ils empêchent les pattes de glisser sur la surface et permettent donc leurs déformations. Les frottements jouant donc un rôle important dans la mise en mouvement, il a donc fallu trouver les conditions optimales pour obtenir les frottements adéquats à la mise en mouvement. Pour cela, des patins ont été ajoutés uniquement aux extrémités des pattes avant et différentes combinaisons de matériaux ont été étudiées afin d'assurer un frottement idéal entre les pattes avant et l'arène.

Ces combinaisons furent réalisées à partir de deux polymères, une base et un catalyseur pour former un élastomère applicable sur chaque patte. Une fois le mélange effectué, les pattes avant des vibrobots ont été plongées dans celui-ci afin d'y appliquer une fine couche homogène.

L'avantage majeur de cette méthode est donc d'obtenir un façon de réaliser des patins totalement identiques et qui possèdent un frottement pouvant être choisi en fonction du couple base/catalyseur. Chaque couple d'élastomères possède une dureté différente mesurée en dureté Shore (Fig. 3.2). Cette échelle de dureté est donnée sur les récipients contenant ces constituants (Fig. 3.3).

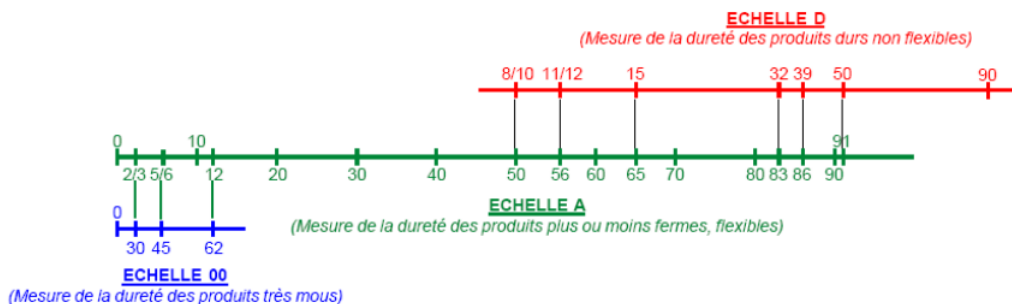


FIGURE 3.2 – Correspondance entre la dureté d'un matériau et sa valeur en Shore. Différentes échelles (00, A et D) permettent de mesurer la solidité de différents matériaux [36]. L'échelle 00 est utilisé pour les matériaux très mous, la A pour les matériaux qualifiés de souples comme des élastomères et la D pour les plus durs. Les valeurs ne possèdent pas d'unités physiques et dépendent de chaque matériau.

Les couples possédant une dureté de 8, 16, 22 et 32 Shore A furent appliqués sur les vibrobots mais aucun d'entre eux n'ont été effectifs. En effet, pour le couple de 8 Shore, l'élastomère étant trop élastique, les vibrations du robot étaient atténuées, empêchant donc celui-ci de se mouvoir.

Pour 16 et 22 Shore, les élastomères, bien que plus rigides, ne convenaient pas au mouvement du robot et étant trop souples, ils retenaient le mouvement des pattes avant. Par contre, celui de 32 Shore, donnait une friction proche de celle voulue pour permettre aux pattes de se déformer pour procurer le mouvement.

Cette déformation n'est possible que s'il existe une force de frottement au niveau des pattes qui les empêche de glisser pour ainsi entraîner la déformation.

Malheureusement bien que plus rigide, l'élasticité du matériaux retenait toujours légèrement le mouvement. Les élastomères laissèrent donc place à des patins industriels rigides à coller sous les pattes pour arriver à un frottement adéquat au déplacement. Ils sont visibles sous les pattes avant du vibrobot photographié à la Fig. 3.1.



FIGURE 3.3 – Couple base/catalyseur possédant une dureté de 8 shore sur l'échelle A.

3.2 Arène

Les vibrobots vont se déplacer sur une arène carrée en bois contreplaqué de 55 cm (Fig. 3.4). Il est possible que des défauts ou des impuretés existent sur l'arène. Les frottements entre les pattes et le bois peuvent différer en fonction de la position dans l'arène entraînant donc des effets non désirables sur le mouvement comme des frottements plus intenses à certains endroits. Le support de l'arène fut donc remplacé par différentes plaques en plexiglass pour obtenir une surface plus homogène. Néanmoins, le frottement de ces supports avec toutes les configurations de patins réalisés ne donnèrent pas des frottements adéquats pour permettre les mouvements des robots. Le support en bois fut donc conservé.

3.3 Électronique embarquée

Nos vibrobots possèdent différents composés électroniques utiles pour la mise en mouvement et la création d'interactions pouvant entraîner la formation de mouvements collectifs. Dans ces composantes, on peut y trouver une batterie, une masse tournante, un microphone, un détecteur infrarouge ou encore un magnétomètre. Cette électronique est programmable et permet d'imposer un algorithme dictant le comportement des vibrobots. Sur la Fig. 3.5 sont représentés schématiquement



FIGURE 3.4 – Vue du haut sur l’arène en bois avec un robot possédant un support noir sur son dos permettant la détection et le suivi de celui-ci.

toutes les composantes électroniques des vibrobots ainsi que leurs dimensions. Tous ces éléments sont activables en amont via un code modifiable à implémenter dans les robots à travers une micro-puce de programmation (Référence : ATSAM1-1D14A-M). Les codes seront ensuite gérés par un micro-contrôleur (Référence : AT-MEGA4-0808-M) servant de mémoire et de processeur. Le détecteur infrarouge (Référence : TSOP37438H) permet d’activer les robots à distance via une télécommande. Chacun de ses boutons joue un rôle d’activation différent et permet de modifier les propriétés du robot lors de l’expérience.

Le vibreur est une masse tournante sur un moteur (Référence : GNDDRV2603), lui-même contrôlé par un driver. Le vibreur est l’élément le plus important du robot. Il peut tourner dans le sens horaire et antihoraire jusqu’à atteindre une vitesse de rotation maximale. Le temps faisant tourner cette masse peut être choisi via l’algorithme contrôlant le robot. Plus ce temps augmente plus la masse va tourner de le sens horaire ou antihoraire. Ce temps sera appelé temps de rotation et dénoté par t . La rotation de cette masse entraîne un mouvement circulaire du robot ainsi qu’une translation permettant au robot d’avancer (cf. section 4.1).

Le microphone (Référence : CMEJ-0415-42-P) permet de détecter le son autour de lui et de transmettre cette information au robot. Une fois cette information traitée, elle peut être utilisée pour diriger le robot vers la source ou l’en éloigner. Cette fonctionnalité n’a pas été retenue pour nos travaux car nous nous sommes focalisés sur des interactions uniquement magnétiques et stériques.

La réorientation des robots se fera donc à partir d’un magnétomètre (Référence : MLX90393SLQ). Ce dispositif permet de mesurer l’intensité d’un champ magnétique selon les trois directions de l’espace. Les différents champs magnétiques mesurés seront dus à la présence d’un aimant produisant un champ magnétique d’une centaine de μT . Il est fixé sous l’arrière du vibrobot.

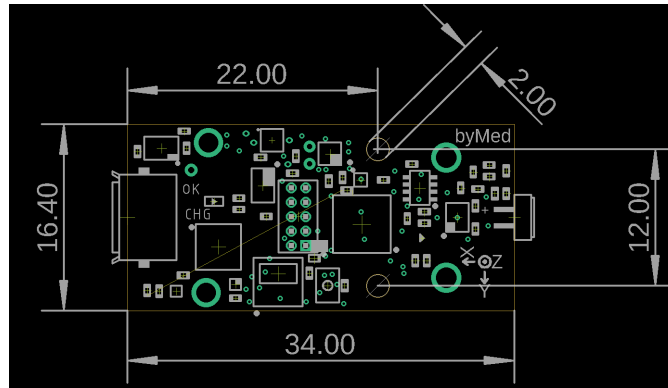


FIGURE 3.5 – Représentation schématique des composantes électroniques qui contrôlent les interactions du vibrobot. Les dimensions de cette carte imprimée sont données en millimètres.

3.4 Interactions

Deux grandes interactions existent entre les vibrobots : les stériques et les magnétiques.

3.4.1 Stériques

Les interactions stériques surviennent lorsque des vibrobots rentrent en contact. Comme ils possèdent chacun un corps dur impénétrable, ils rentrent en collision. La collision est inélastique et une partie de l'énergie des vibrobots est perdue mais la quantité de mouvement est conservée. Dès lors, les vibrobots vont modifier leurs directions.

3.4.2 Magnétiques

L'interaction magnétique est due à la présence des aimants fixés et détectés par le magnétomètre. En fonction de l'alignement des aimants, la valeur détectée par le magnétomètre sera différente selon la direction x , y , z . En effet comme il détecte l'intensité du champ pour chaque direction, les aimants sont donc orientés sur le robot d'une façon telle que, si l'aimant se trouve juste devant le capteur (selon l'axe x), l'intensité du champ selon x est maximale ou minimale selon l'orientation du dipôle magnétique.

Une fois les aimants placés sous chacun des robots, il faut être attentif à ce que les robots ne mesurent leur propre champ magnétique pour ne pas parasiter la détection des champs génères par les voisins. Il faut donc calibrer les magnétomètres pour que chaque robot possède une valeur de référence correspondant à l'intensité de son aimant. Dès lors si le robot dénoté i , possédant un aimant, veut s'aligner selon le robot nommé j , possédant lui aussi un aimant, il aura à mesurer la valeur du champ émit par j : B_j . L'intensité du champ magnétique mesurée par i va donc augmenter ou diminuer lorsque j s'approche ou s'éloigne de lui. Si j est hors du capteur de i , alors la valeur mesurée ne sera uniquement que B_{0i} , valeur

correspondante à l'aimant sous i et dans ce cas

$$\vec{B}_i = \vec{B}_{0i} \quad (3.1)$$

Dans le cas contraire, le champ mesurée par i sera le champ magnétique ressenti par la particule j plus son propre champ

$$\vec{B}_i = \vec{B}_j + \vec{B}_{0i} \quad (3.2)$$

On considérera que i et j sont alignés selon l'axe x lorsque cette valeur est maximale selon cet axe, c'est à dire lorsque B_{xi} est maximal et vaut la valeur du champ magnétique de son voisin et que les intensités mesurées par i selon les deux autres directions de l'espace (selon y et z) soient celles propre à son aimant : B_{0xi} et B_{0yi} . Une correction consistant à soustraire le champ magnétique parasite à celui mesuré a été apporté à l'algorithme. Celui-ci est différent pour chaque vibrobot donc comme la correction doit être modifiée pour chacun d'eux, elle fut mise à zéro et un bruit résiduel reste pour chacune des mesures du champ magnétique.

Une fois les champs magnétiques détectés, l'énergie magnétique produite par les différents champs sont mesurées. L'énergie magnétique s'exprime comme

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \quad (3.3)$$

où $\vec{\mu}$ étant le moment magnétique. L'aimant étant aligné selon l'axe x du robot, on va regarder l'énergie magnétique selon cet axe. Le vibrobot se déplace et va mesurer, tous les 100 ms, l'énergie magnétique selon x . Lorsqu'il détecte un minimum d'énergie, il se déplace vers celui-ci.

Une fois qu'il atteint ce minimum, si le champ énergétique autour de lui est énergiquement défavorable, le vibrobot stagne à cette position tout en effectuant de très faibles rotations permettant d'obtenir, via son orientation, différentes valeurs d'énergie magnétique. Si le profil énergétique est plus favorable dans une autre direction lors de son déplacement, le vibrobot va s'orienter dans cette direction et s'y déplacer afin de minimiser son énergie.

Notons que les aimants disposés sous les vibrobots permettent des interactions jusqu'au second voisin. Les vibrobots peuvent donc communiquer entre eux sur une distance de 11 cm. Si le vibrobot se bloque dans un coin de l'arène ou qu'il tourne trop longtemps dans la même direction, il va automatiquement se débloquer en effectuant un tour correspondant à une rotation de 400 ms.

3.5 Logiciels de traitement d'images

Les déplacements de vibrobots enregistrés par une caméra sont traités par un logiciel de traitement d'images nommé **ImageJ**. Ce logiciel permet d'analyser des images et d'effectuer des suivis de particules pour ainsi les analyser. Ce logiciel va alors découper les vidéos en images successives avec un taux d'images par seconde pouvant être choisi par l'utilisateur. Dans notre cas, ce taux est de 20 images par seconde, soit un intervalle de temps de 0.05 s entre chaque image. Cette fréquence est identique à la fréquence utilisée pour enregistrer nos vidéos. Une fois la vidéo découpée, il faut contraster chaque image. Du papier noir a donc été collé sur les robots. Ensuite, ImageJ transforme l'image RGB en noir et blanc. Nous obtenons des images ressemblantes à celles visibles sur la Fig. 3.6(b).

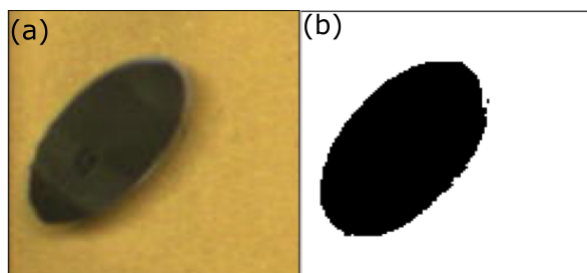


FIGURE 3.6 – (a) Image d’un robot en RGB avec le papier noir servant de couverture. (b) Image binarisée du même robot par la fonction *Make Binary* de ImageJ.

Une fois les images binarisées, l’étape suivante consiste à étalonner en des échelles de longueur. Comme ImageJ mesure tout sur une échelle du pixel, il faut donc prévoir une conversion d’échelle de pixels en centimètres. Pour cela, il faut sélectionner une distance connue sur le robot comme la longueur du grand axe (Fig. 3.7) et suivre la méthode suivante : *Analyse* → *Set scale*.

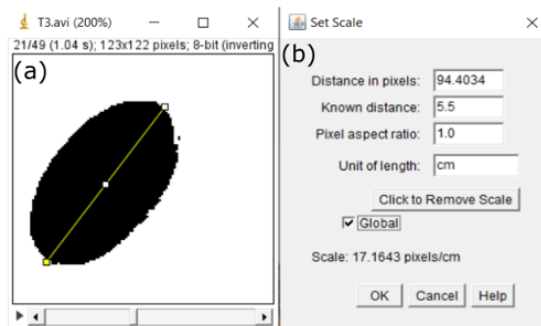


FIGURE 3.7 – (a) Sélection du grand axe du robot. (b) Fenêtre de l’option *Set scale* définissant la longueur du grand axe à 5.5 cm.

L’échelle étant donnée en centimètres, toutes les données renvoyées par le logiciel seront alors réalisées dans cette échelle. Une fois les configurations de base étant effectuées, on peut commencer le suivi des particules. Nos particules étant elliptiques, il faut cocher dans la fenêtre *Set Measurements*, *Fit Ellipse*. Cette fonction permettra au logiciel de chercher et détecter les particules elliptiques. Pour finir, il suffit de sélectionner *Analyse Particles* et de choisir un intervalle autour de 11 cm^2 pour l’aire (Fig. 3.8). Il nous assurera de détecter uniquement nos robots lors de l’analyse d’images.

Une fois toutes ces étapes effectuées, un fichier contenant les positions du centre de symétrie du robot sera obtenu. Il faut noter que le centre de symétrie n’occupe pas exactement la même position que le centre de masse. Il sera nécessaire d’en tenir compte lors de l’analyse des mouvements (cf section 4.1).

Les données récoltées sont traitées via un code en Python permettant de calculer les vitesses linéaires, angulaires, les angles lors de la rotation ou encore des grandeurs de diffusion comme le DQM ou le coefficient de diffusion. Le DQM se calcule

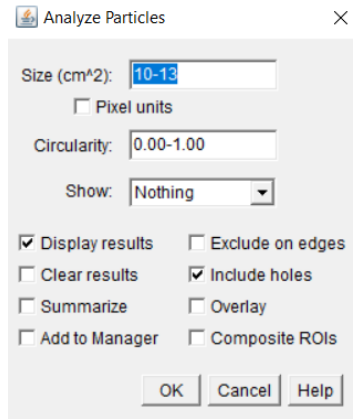


FIGURE 3.8 – Fenêtre lors de la sélection d’*Analyze Particles*, pour laquelle l’aire des particules à analyser se trouve entre 10 et 13 cm².

à partir de $t = 0$ sur des intervalles de temps de plus en plus larges. Il se calcule souvent en utilisant des échantillons selon différentes origines temporelles. Donc pour un temps d’expérience long, si on garde notre origine temporelle à zéro, on obtiendra des imprécisions de plus en plus importantes dans le DQM. Ces imprécisions qui peuvent conduire à des coefficients du DQM négatifs.

Lors du traitement d’images par ImageJ, il est possible que le logiciel intervertisse plusieurs robots. Cela provoque donc des trajectoires erronées. Pour remédier à ce problème, nous avons conçu un algorithme permettant d’intervertir leurs positions. On peut observer sur la Fig. 3.9, l’inversion des particules par ImageJ. En effet, on note des sauts dans les trajectoires entre les 3 vibrobots. Dès lors, le robot zéro obtient les positions du robot deux et inversement. Sachant que les vibrobots ont une vitesse inférieure à 2 cm/s, si l’écart entre deux positions dans un intervalle d’une seconde est supérieure à 2 cm, alors l’écart est considéré comme trop important. Dans ce cas, l’algorithme détecte alors un échange entre les vibrobots et cherche la position la plus proche survenant après l’échange. Cette position correspond à la continuité de la trajectoire du vibrobot si l’échange n’avait pas eu lieu. Une fois cette position détectée, l’algorithme corrige les trajectoires respectives pour obtenir le déplacement de chaque individu observable sur la Fig. 3.10.

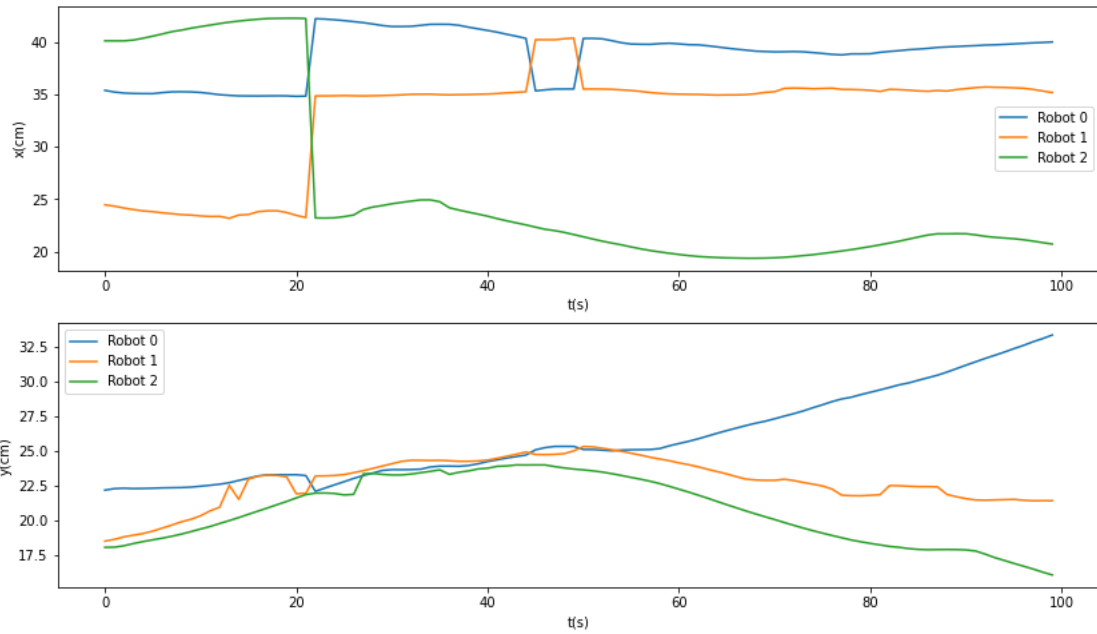


FIGURE 3.9 – Évolution de la position x et y du centre de symétrie de trois vibrobots au cours du temps.

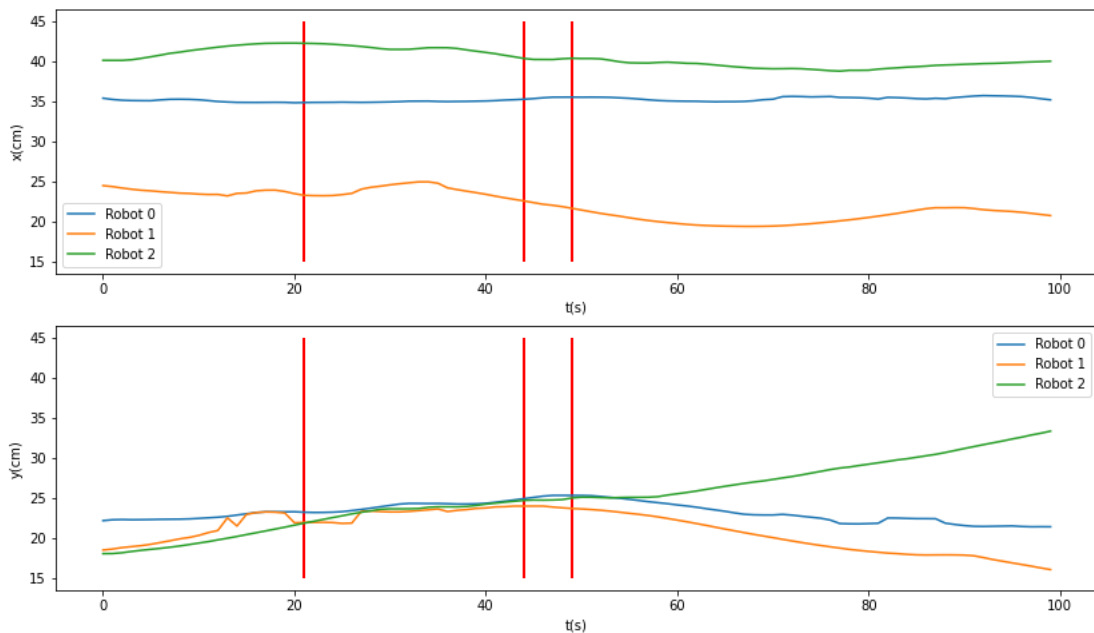


FIGURE 3.10 – Évolution de la position x et y du centre de symétrie des trois vibrobots après avoir été corrigées par l'algorithme. Les traits rouges indiquent à quel moment les modifications ont été effectuées.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Système à un vibrobot

4.1.1 Trajectoire simple

Avant d'entamer l'étude des mouvements collectifs d'un ensemble de vibrobots, il est important d'en étudier le comportement individuel. La mise en mouvement du vibrobot est provoquée par une masse rotative dont le temps de rotation à gauche et à droite peut être contrôlé et varie entre 0.3 s et 1.3 s. Le temps de rotation t du vibrobot est une grandeur représentant le temps requis pour effectuer une rotation d'un angle θ sur une durée de t vers la gauche ou la droite.

On a, premièrement, mis le vibrobot en mouvement avec un temps de rotation nul pour la rotation gauche tout en gardant la rotation à droite à une période constante. Le vibrobot se déplace donc uniquement en tournant sans but quelconque et il a été remarqué que le rayon de courbure R ne dépend pas du temps de rotation t . La trajectoire pour cette configuration a donc été réalisée et le centre de symétrie du robot a été localisé au cours du temps et tracé dans le plan de l'arène. Cette trajectoire est visible sur la figure 4.1(b) et possède une forme elliptique. Elle est probablement due au fait qu'on effectue un suivi du centre de symétrie qui tourne autour du centre de rotation qui est aussi en mouvement. Dû aux vibrations et aux déformations des pattes, le centre de rotation qui se trouve au niveau des pattes est aussi en mouvement et n'est pas fixe. S'il n'était pas en mouvement, les trajectoires obtenues devraient être circulaires.

Une approximation a donc été faite sur la trajectoire elliptique. On a supposé le rayon de la trajectoire circulaire comme étant la moitié du petit d'axe de l'ellipse. On obtient donc des cercles de rayon $R \simeq 2$ cm se déplaçant lorsque le robot est en rotation. Cette translation est uniquement due au robot qui, au lieu de tourner sur lui-même, se déplace lors de sa rotation provoquée par les vibrations du moteur. Remarquons que le rayon des cercles est environ la distance entre la masse tournante et les pattes arrières (Fig. 4.1(a)). Le centre de rotation O du robot correspond donc à la patte arrière gauche ou droite en fonction du sens de rotation. Si le moteur tourne vers la gauche, il va effectuer un moment force qui s'applique sur la patte arrière gauche et ainsi faire tourner le vibrobot dans ce sens.

Ce mouvement est identique pour la droite et le centre de rotation est donc proche de la patte arrière droite.

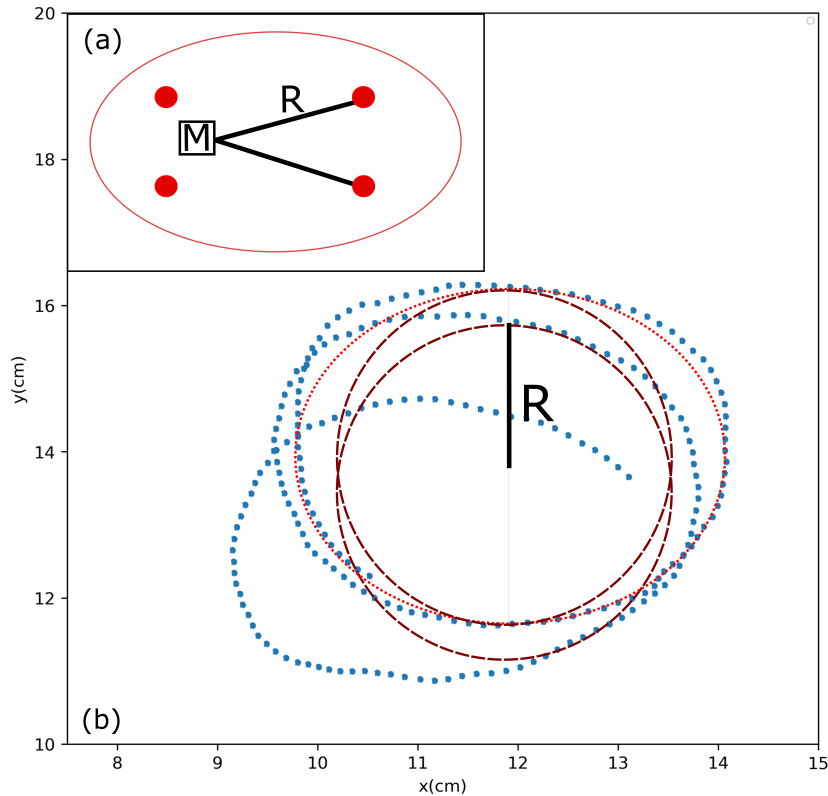


FIGURE 4.1 – (a) Représentation à l'échelle d'un vibrobot où M représente le moteur et les pattes sont représentées par les points rouges. R est la distance séparant les pattes arrières du moteur. (b) Trajectoire du centre de symétrie du robot ayant un temps de rotation vers la gauche nul et non nul pour la droite. Les pointillés bleus représentent le centre de symétrie au cours du temps. L'ellipse pointillée rouge représente une trajectoire elliptique effectuée par le centre de symétrie du robot. Les cercles en traits bordeaux sont l'approximation circulaire de rayon R du mouvement du vibrobot.

Un temps de rotation identique à gauche et à droite a été imposé et le déplacement du robot sur deux périodes de son mouvement peut être observé sur la Fig. 4.2. On aperçoit que l'axe principal de l'ellipse représentant le robot revient sur l'axe horizontal après chaque période de rotation. En effet, comme le temps de rotation vers la gauche et la droite sont identiques, l'angle effectué pour chacun de ces mouvements l'est aussi. On a donc une symétrie de rotation à gauche et à droite. Entre chaque image, il effectue donc une rotation équivalente à un angle variant selon le temps de rotation. Sur une période, le robot s'est donc déplacé horizontalement via un mécanisme de rotation induisant une translation.

Un modèle décrivant son déplacement a pu donc être établi. Le vibrobot se déplace donc d'une distance de translation x par rotation sur des arcs de cercle de rayon de courbure R . Cette étape de rotation correspond à l'étape 1-2 de la Fig. 4.3. Par la Fig. 4.2, on peut remarquer que l'arrière du robot se trouve toujours sur

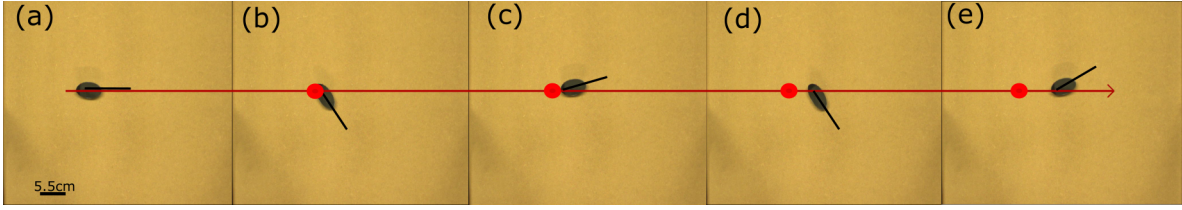


FIGURE 4.2 – Déplacement du robot pour un temps de rotation de 1.2 s. Chaque image est séparée d'un temps de rotation de 1.2 s. L'orientation du robot est représentée par un trait noir. Les cercles rouges indiquant la position précédente du robot. L'axe noir représente la direction du robot et se trouve dans le prolongement du grand axe du vibrobot.

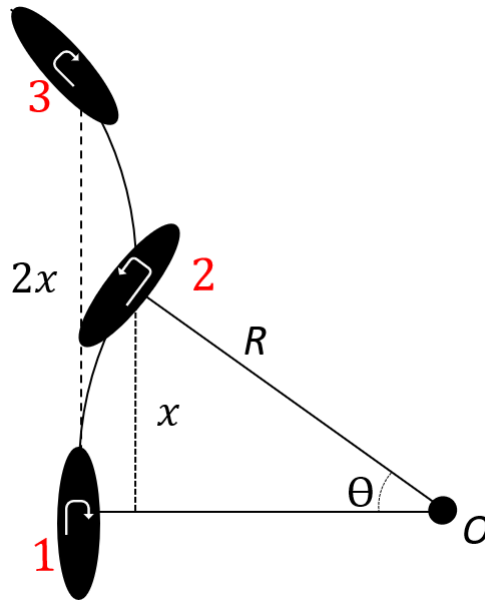


FIGURE 4.3 – Représentation schématique du mouvement d'un vibrobot via des arcs de cercle. O est le centre d'un cercle de rayon R parcouru lorsque le vibrobot possède un temps de rotation à droite. L'angle θ est parcouru sur une période de rotation. Le sens de rotation, non nul est indiqué par une flèche sur le vibrobot représenté par une ellipse. La situation 1-2 est une rotation à droite suivie de la rotation à gauche entre la situation 2-3. La distance totale parcourue sur deux périodes (entre 1-3) vaut $2x$.

l'axe de translation. Le schéma présenté sur la Fig. 4.3 est donc une représentation exagérée pour mieux comprendre le fonctionnement. Comme il se déplace en effectuant une rotation à gauche et à droite qui sont symétriques, il se déplace alors d'une distance de $2x$ (situation 1-3).

La distance x peut se calculer comme

$$x = R \sin \theta \quad (4.1)$$

avec R , le rayon de courbure et θ l'angle effectué lors du mouvement circulaire. La vitesse de la particule va donc dépendre de la trajectoire parcourue x sur un temps de rotation t . Dès lors la vitesse de translation instantanée s'exprime

$$v_T = \frac{R}{t} \sin \theta = \frac{R}{t} \sin (t\omega) \quad (4.2)$$

où ω représente la vitesse angulaire.

Lorsque θ est suffisamment petit ($\theta \ll 1$), on peut approximer $\sin \theta \sim \theta$. L'équation de la vitesse 4.2 peut donc s'écrire

$$v_T = \begin{cases} R\omega, & \text{si } \theta \ll 1 \\ \frac{R}{t} \sin(t\omega), & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.3)$$

Ensuite, le robot sera placé dans l'arène et mis en mouvement dans celle-ci.

Si sa trajectoire est purement rectiligne, il parcourra donc 55 cm. Ses trajectoires furent effectuées pour un ensemble de temps de rotation du moteur allant de 300 ms à 1300 ms par pas de 100 ms.

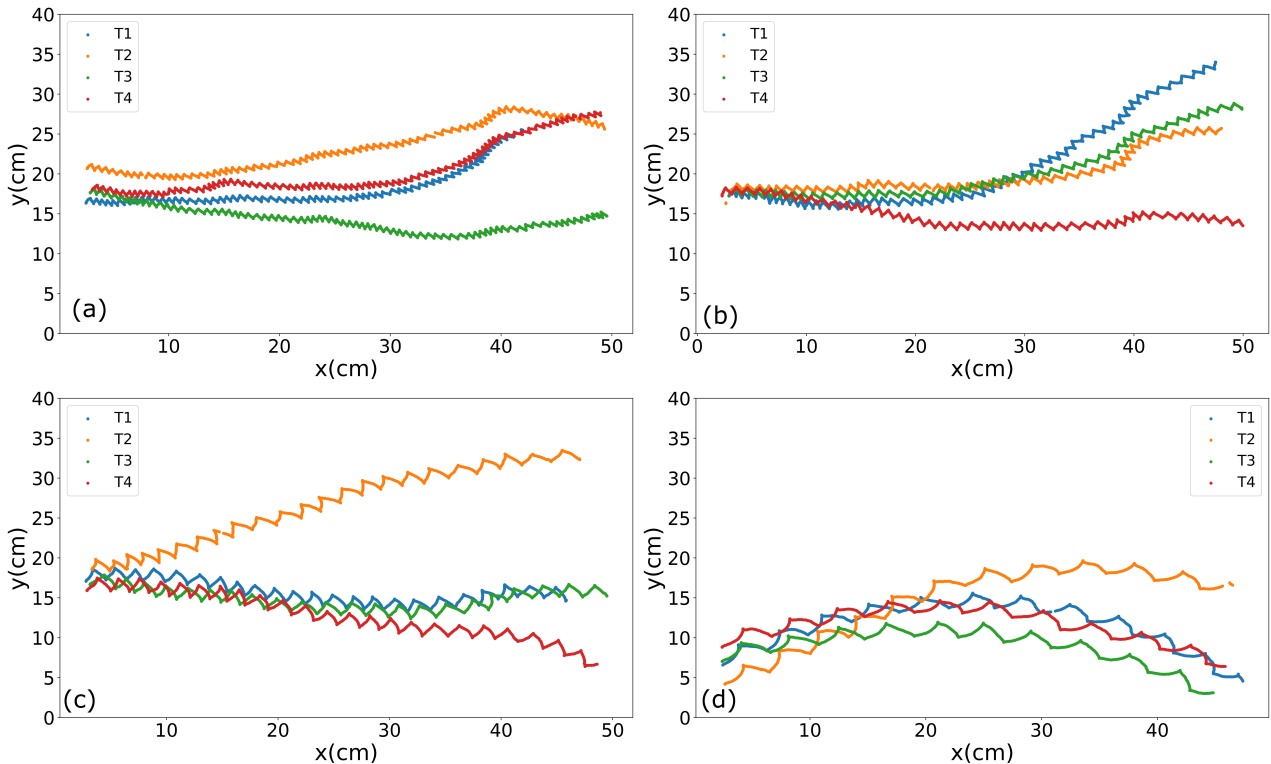


FIGURE 4.4 – Exemple de suivi du centre de symétrie du robot via *ImageJ* pour différents temps de rotation du moteur. (a) 400 ms. (b) 500 ms. (c) 800 ms. (d) 1200 ms. Chacune ayant été reproduite quatre fois.

On peut apercevoir sur les trajectoires observables sur la Fig. 4.4, un déplacement en forme de dents de scie. Le robot se déplace avec une combinaison de mouvements de rotation et de translation. Le centre de symétrie ne se trouve pas sur l'axe de rotation du robot. Il est donc en phase avec la rotation du robot et tourne autour de celui-ci. Ces mouvements de rotation vers la gauche et la droite sont donc visibles, et chaque changement de rotation est représenté par les sommets de chacune des dents. Notons que plus le temps de rotation du moteur augmente, plus la distance entre chaque sommet est importante, signe que le robot effectue une trajectoire circulaire plus importante.

Mais les trajectoires ne sont pas parfaitement rectilignes car la surface de l'arène n'est pas homogène et les frottements ne sont pas identiques en tout point de la surface. Dès lors la trajectoire peut être impactée. En effet, si les frottements au niveau des pattes sont différents, le mouvement de rotation est impacté, entraînant donc une modification de la trajectoire. Il est aussi probable que la masse tournante n'effectue pas exactement un temps de rotation gauche et droite identique à un moment donné. Cette différence de temps de rotation conduit vers une direction non rectiligne induisant un virage dans la trajectoire et donc des temps de parcours plus importants pour parcourir les 55 cm de l'arène.

Les temps de parcours pour l'ensemble des temps de rotation du moteur étant mesurés, on peut dès lors calculer la vitesse moyenne requise pour aller de bout en bout de l'arène. Ces vitesses représentées sur la Fig. 4.5 présente un maximum pour un temps de rotation de 0.8 s précédé d'une croissance et suivi d'une décroissance. Il existe donc une vitesse optimale en fonction du temps de rotation. Pour des temps inférieur 0.3 s, le robot se déplaçant à peine, on a supposé qu'il possédait une vitesse nulle pour ces valeurs. Après 1.3 s, le robot se déplace vers l'arrière avec une vitesse négative, on suppose donc qu'il existe une fenêtre de vitesses de translation non nulles et positives entre 0.3 s et 1.3 s. Sachant que le robot se meut via des rotations, lorsque que le temps de rotation est inférieur à 0.3 s, l'amplitude angulaire devient trop faible pour induire un mouvement. C'est pour cette raison que la vitesse moyenne obtenue observable sur la Fig. 4.5 tend vers 0 avant 0.3 s.

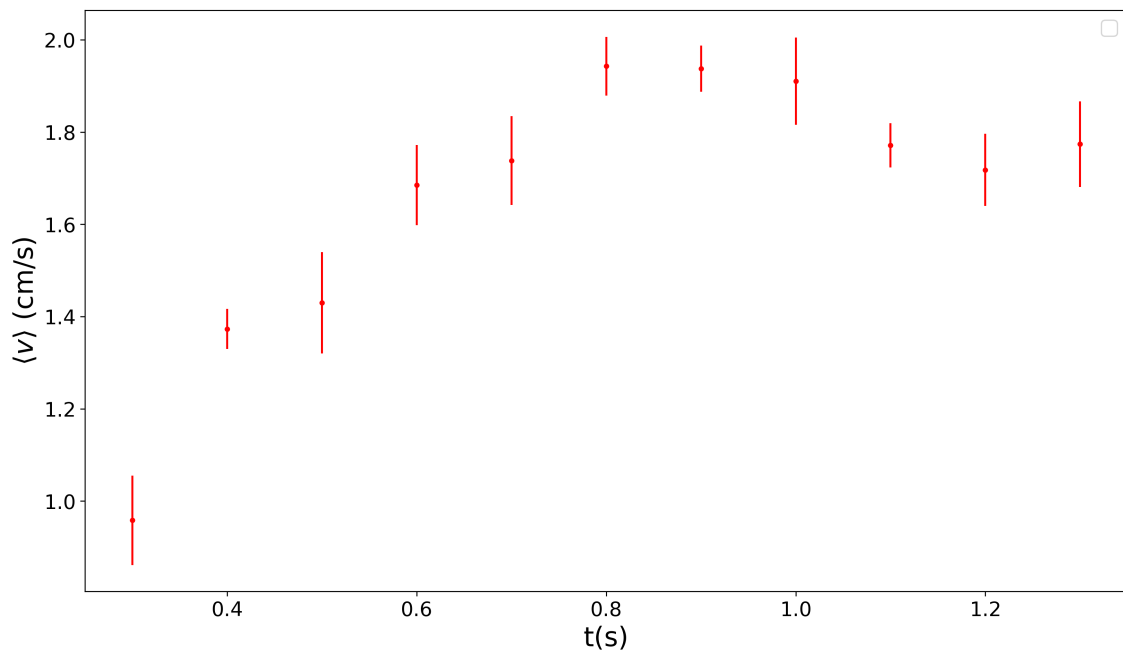


FIGURE 4.5 – Vitesse de translation moyenne en fonction du temps de rotation de la masse tournante pour un vibrobot qui parcourt une distance de 55 cm en traversant l'arène.

Une première analyse sur l'amplitude de l'angle effectuée lors de la rotation permet une approche quantitative sur le mouvement. Cet angle se trouve entre le vecteur passant par le grand axe du robot avant la rotation (grand axe étant aligné

selon l'axe x lors de la première image sur la Fig. 4.4) et ce même vecteur après avoir effectué la rotation. L'évolution angulaire moyenne $\langle\theta\rangle$ ayant été mesurée pour chaque temps de rotation t (Fig. 4.6), on peut constater une évolution de l'amplitude angulaire selon ce temps. Remarquons que θ n'étant pas mesuré sur tout le mouvement du vibrobot, mais uniquement sur une période de rotation t . La vitesse angulaire ω moyennée sur chaque intervalle de temps t et s'exprime comme

$$\langle\theta\rangle = \int_0^t \omega(t) dt \quad (4.4)$$

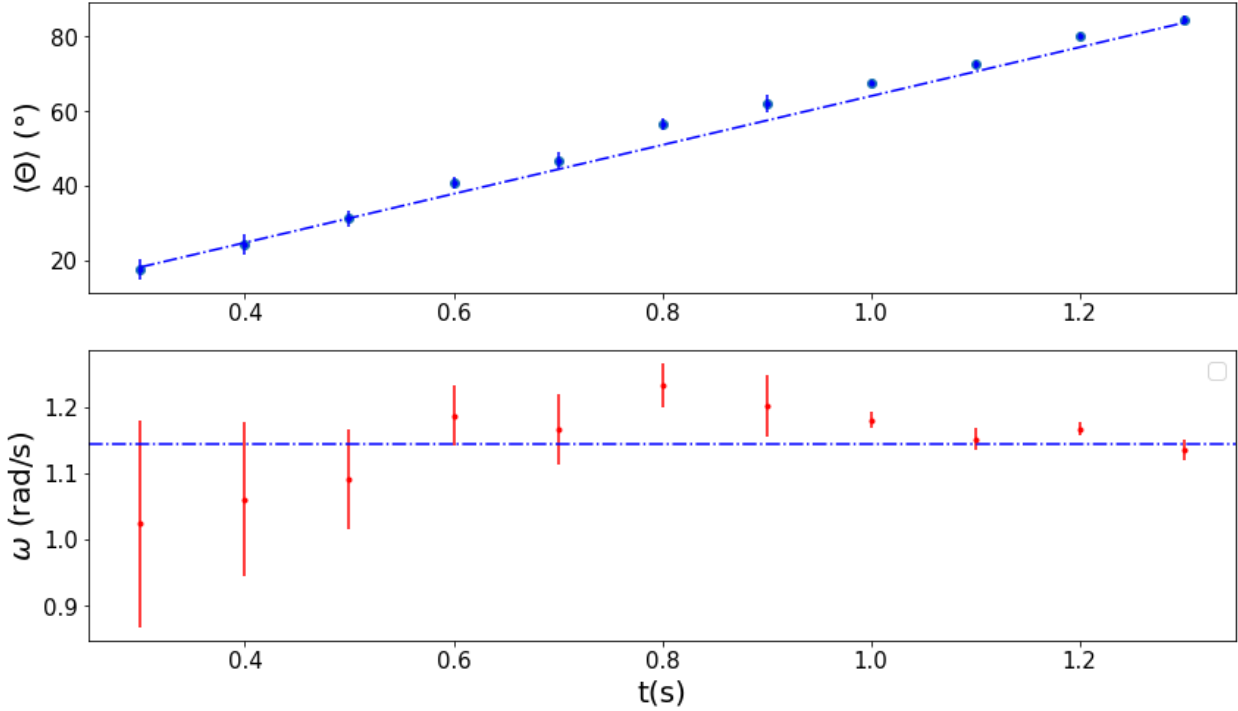


FIGURE 4.6 – Évolution de l'amplitude angulaire moyenne $\langle\theta\rangle$ effectué par le robot pour chaque temps de rotation t et de la vitesse angulaire ω obtenue à partir de $\langle\theta\rangle$ pour chaque temps de rotation t . Les barres d'erreur respectives ont été calculées sur un ensemble de plusieurs rotations successives. Les droites bleues correspondent à une vitesse angulaire constante de 1.14 rad/s.

Vu l'évolution des amplitudes angulaires par rapport au temps de rotation (Fig. 4.6), il existe donc une vitesse angulaire constante non nulle valant 1.14 rad/s. Cette vitesse angulaire est la pente de $\langle\theta\rangle$ en fonction du temps t . Cette valeur de 1.14 rad/s correspond à un plateau atteint par la vitesse angulaire ω .

L'évolution de la vitesse angulaire pour chaque temps de rotation du vibrobot (t) a été tracée sur la figure 4.6. Elle montre une croissance jusqu'à environ 0.6 s suivie d'un palier autour de $\omega_\infty = 1.14$ rad/s. Ce palier correspond à la pente observée sur l'évolution de $\langle\theta\rangle$ au cours du temps de rotation t . On a donc un temps de chargement avant d'atteindre la vitesse angulaire moyenne maximale. Cette évolution laisse penser à un modèle d'exponentielle saturante qui sera décrite dans le chapitre *Discussion*.

4.1.2 Mouvement dans un paysage énergétique

La caractérisation d'un vibrobot connue, on étudie son interaction avec un puits de potentiel, généré par un aimant suspendu au dessus de l'arène ; il attire les vibrobots dans son voisinage, chaque vibrobot est caractérisé par une zone de répulsion dû au corps dur du vibrobot (ZOR), une zone d'attraction (ZOA) et d'orientation (ZOO). La ZOA et ZOO étant les mêmes zones, on a une superposition de celles-ci contrairement au modèle, où ces zones sont bien délimitées. En effet, dès qu'il détecte un champ magnétique, il s'oriente et est directement attiré par celui-ci. Donc le mouvement des vibrobots n'est pas aléatoire mais contrôlé par la recherche d'un minimum énergétique. Dès lors, une fois l'aimant présent dans la zone de détection, le vibrobot est attiré par celui-ci. Si aucune force externe telle que des collisions ou une attraction magnétique n'est exercée sur le système, la particule y restera piégée.

En effet, l'algorithme contrôle le vibrobot via des capteurs sensoriels et force celui-ci à s'orienter vers le minimum énergétique le plus proche. Aucune force d'attraction ou de répulsion autre que la force motrice n'est exercée sur le vibrobot. Lorsqu'il ressent un minimum énergétique, on a une réorientation vers celui-ci. Cette réorientation est comparable à une force attractive. Dès lors, lorsqu'il s'éloigne du minimum, on a une modification de l'orientation de son mouvement pour y retourner. Cette modification de la direction peut être comparée à une force de rappel générée par le minimum.

Notre système ressemble donc à une configuration pour laquelle notre particule subit une force attractive vers le minimum énergétique dû à l'aimant et une force de rappel lorsqu'il s'en éloigne. Ce type de mouvement est comparable aux mouvements d'une particule dans un puits de potentiel. Pour ces raisons, l'aimant qui génère un bassin attractif attirant les vibrobots sera comparé à un puits de potentiel.

On obtient donc un mouvement dicté par l'envie du vibrobot à minimiser son énergie. Mais ses mouvements peuvent être comparés à une particule piégée dans un puits de potentiel pour laquelle les forces sont dues à des attractions dipolaires. On obtient donc des mouvements comparables pour des interactions totalement différentes.

Les vibrobots interagissent avec ce puits et le détectent si leurs distances par rapport à celui-ci est inférieure à son rayon d'interaction : R . Connaissant l'énergie initiale de chaque vibrobot et en mesurant sa variation à l'approche du puits, on peut déterminer le rayon d'attraction. En effet, si la variation énergétique mesurée par le vibrobot devenait trop importante, tout se produit comme si le vibrobot se trouvait dans un puits de potentiel de type harmonique (Fig. 4.7). Une fois dans ce puits, l'énergie ressentie par le vibrobot devient plus négative lorsqu'il s'approche de son centre. La distance provoquant cette transition énergétique correspond donc au rayon d'attraction valant $R \sim 7.28$ cm. Cette distance mesurée en calculant l'énergie magnétique ressentie loin de l'aimant

correspond au zéro énergétique et en regardant la variation d'énergie en approchant le vibrobot centimètre par centimètre en direction du centre de l'aimant où se trouve le minimum énergétique.

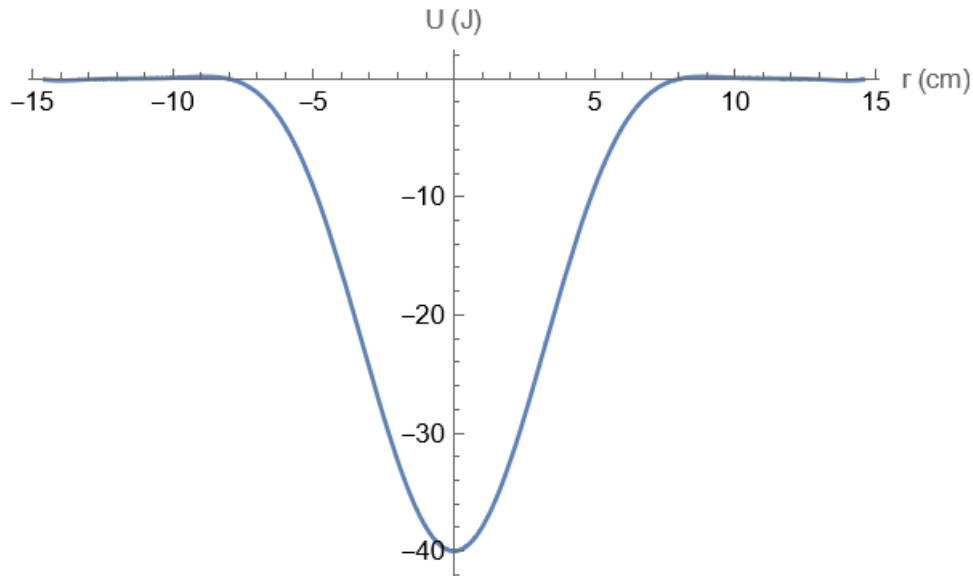


FIGURE 4.7 – Énergie potentielle de type harmonique pouvant être comparée au bassin attractif de l'aimant ayant un rayon d'attraction $R = 7.28$ cm. Hors du puits, l'énergie magnétique est supposée constante. Les valeurs de l'énergie magnétique du puits n'étant pas celle obtenue expérimentalement mais choisies aléatoirement à titre d'exemple.

Plaçons ensuite le vibrobot dans l'arène et regardons son déplacement dans le paysage énergétique présentant un aimant. Son déplacement est visible sur la Fig. 4.8. Comme vu précédemment, une analogie entre la détection de l'aimant et l'interaction avec un puits de potentiel peut être faite. Par conséquent, on supposera que l'aimant génère un puits de potentiel. Notons que l'énergie hors du puits, $U = 0$ est en pratique non nulle. Il existe de faibles variations provenant des bruits de champs magnétiques externes au système, principalement dû au champ magnétique terrestre. Ils peuvent induire des directions préférentielles lorsque les vibrobots ne se trouvent pas dans le puits et que la distance les séparants est suffisamment grande pour qu'ils n'interagissent pas entre eux sachant que l'interaction entre deux vibrobots se propage jusqu'aux seconds voisins. Néanmoins, l'aimant générant un champ magnétique assez fort, le vibrobot se dirige vers celui-ci pour minimiser son énergie lors qu'il se trouve à une distance inférieure au rayon d'attraction R .

Dans le cas des mesures prises pour la Fig. 4.8, l'aimant suspendu à un fil peut se mettre à osciller lorsqu'un vibrobot passe à proximité et l'attire. Cette oscillation entraîne un déplacement du puits de potentiel dans l'espace x et y . Ce problème a été corrigé pour les autres mesures en stabilisant l'aimant suspendu par plusieurs fils pour le maintenir à la même position.

Une fois le vibrobot, libéré dans l'arène, il va traverser différentes étapes. Pour commencer, il se déplace vers la position minimisant son énergie.

Ce déplacement dure approximativement 10 secondes (Fig. 4.8) pour le cas du robot dénoté : robot 0. Une fois le puits détecté et donc le rayon d'attraction franchi, le vibrobot se trouve piégé dans le puits et se dirige ensuite vers le centre de celui-ci sans s'y stopper. En effet, comme la source d'énergie est propre à lui-même, il reste perpétuellement en mouvement dans le puits de potentiel. Il se déplace donc de façon longitudinale à travers le puits et fait marche arrière pour minimiser son énergie lorsqu'il atteint l'extrémité du puits. Ce mouvement donne lieu à une configuration donnant des ellipses se translatant autour du centre du puits.

En géométrie, ces mouvements portent le nom d'hypotrochoïde. Cette configuration portera le nom de configuration « florale ». En effet, si l'aimant était bien stabilisé, les morceaux d'ellipses survenant pour les temps proches de 15 secondes, se répéteraient autour de celui-ci donnant une forme ressemblant à une fleur.

Néanmoins, le vibrobot peut s'échapper du puits s'il se trouve proche de l'extrémité du piège, soit à une distance R de son centre. En effet, ne pouvant détecter l'énergie derrière lui, il est possible qu'il ne détecte plus le piège lorsqu'il se trouve aux bords de celui-ci. Par ailleurs, le champ énergétique hors du puits n'étant pas totalement nul, il est possible qu'un minimum énergétique se trouve aux extrémités du puits. Si tel est le cas, le vibrobot au bord du puits ressentira cette perturbation et se dirigera vers celle-ci ; le vibrobot s'échappera du piège pour continuer à errer dans l'arène à la recherche d'un minimum dans le paysage énergétique.

Cet événement est visible sur la Fig. 4.8 après environ 30 secondes. Le vibrobot passe donc par une phase de mouvement direct, suivi d'une diffusion confinée lorsqu'il interagit avec le puits de potentiel en donnant la configuration florale. Finalement, il en sort et donne lieu à un nouveau mouvement direct.

En revanche, si notre vibrobot était une particule classique non auto-propulsée plongée dans un potentiel harmonique, elle se déplacerait jusqu'à atteindre le minimum énergétique, d'où elle ne pourrait s'extirper sans l'intervention d'une force externe. En effet, dans le cas classique, si une particule possède une certaine énergie et est lâchée dans un potentiel harmonique, elle oscillera dans celui-ci. Si des frottements existent, elle perdra son énergie pour terminer son mouvement au fond du puits lorsque son énergie atteindra zéro.

Ce système est semblable à un oscillateur harmonique à frottements visqueux. Sans frottements, il oscille avec une énergie équivalente à celle injectée. L'amplitude de ses oscillations est donc constante et son mouvement ne s'arrête jamais. Or, une fois les frottements introduits, son énergie décroît et l'amplitude de son mouvement diminue jusqu'à une position correspondant à sa position d'équilibre.

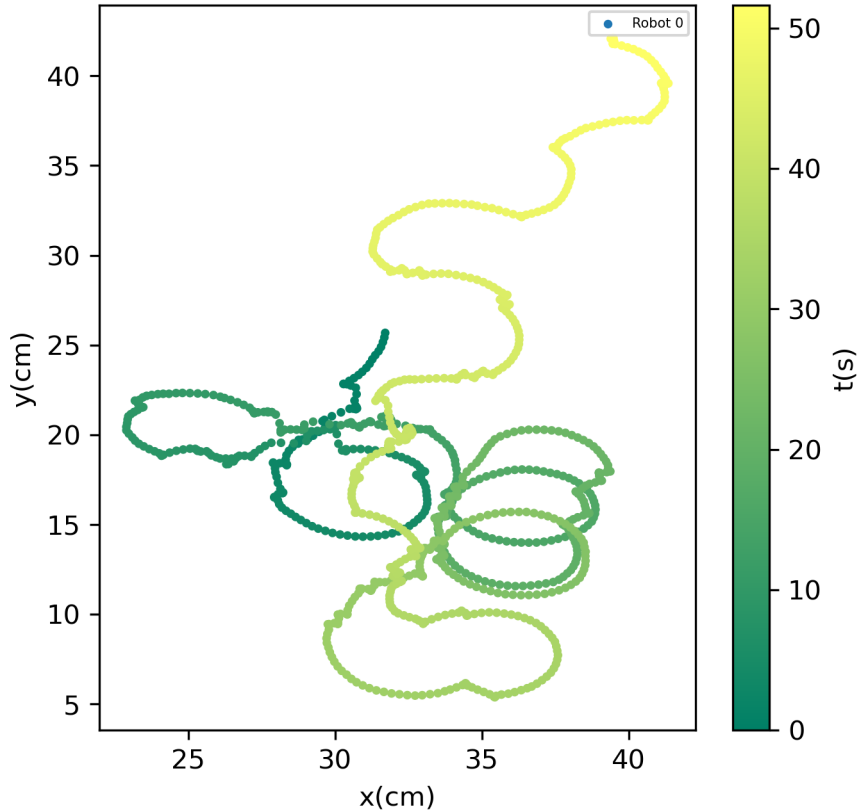


FIGURE 4.8 – Déplacement du vibrobot au cours du temps dans l’arène. Le puits de potentiel se trouvant à une position $x = 30$ cm, $y = 20$ cm et il oscille selon x et y lors du passage du vibrobot en dessous de lui.

4.2 Interactions entre vibrobots

Comme les vibrobots peuvent interagir entre eux, il est intéressant d’observer les dynamiques de groupe créées par un collectif de vibrobots. Dans cette section nous allons donc analyser les étapes de formation des structures émergentes.

4.2.1 Trois vibrobots

Pour observer l’interaction entre plusieurs particules actives, trois vibrobots ont été initialement placés dans un piège. Une durée de seize secondes pour le mouvement de ces trois vibrobots est représenté sur la Fig. 4.9. Une première observation sur le robot 2 permet de constater que celui-ci se déplace à peine sur cette période. Se trouvant juste sous l’aimant, il est piégé à la position correspondante à l’énergie la plus faible. Voulant minimiser son énergie mais son moteur n’étant jamais éteint, il se déplace donc avec un temps de rotation très faible autour sa position la plus stable énergiquement. Cette faible période de rotation le fait tout de même avancer très légèrement mais il reste néanmoins piégé.

Ne dépassant jamais le rayon d’attraction de 7.28 cm, ce vibrobot reste dans le puits de potentiel généré par l’aimant se trouvant en $x = 32$ cm et $y = 20$ cm. En revanche, ce petit déplacement ressemble à un phénomène de sur-diffusion

dans le piège. En effet il semble se déplacer de façon rectiligne sur le temps de l'expérimentation (Fig. 4.10).

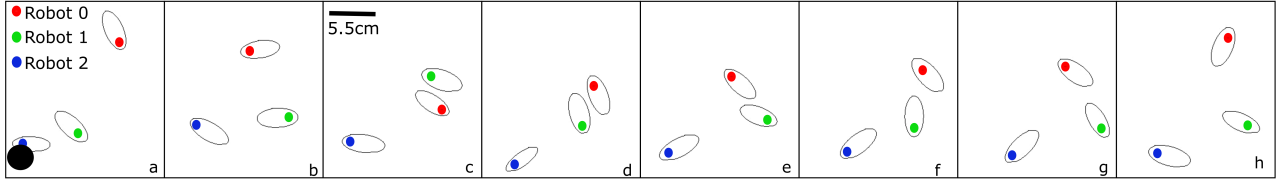


FIGURE 4.9 – Évolution du déplacement de 3 vibrobots placés aux alentours d'un piège représenté par le cercle noir étant situé à la position initiale du vibrobot numéro 2 tout au long de l'expérience. Chaque image ayant été prise toutes les 2 secondes. Les cercles colorés indiquent l'avant des vibrobots permettant un suivi de leur direction.

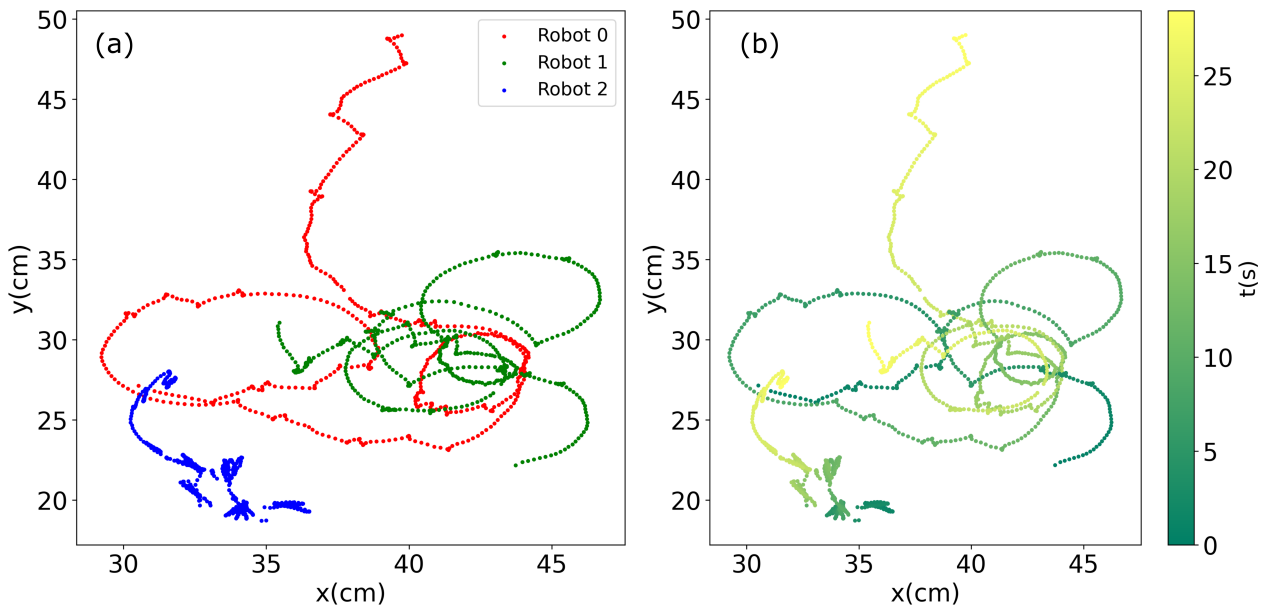


FIGURE 4.10 – (a) Représentation du déplacement des trois vibrobots visible sur la Fig. 4.9. (b) Déplacement des trois mêmes vibrobots avec une échelle temporelle. L'aimant générant le piège se trouve en $x = 32$ cm et $y = 20$ cm.

Les vibrobots 0 et 1, quant à eux, vont interagir et se regrouper hors du rayon d'attraction du piège. Lors de l'interaction entre ces deux vibrobots, une configuration de type tourbillon survient. Cette configuration est observée sur la Fig. 4.9 et dure environ 5.8 secondes. On observe sur la Fig. 4.10 que les trajectoires de ces deux vibrobots se recouvrent et forment des trajectoires circulaires sur un intervalle de temps d'environ 10 à 15 secondes. Elle se forme pour deux vibrobots lorsque ceux-ci se détectent avec une orientation antiparallèle. Cette orientation représentée sur la Fig. 4.9(b) apparaît juste avant la formation du tourbillon formé par les deux vibrobots.

Après détection, les deux vibrobots s'effondrent l'un sur l'autre pour former le tourbillon (Fig. 4.9(c)). Les vibrobots étant côte à côte et dans un sens opposé, les moments dipolaires s'alignent de façon antiparallèle, attirant les vibrobots entre eux.

Ceci conduit par la même occasion un moment dipolaire total du groupe plus important que celui de chaque individu isolé.

Le vibrobot voulant se diriger vers le minimum énergétique, il va donc tourner vers son voisin. Son partenaire agissant de la même façon, les deux vibrobots vont se mettre à tourner autour d'un axe de rotation.

Le groupe va donc posséder un moment angulaire non nul mais une vitesse de translation nulle. Les deux vibrobots vont ensuite tourner en phase jusqu'à une déstabilisation du système pour laquelle ils continueront à tourner tout en se séparant.

Cette déstabilisation (Fig. 4.9(e)) peut être due aux interactions stériques ou magnétiques amenant à la séparation et la destruction du système (Fig. 4.9(f)). Lors d'un tourbillon, les deux vibrobots se poussant l'un l'autre, il est probable que la répulsion soit à un moment donné plus grande, entraînant une déstabilisation du système. Outre cela, le moment dipolaire du groupe étant plus important que celui d'un seul individu, le groupe étant énergiquement plus favorable, il peut attirer d'autres vibrobots. Des collisions provoquées par les vibrobots attirés peuvent donc survenir et déstabiliser la structure. Cette situation n'est obtenue que pour dix vibrobots.

Lors de la déstabilisation de la structure, les deux vibrobots s'éloignent et ils se détectent de moins en moins. Ils vont dès lors détecter les champs magnétiques extérieurs provoqués par les autres individus et s'orienter selon ceux-ci, détruisant ainsi le tourbillon. Il y a donc cinq phases décrivant les tourbillons à deux vibrobots. Ces phases sont :

- Détection et orientation antiparallèle entre deux vibrobots (Fig. 4.9(b))
- Effondrement (Fig. 4.9(c))
- Rotation (Fig. 4.9(c)(d))
- Déstabilisation (Fig. 4.9(e)(f))
- Destruction (Fig. 4.9(g))

Une condition supplémentaire à la formation des tourbillons exige que les vibrobots ne se trouvent pas dans un piège. En effet, le tourbillon se forme à une distance $r \sim 10$ cm étant supérieur au rayon d'attraction ($R = 7.28$ cm) du piège. Si les vibrobots se trouvaient dans le piège, ce tourbillon ne pourrait se former car l'interaction magnétique avec le piège domine celle entre vibrobots. Ils ne pourront donc pas communiquer entre eux pour former de tourbillons. Dans cette situation, le mouvement des vibrobots étant dicté par le piège, ceux-ci se déplaceraient en effectuant la configuration florale décrite dans le cas d'un vibrobot piégé dans un puits harmonique (Fig. 4.8).

Lors de l'analyse de la DQM de ces trois vibrobots, on s'attend à observer une modification du coefficient α au cours du temps. Ce coefficient doit représenter la phase de recherche (super-diffusion) suivi de la rotation sur eux-mêmes (sous-diffusion) et enfin la destruction pour laquelle chaque robot retourne en phase de recherche (sur-diffusion). Cette analyse sera discutée dans le chapitre cinq.

Sachant que des tourbillons surviennent pour trois vibrobots, nous regardons les configurations qui peuvent surgir avec un plus grand nombre d'individus. La même expérience a été réalisée pour un nombre N de 4, 10 et 15 vibrobots.

Un point commun émergeant pour chacune de ces densités est le nombre d'individus pouvant être piégés. En effet, pour chacune des expériences, il a été observé qu'une moyenne de maximum deux vibrobots peuvent être piégés par le puits de potentiel.

4.2.2 Dix et quinze vibrobots

Appuyions notre regard sur les effets survenant pour une nombre $N = 10$ et 15. Pour un tel nombre de particules, des problèmes sont rencontrés lors du traitement de images via ImageJ et nous empêchent de récolter des données pour tracer les positions et le déplacement quadratique moyen de chaque particule.

ImageJ ne détectant que les particules dans un certain intervalle d'aire représentant l'aire d'un vibrobot, il est possible que lors du contact entre deux vibrobots, qu'il représente ces deux individus comme étant un seul vibrobot possédant le double de l'aire d'un vibrobot. Ce logiciel propose une méthode qui permet de supprimer des pixels autour de chacune des particules et ainsi de les séparer lorsqu'elles fusionnent. Malheureusement, certains vibrobots restent indistinguables par ImageJ même après la suppression de pixels. Ce détail empêche la détection de plusieurs individus et conduit donc à un manque de données. Nous représentons uniquement les résultats sous forme d'images enregistrées lors du traitement de données.

Une solution à ce problème est d'obtenir un contraste plus fin entre vibrobots en imprimant des masques noirs ne les recouvrant pas totalement pour éviter que les masques ne se recouvrent ou se touchent.

Pour 10 individus, on peut apercevoir sur la Fig. 4.11 que le piège capture au minimum un robot jusqu'à un maximum de trois pour un seul aimant. Le rayon d'attraction du piège étant légèrement plus grand que le grand axe du vibrobot et tenant compte des répulsions stériques entre vibrobots, on ne peut donc en capturer qu'un nombre limité. Aucun mouvement collectif n'est observé au long terme dans un piège. Les interactions stériques entre vibrobots dans celui-ci les entraînent à se repousser ; les perturbations sont trop importantes et déstabilisent donc le système. Aucune configuration de chaînes ou de tourbillons ne peuvent émerger à l'intérieur de ce potentiel harmonique.

Néanmoins, une formation de chaîne et de tourbillon peut surgir hors du puits. La chaîne dure environ 10 secondes. Elle se crée lorsque les individus se détectent et ne sont pas orientés de façon antiparallèle, c'est à dire, lorsque chaque individu se trouve dans l'angle de vue de son voisin le plus proche. On peut apercevoir sur la Fig. 4.11(a), le début de cette formation.

Deux individus sont pratiquement alignés et le troisième se trouve à l'arrière de la chaîne faisant face au moment dipolaire du vibrobot qui se trouve au milieu de la chaîne. Cette chaîne est donc une succession de moments dipolaires alignés

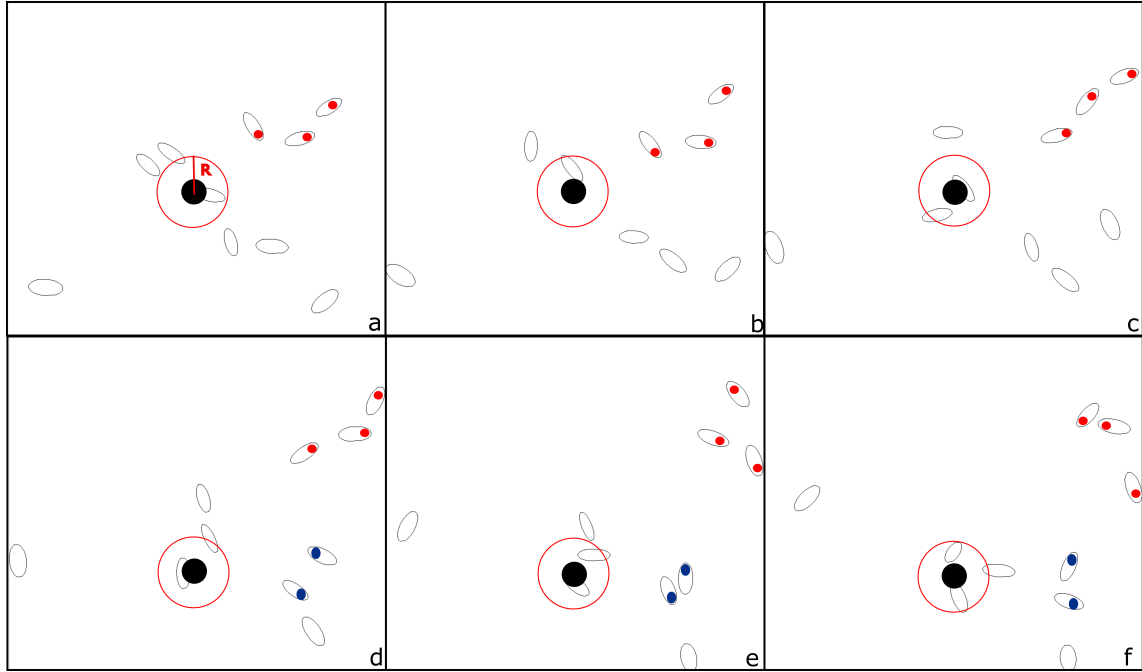


FIGURE 4.11 – Évolution du déplacement de 10 vibrobots placés aux alentours d’un piège sur une période de 12 secondes. Le piège représenté par le cercle noir avec un rayon d’attraction $R \sim 10$ cm. Chaque image a été prise toutes les 2 secondes. Les cercles colorés indiquent l’avant du vibrobot et permettent un suivi de leurs directions. Les rouges représentent ceux formant une chaîne et les bleus sont ceux donnant lieu à un tourbillon.

Une fois formée, la chaîne est donc composée d’un meneur qui cherche à minimiser son énergie, entraînant tout le groupe vers une situation énergiquement plus stable. Le meneur est suivi par des particules appelées suiveuses (Fig. 4.11(b)). L’information dans la chaîne se propage donc du meneur vers les suiveuses avec un décalage temporel. Ce décalage temporel implique un décalage dans le mouvement des vibrobots. En effet si le meneur tourne à gauche, l’information se propageant de vibrobots en vibrobots, le dernier de la chaîne sera en décalage par rapport au meneur.

Au vu des interactions magnétiques dipôles-dipôles, les vibrobots vont donc être attirés par le vibrobot en face d’eux et s’y lier. Les interactions jusqu’aux seconds voisins vont permettre une meilleure stabilité entre les suiveuses. Pouvant détecter deux vibrobots, le champ magnétique ressenti est une contribution des champs magnétiques émis par les deux voisins. Comme les vibrobots sont alignés, les moments dipolaires le sont aussi impliquant donc une énergie plus importante. Tout se passe comme si le vibrobot ressentait alors une énergie magnétique plus importante, stabilisant ainsi la chaîne. Une petite perturbation aura donc moins d’impact sur la stabilité entre vibrobots. Une plus grande distance d’interaction permet donc de mieux stabiliser la chaîne.

Dans le cas de la Fig. 4.11(d), cette chaîne se brise lorsque le meneur rentre en collision avec les parois, le décrochant de la chaîne. Cette chaîne se sépare donc en plusieurs morceaux possédant chacune un nouveau meneur. Cette première collision a donc déstabilisé la chaîne provoquant la cassure de celle-ci.

D'autres chaînes furent aussi formées pour dix et quinze vibrobots. Via ces données, il est montré qu'une chaîne peut non seulement se détruire par collision lorsqu'un vibrobot la traverse mais aussi par interaction magnétique. En effet, si la chaîne se situe proche d'un groupe de vibrobots énergiquement plus favorable car son champ magnétique est composé de l'ensemble des dipôles de chaque vibrobot ; un vibrobot de la chaîne peut donc rejoindre le groupe, entraînant donc sa brisure.

On obtient donc une configuration de chaîne oscillant le long du déplacement linéaire du groupe. Une telle configuration fut obtenue par le groupe de Sugawara [8], montrant la formation de chaîne oscillante (Fig. 2.5). Le mode errant observé dans leur recherche est présent dans notre système lorsqu'un groupe de vibrobots détecte le puits de potentiel et décide de migrer vers celui-ci. Les différentes étapes constituant une chaîne sont :

- Détection et orientation non antiparallèle entre deux ou plusieurs vibrobots (Fig. 4.11(a)(b))
- Suivi d'un meneur (Fig. 4.11(c)(d))
- Déstabilisation ((Fig. 4.11(e))
- Destruction (Fig. 4.11(f))

Un tourbillon est aussi observable sur la Fig. 4.11 représenté par les cercles bleus. Respectant les règles de formation d'un tourbillon (4.2.1), les deux vibrobots se rejoignent pour tourner en phase et former cette configuration pendant 4 secondes. La perturbation entraînant la destruction du complexe est la présence d'une particule voisine qui déstabilise la structure par interaction magnétique. On observe donc que toutes les structures finissent par disparaître.

Chapitre 5

Discussion

Dans cette section, notre regard se pose particulièrement sur les modèles mathématiques qui décrivent la dynamique des vibrobots. Une fois les modèles détaillés, on va analyser les mouvements dans un paysage énergétique grâce au DQM. Le DQM est un outil qui permet de distinguer les différentes phases de diffusion des configurations obtenues par nos vibrobots mais aussi de donner des informations sur la temporalité de ces effets. Les conditions de formations des chaînes et des tourbillons ayant été exprimées précédemment, nous allons discuter de l'impact du nombre de vibrobots sur ces systèmes.

5.1 Système à un vibrobot

5.1.1 Modèle du déplacement individuel

Lors de l'étude du déplacement du vibrobot, sa vitesse angulaire pour chaque amplitude angulaire moyenne $\langle\theta\rangle$ a été calculée sur chaque temps de rotation t . Une évolution croissante suivie d'un palier en $\omega_\infty = 1.14$ rad/s a été obtenue (Fig. 4.6). La vitesse de translation moyenne du vibrobot pour chaque temps de rotation se calcule comme

$$\langle v_T \rangle = \frac{R}{t} \sin(\langle\theta\rangle) = \frac{R}{t} \sin\left(\int_0^t \omega(t) dt\right) \quad (5.1)$$

pour $R \sim 2$ cm le rayon de courbure et $\langle\theta\rangle$ l'amplitude angulaire moyenne.

En première approximation, on peut supposer la vitesse angulaire comme étant une vitesse angulaire constante ω_∞ obtenue lors du plateau. Par cette approximation, comme la vitesse angulaire ne dépend plus du temps de rotation t , la vitesse de translation moyenne devient donc

$$\langle v_T \rangle = \frac{R}{t} \sin(\omega_\infty t) \quad (5.2)$$

Cette approximation implique que le vibrobot atteint sa vitesse angulaire maximale dès que le moteur est allumé. Sur la Fig. 5.1, on constate que l'approximation fonctionne pour des temps de rotation $t \geq 0.8$ s mais que la croissance observée expérimentalement avant ce temps n'est pas obtenue.

En effet, comme on suppose que la vitesse angulaire pour chaque temps de rotation est constante au cours du temps, on néglige l'effet de chargement requis pour la mise en mouvement du vibrobot afin d'atteindre la vitesse angulaire maximale.

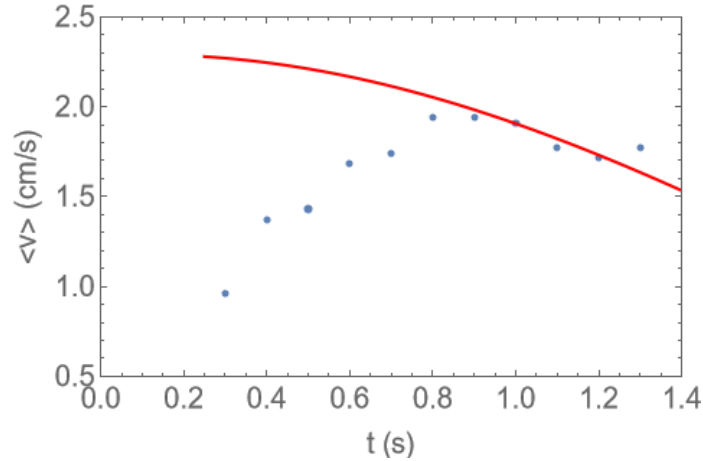


FIGURE 5.1 – Évolution de la vitesse de translation moyenne obtenue expérimentalement pour des temps de rotation t . La courbe rouge représente la vitesse de translation moyenne décrite par l'Eq. (5.2) où la vitesse angulaire en première approximation vaut $\omega_\infty = 1.14$ rad/s. Valeur qui correspond à celle obtenue une fois le plateau atteint.

Au vu de l'évolution de la vitesse angulaire (Fig. 4.6), une exponentielle saturante pourrait être utilisée pour la décrire. Cette fonction prendrait la forme d'une exponentielle possédant un temps de charge $t_0 = 0.16$ s qui correspond à 37% du temps pour atteindre la valeur maximale ω_∞ . Pour un temps de rotation inférieur à 0.3 s, les vitesses de translation sont presque nulles, la force motrice engendre un mouvement est trop faible. Il existe donc une valeur de vitesse angulaire seuil ω_s survenant, au temps seuil $t_s = 0.3$ s, qui doit être franchie pour induire le déplacement. Cette vitesse angulaire seuil est similaire à une force motrice seuil, devant dépasser les forces de frottement statiques aux niveaux des pattes pour mettre le robot en mouvement. On passera donc des forces de frottements statiques à des forces de frottements dynamiques.

L'exponentielle saturante décrivant l'évolution de la vitesse angulaire pour chaque temps de rotation prendra donc la forme suivante

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_s)}{t_0}\right)\right) + \omega_s & \text{si } , t > t_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.3)$$

Sur la Fig. 5.2, cette vitesse angulaire fut ajustée aux valeurs expérimentales. Sachant que le robot est immobile si le temps de rotation est inférieur à 0.3 s, on fixera t_s à cette valeur. La vitesse angulaire correspondante trouvée par l'ajustement, ω_s sera égale à 1 rad/s. Le robot devra donc franchir cette vitesse angulaire pour pouvoir vaincre les forces de frottement et ainsi se mouvoir.

Si $t \rightarrow \infty$, alors $\omega \rightarrow \omega_\infty = \omega_0 + \omega_s$ avec $\omega_0 = 0.17$ rad/s. Connaissant donc ω_s et ω_0 , la valeur maximale pouvant être atteinte pour la vitesse angulaire correspond à $\omega_\infty = 1.17$ rad/s. Cette valeur est proche de la pente de 1.14 rad/s mesurée sur le graphique représentant la variation de l'amplitude angulaire (Fig. 4.6).

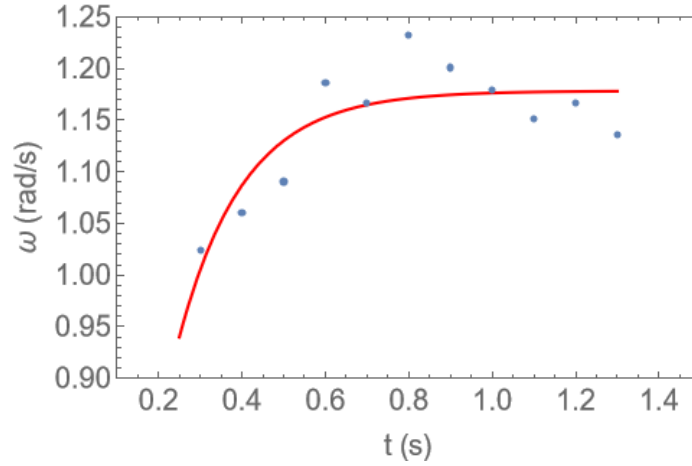


FIGURE 5.2 – Évolution de la vitesse angulaire pour chaque temps de rotation t décrite par l'équation (5.3) (en rouge) superposée aux vitesses angulaires obtenues expérimentalement (Fig. 4.6).

L'évolution de cette vitesse angulaire présente toutes les caractéristiques requises. En effet, avant le temps seuil de 0.3 s, la vitesse angulaire est nulle et une fois ce seuil passé, elle augmente pour tendre vers un palier correspondant à sa vitesse angulaire maximale. Dans ce palier, un maximum se prononce fortement à 0.8 s, celui-ci pouvant être potentiellement provoqué par un « overshoot » du moteur induisant une rotation plus intense pour ce temps de rotation. Ce maximum est semblable à une résonance qui se produit pour cette période bien définie. On a donc un maximum d'énergie accumulée qui conduit à un maximum dans la vitesse angulaire.

L'équation de la vitesse exponentielle saturante (5.3) peut être finalement introduite dans l'équation de vitesse de translation moyenne (5.1). La vitesse devient donc

$$\langle v_T \rangle(t) = \frac{R}{t} \sin \left((\omega_0 + \omega_s)t + \omega_0 t_0 \exp \left(-\frac{(t - t_s)}{t_0} \right) - \omega_0 t_0 \exp \left(\frac{t_s}{t_0} \right) \right) \quad (5.4)$$

L'évolution de cette vitesse moyenne de translation est représentée sur la Fig. 5.3 et les valeurs $\omega_0 = 0.17$ rad/s, $\omega_s = 1$ rad/s et $t_s = 0.3$ s, $t_0 = 0.16$ s sont celles utilisées pour obtenir la vitesse angulaire ajustée sur les données expérimentales (Fig. 5.2). Supposer que la vitesse angulaire du vibrobot suit un modèle d'exponentielle saturante pour tenir compte du temps de charge avant d'obtenir la vitesse angulaire maximale est un bon modèle pour décrire la dynamique du vibrobot. Pour des temps longs, les valeurs expérimentales sont légèrement plus grandes que le modèle car on ne tient pas compte de la résonance qui survient en $t = 0.8$ s mais on obtient bien la tendance observée expérimentalement.

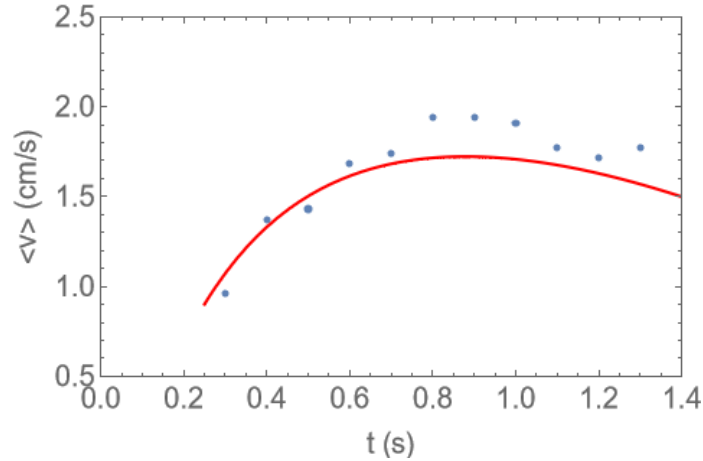


FIGURE 5.3 – Évolution de la vitesse de translation moyenne obtenue expérimentalement pour des temps de rotation t . La courbe rouge représente la vitesse de translation moyenne décrite à l’Eq. (5.4) où $\omega_0 = 0.17$ rad/s, $\omega_s = 1$ rad/s et $t_s = 0.3$ s, $t_0 = 0.16$ s soit les valeurs obtenues pour l’ajustement de la vitesse angulaire (Fig. 5.2).

5.1.2 Mouvement dans un paysage énergétique

Le déplacement d’un vibrobot dans un bassin attractif généré par un aimant (Fig. 4.8) donne une configuration de type florale. Cette configuration est obtenue lorsqu’un vibrobot piégé dans le bassin modifie son orientation à la recherche d’un minimum énergétique. Une recherche effectuée sur des hexbugs dans une arène parabolique vibrante, simulant un puits de potentiel harmonique, donna des résultats comparables [34]. En effet, lorsque le moteur de l’hexbug est activé, celui-ci ne pouvant se déplacer que vers l’avant, il traverse longitudinalement la parabole (Fig. 5.4). Au contraire, si le moteur est éteint et que la plaque vibre, on observe un déplacement parabolique. Il y a donc une transition de mode en fonction de la source d’énergie.

La combinaison des deux mouvements ci-dessus pourrait donc donner lieu à des cercles transitant par le centre de la paraboloïde. Une telle configuration de ces deux modes ressemblerait fortement à notre configuration florale effectuée par les vibrobots dans un puits de potentiel harmonique. Cette configuration étant définie par des ellipsoïdes en rotation autour du centre du puits harmonique. Cette forme d’hypotrochoïde représentant la configuration florale fut aussi obtenue dans le cas d’une particule active qui bouge de façon rectiligne sur un plan en rotation. Pour une période de rotation bien particulière, en regardant depuis un référentiel non inertiel tel que celui du laboratoire, la particule effectue cette configuration [37].

Dès lors, des particules actives, comme nos vibrobots, étant placés dans un piège généré par un aimant, peuvent effectuer des combinaisons de mouvements semblables à des particules actives uniquement grâce à des interactions stériques et des détections d’énergie magnétique via des capteurs. Ces particules se déplacent uniquement via des translations dans une parabole en vibration ou sur un plateau en rotation. Cette configuration florale effectuée par nos vibrobots dans un piège peut

donc être obtenue dans bien des systèmes tant que la particule active peut être en translation et qu'une rotation lui est admise indirectement ou non.

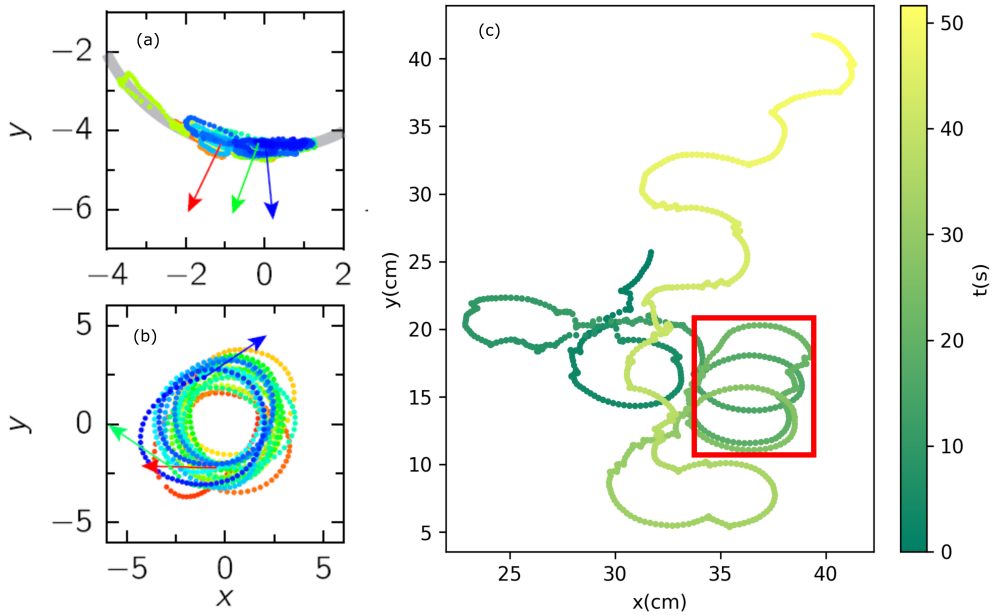


FIGURE 5.4 – La trajectoire (a) d'une particule active, appelée hexbug, dont le moteur est allumé et la plaque vibrante éteinte. (b) Situation inverse : le moteur est coupé et la plaque vibre [34]. (c) Trajectoire d'un vibrobot possédant une énergie de vibration intrinsèque et se déplaçant dans un puits de potentiel harmonique généré par un aimant qui se situe position $x = 30$ cm, $y = 20$ cm et il oscille dans le plan x, y lors du passage du vibrobot en dessous de lui.

Le DQM du vibrobot visible sur la Fig. 5.5, discuté dans le chapitre précédent a été calculé et tracé sur une échelle doublement logarithmique. Le DQM pour le cas de l'aimant permet de vérifier le type de diffusion obtenu est similaire au cas d'une particule piégée dans un puits de potentiel et d'étudier les différentes phases qui peuvent surgir dans un tel système. Elle s'exprime comme

$$\text{DQM} = Dt^\alpha \quad (5.5)$$

pour laquelle, D est le coefficient de diffusion et α l'exposant indiquant le type de diffusion. En échelle logarithmique, cette équation devient :

$$\log(\text{DQM}) = \alpha \log(Dt) \quad (5.6)$$

La pente de la courbe nous permet donc de déterminer la diffusion du système. Si :

1. $\alpha > 1$: Le système est en super diffusion. La particule effectue un mouvement balistique avec une direction préférentielle.
2. $\alpha = 1$: Le système est en diffusion normale. Ce mouvement correspond à une marche purement aléatoire.
3. $\alpha < 1$: Le système est en sous diffusion. La particule se déplace d'espaces confinés en espaces confinés. Ce cas survient principalement dans un système pouvant piéger les particules actives.

Comme décrit précédemment, le vibrobot dans un puits de potentiel (Fig. 4.8) passe par une phase de recherche dans le but de minimiser son énergie, le coefficient α attendu doit donc être supérieur à un. Ensuite, une fois le puits détecté, la particule y est piégée, elle effectue sa configuration florale pour finalement s'échapper du puits. Le coefficient passera d'une valeur de $\alpha < 1$ à $\alpha \geq 1$.

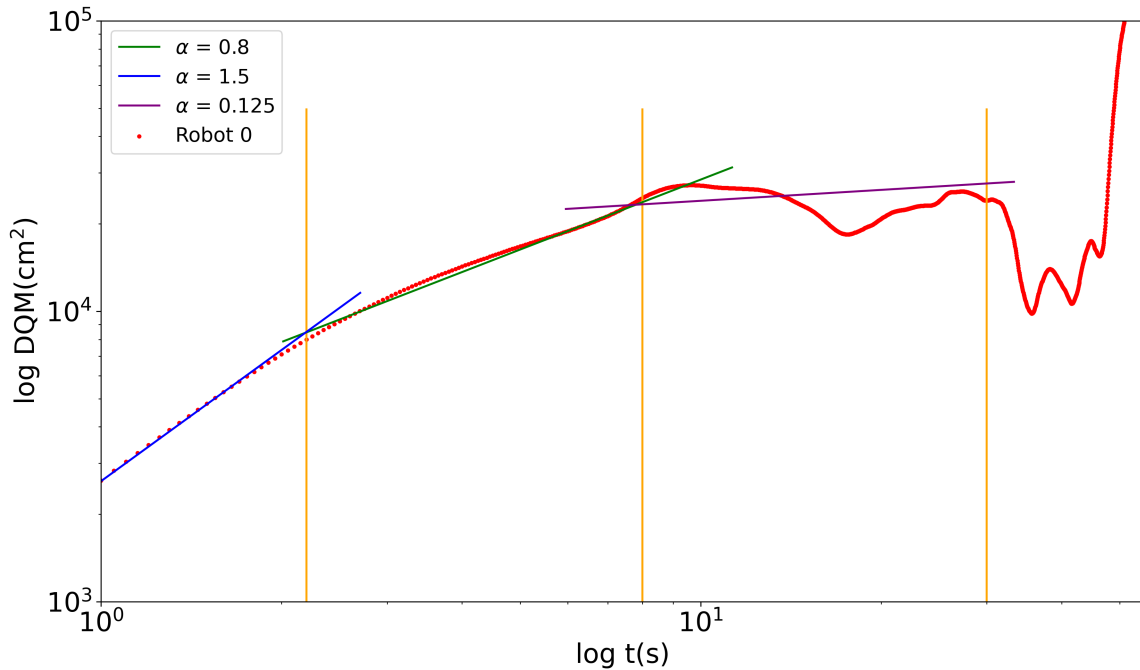


FIGURE 5.5 – DQM du vibrobot se déplaçant dans le puits de potentiel. Son déplacement étant visible sur la Fig. 4.8. Les différents coefficients de diffusion α ont été tracés sur des parties de courbes correspondantes aux différentes configurations de diffusion de la particule. Les barres verticales oranges correspondent environ au changement de diffusion pour les temps respectifs 2, 8 et 30 secondes

Lors de la phase de détection du puits, la pente de la courbe doublement logarithmique pour le DQM (Fig. 5.5) s'approche de 1.5. Dès lors, comme $\alpha = 1.5 > 1$, on est dans un mouvement en super diffusion. En effet, au début de son déplacement, le vibrobot ayant détecté la présence du puits, il se dirige d'une façon balistique vers celui-ci. Après 2 secondes, le coefficient α devient ensuite inférieur à un. La pente possédant un coefficient $\alpha \sim 0.8$, le système est en transition vers une sous-diffusion en passant d'abord par une diffusion normale. Cette étape dure 6 secondes pour laquelle le vibrobot se déplace sans aucun paterne jusqu'à être totalement capturé par le piège. Après cette phase, il est totalement piégé dans le puits et il se déplace longitudinalement dans celui-ci comme pour le cas de l'hexbug où son moteur est allumé (Fig. 5.4(a)) mais lorsqu'il atteint l'extrémité du puits, il tourne pour faire demi-tour et ainsi minimiser son énergie. Il va donc donner des trajectoires elliptiques dans le piège. Cette trajectoire est nommée florale. Le coefficient vaut $\alpha = 0.125 < 1$ signe qu'il est en sous-diffusion dans le bassin attractif dû l'aimant.

En revanche, le DQM étant mal défini pour des temps de parcours élevés, des variations importantes apparaissent aux alentours de 30 secondes et peut donner des coefficients négatifs n'ayant aucune signification physique. Après ce temps, on peut apercevoir sur la Fig. 5.4(c) que le vibrobot s'échappe du piège. Comme l'aimant n'était pas stabilisé, il oscillait au passage du vibrobot. À un moment donné, la distance entre l'aimant et le vibrobot est supérieure au rayon d'attraction R et le vibrobot parvient à s'extirper du piège. On peut donc supposer que le coefficient α , pour cette partie du déplacement, est au moins supérieur à un. Comme son déplacement en moyenne est rectiligne, il est caractérisé par un $\alpha > 1$.

Significatif d'un mouvement direct représentant le vibrobot s'éloignant du puits. Le vibrobot possédant un champ de vision, le magnétomètre ne mesure pas l'énergie derrière lui. Tournant le dos au puits, il ne le détecte donc pas et va alors se déplacer dans l'arène à la recherche d'un minimum d'énergie.

5.2 Système avec plusieurs vibrobots

Au vu des résultats montrés dans la section *Interactions entre vibrobots*, on observe deux nouvelles configurations : les tourbillons et les chaînes. Elles surviennent pour des conditions différentes mais les forces régissant leur formation sont identiques. Dans les deux cas, ces complexes surviennent lorsque les vibrobots détectent le moment dipolaire magnétique de leur voisin. On a donc une force magnétique comme force stabilisant le système.

À l'opposé, des perturbations peuvent détruire le système, soit directement via des interactions stériques entre vibrobots ou avec les parois soit encore indirectement par des interactions magnétiques. En effet, lors d'une collision avec un vibrobot ou une paroi, les vibrobots vont se séparer de leurs voisins et s'affranchir de l'attraction magnétique qui les stabilisait. L'effet déstabilisant peut aussi survenir indirectement lorsque le tourbillon ou la chaîne se trouvent proches d'un minimum énergétique. Celui-ci peut être dû soit à l'aimant, soit à la présence de groupes de vibrobots pour lesquels le moment magnétique total est la somme de tous les moments magnétiques individuels.

Lorsque les particules sont piégées dans le puits, elles ont plus de probabilité d'entrer en collision. Comme les interactions stériques ont un effet déstabilisant sur les chaînes et les tourbillons, aucune de ces configurations ne peuvent survenir dans le puits. En revanche, les interactions stériques peuvent permettre aux vibrobots de sortir du piège. En se repoussant, les vibrobots peuvent s'éloigner du piège et en sortir si les répulsions sont suffisamment grandes. Dans le cas où un vibrobot se trouve proche d'un autre aux alentours du rayon d'attraction, il peut aider ce dernier à s'en extraire par interaction magnétique. On a donc une compétition entre l'attraction magnétique via les moments dipolaires et entre les répulsions stériques et les attractions magnétiques provenant des perturbations externes au complexe. Cette compétition détermine la stabilité du complexe. De plus, la façon dont les vibrobots se rencontrent détermine le type de structure obtenu. Si la rencontre est antiparallèle, nous pouvons obtenir des tourbillons et si ils se rencontrent en étant à peu près alignées, on obtient des chaînes.

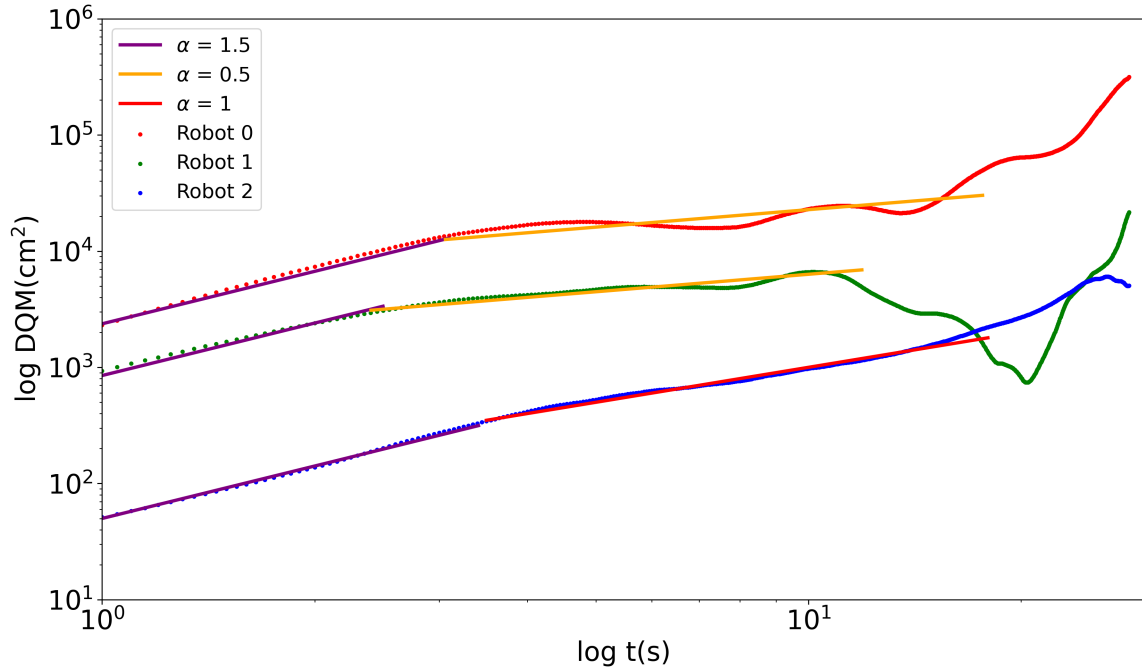


FIGURE 5.6 – Déplacement quadratique moyen (DQM) correspondant au mouvement représenté pour les trois vibrobots visibles à la Fig. 4.10. Les coefficients α caractérisent le type de diffusion correspondant à chaque vibrobot.

5.2.1 Le tourbillon

Dans la configuration de trois vibrobots, une règle sur la conception d'un tourbillon fut établie en 4.2.1. Connaissant les différentes étapes de la conception d'un tourbillon, il est intéressant de regarder la diffusion des deux particules requises pour ce phénomène.

Lors de la phase de détection et d'orientation, la pente α du DQM du vibrobot 0 et 1 vaut 1.5 (Fig. 5.6), on se trouve dans un cas de super diffusion.

En effet, les deux vibrobots se déplacent initialement à la recherche d'un minimum énergétique. Ils effectuent des cercles sur un intervalle de temps entre 2 et 10 secondes. Ces déplacements circulaires donnent des coefficients $\alpha = 0.5$. Lorsqu'ils se trouvent rapprochés ($t \sim 10$ s), ils se détectent pour former la phase appelée effondrement. Cette phase est la transition entre la recherche d'un partenaire et la création même du tourbillon. Les tourbillons restant aux mêmes coordonnées, le système est en sous diffusion. Cette transition est bien visible sur la courbe du DQM du vibrobot 0 et 1.

Les coefficients α donnant l'information sur le type de diffusion passent de $\alpha = 1.5$ à $\alpha = 0.5$, signifiant que le système passe de super à sous diffusion.

La dernière étape est la destruction du système qui survient après environ 15 secondes. Les vibrobots en question vont errer dans l'arène et la pente du DQM passe à un coefficient $\alpha > 1$.

Quant au vibrobot 2 coincé dans le piège, il se meut lentement sur une longue période. Dès lors, il semble se déplacer comme un mouvement direct composé de surplace. Sur la Fig. 4.10, on peut voir que la position du centre de symétrie est en

translation dans le piège mais reste aussi à la même position pour certaine période de temps puis va s'éloigner de l'aimant lorsque $t \gtrsim 20$ s. Le surplace est visible par les ensembles des centres de symétrie du vibrobot occupant environ la même position pour des temps différents allant de 0 à 15 secondes. Ce mouvement global correspond à une super diffusion au long terme dans le piège mais il est formé de diffusion normale dû au surplace. Le coefficient α se trouve donc entre 1.5 et 1. Si le temps d'expérimentation avait été augmenté, il se serait déplacer suivant la configuration florale et posséderait un coefficient α inférieur à 1. Le système étant confiné, le déplacement peut tendre uniquement vers de la sous diffusion et cette configuration fut étudiée à la Fig. 5.5. Le temps de l'expérience impacte donc fortement la type de diffusion.

5.2.2 La chaîne

Pour les chaînes, suite au problème de disparition de vibrobots lors du traitement de données, aucun DQM n'a pu être calculé. Mais, connaissant les différentes phases survenant pour des chaînes, on peut s'attendre à obtenir un système en super diffusion. La première étape étant une phase de déplacement à la recherche d'un minimum énergétique, le système sera alors en super diffusion car les vibrobots possèdent une direction privilégiée. Une fois que les vibrobots se détectent, ils s'orientent, s'alignent et forment une chaîne oscillante dirigée par le mouvement d'un meneur qui cherche à minimiser son énergie. Ce meneur pourra donc se lier à d'autres vibrobots et agrandir la chaîne ou bien se diriger vers le piège.

5.3 Effet du nombre de vibrobots sur les chaînes, les tourbillons et sur le piège

Ayant effectué ces expériences pour différents nombres de vibrobots, une comparaison sur la stabilité et l'apparition des différentes configurations a pu être effectuée sur un ensemble composé du même nombre d'expériences. En fonction du nombre de vibrobots, on observe des variations dans la durée des configurations et le nombre de fois qu'elles surgissent dans le système. Toutes ces variations ont été représentées dans un tableau récapitulatif (Tab. 5.1). Pour un nombre de vibrobots $N_{Vibrobots}$, on a observé un nombre moyen de tourbillons ($\langle N_{Tourbillons} \rangle$) formés de deux vibrobots et un nombre moyen de chaîne ($\langle N_{Chaîne} \rangle$) composés d'au moins deux vibrobots. Le temps de ces systèmes est mesuré à partir des expériences et est déterminé manuellement lorsque le complexe commence à se former et se termine quand il se détruit. Une fois la durée de chaque formation connue, une moyenne arithmétique peut être calculée pour la durée de vie de ces systèmes.

Comme on se base directement sur l'analyse des vidéos expérimentales par ImageJ, la précision est de l'ordre du dixième de seconde. Le nombre de fois que ces configurations surviennent a aussi été mesuré par comptage direct avec comme conditions que ces configurations doivent subsister au minimum deux secondes pour être comptabilisées.

Via le tableau regroupant toutes les variations du système en fonction du nombre de vibrobots (Tab. 5.1), on peut remarquer que le nombre moyen de vibrobots piégés : $\langle N_{Piégé} \rangle = 2$, peu importe le nombre de particules placées dans l'arène. Le puits ayant une dimension finie, il ne peut confiner qu'un nombre restreint de vibrobots. Mais, lorsque le nombre de vibrobots augmente, la quantité d'interactions stériques va croître, forçant les vibrobots à se repousser et donc à sortir du puits. Les répulsions peuvent être assez importantes pour ne laisser qu'un seul robot dans le puits. Néanmoins, avant de ne laisser qu'un nombre restreint de vibrobots dans le puits, tous essaient de se diriger au centre afin de minimiser leur énergie. Ce mouvement forme un troupeau de vibrobots dans le puits. Ils s'approchent de plus en plus les uns des autres, ils se répulsent jusqu'à ne laisser qu'un faible nombre de vibrobots. Ce nombre tend en moyenne vers deux.

$N_{Vibrobots}$	$\langle t_{Tourbillon} \rangle$ (s)	$\langle t_{Chaîne} \rangle$ (s)	$\langle N_{Tourbillons} \rangle$	$\langle N_{Chaîne} \rangle$	$\langle N_{Piégé} \rangle$
2	/	/	/	/	2
3	5.8 ± 1	/	1	/	2
4	/	4 ± 1	/	1	2
10	4 ± 2	7.6 ± 0.5	2	3	2
15	4.0 ± 1.7	3.6 ± 1.1	3	6	2

TABLE 5.1 – Évolution du nombre moyen de tourbillons et de chaînes observée ($\langle N_{Chaîne} \rangle$, $\langle N_{Tourbillons} \rangle$) avec la variation du nombre de vibrobots $N_{Vibrobots}$. La moyenne temporelle de chaque configuration ayant été rapportée ($\langle t_{Tourbillon} \rangle$, $\langle t_{Chaîne} \rangle$). $\langle N_{Piégé} \rangle$ est le nombre moyen de vibrobots piégés.

On sait déjà que pour deux vibrobots, aucune chaîne ni tourbillon n'est observé en présence d'un aimant car l'interaction magnétique du piège domine celle entre vibrobots. Les vibrobots sont uniquement piégés dans le puits de potentiel et effectuent la configuration florale indépendamment du mouvement de leur voisin. Il faut donc un nombre minimum de particules requis pour fabriquer des chaînes ou des tourbillons lorsqu'un puits de potentiel existe. Observant des chaînes pour trois vibrobots, ce nombre minimum requis est donc deux. Or, ces configurations peuvent exister uniquement hors du puits; il faudrait donc que les vibrobots s'échappent de celui-ci s'ils sont initialement placés à l'intérieur du piège. S'ils y restent piégés, aucune configuration particulière autre que la florale ou des troupeaux ne peut exister.

Lorsque le nombre de vibrobots N augmente, plus de tourbillons et de chaînes émergent. En effet, ayant plus d'individus, la probabilité d'interactions entre deux ou plusieurs vibrobots augmente. En contrepartie, cette augmentation d'interactions favorisant le nombre moyen de formation de chaînes et de tourbillons ($\langle N_{Chaîne} \rangle$ et $\langle N_{Tourbillons} \rangle$), va défavoriser la durée d'existence de ces systèmes. Si le nombre d'interactions augmente, on a donc plus de liaisons possibles mais aussi plus de perturbations dans le système. La probabilité que ces systèmes émergent est donc directement liée au nombre de vibrobots $N_{Vibrobots}$ et leur durée de survie diminue lorsque $N_{Vibrobots}$ augmente. Notons que les conditions d'émergence restent inchangées peu importe le nombre d'individus dans le système.

On peut aussi constater que malgré le nombre croissant d'individus, les tourbillons ne se forment qu'avec deux vibrobots. On ne pourra donc jamais obtenir des tourbillons constitués de nombreux individus comme c'est le cas pour des bancs de poissons tournant autour d'un centre de rotation ; on aurait pu s'attendre à observer ce phénomène lorsque les vibrobots interagissaient avec l'aimant. L'aimant génère un effet de condition de bords circulaires par son potentiel attractif et il est connu que des mouvements cycloniques surviennent pour des particules autopropulsées piégées dans une arène générant des conditions de bords circulaires [38] or cela n'est pas le cas pour nos vibrobots. Pour obtenir cet effet, il faudrait que les vibrobots ne s'échappent jamais du puits et soient toujours repoussés par les bords. La barrière de potentiel à franchir pour sortir de l'attraction de l'aimant devrait donc être plus importante. En revanche, pour une situation sans puits de potentiel et des moments dipolaires plus élevés selon la direction du grand axe de l'ellipse, les simulations nous révèlent des tourbillons de plusieurs individus (Fig. 5.7). L'augmentation des moments dipolaires est peut-être un facteur clef pour augmenter le nombre d'individus dans les tourbillons. Augmenter les moments dipolaires revient à augmenter la zone d'attraction. Pour le modèle des zones ZOA, ZOR, ZOO (Fig. 2.2), des tourbillons de plusieurs individus ont été obtenus lorsque la zone d'attraction est suffisamment grande.



FIGURE 5.7 – Simulation de PAP elliptiques possédant un moment dipolaire élevé orienté selon leur grand axe. Simulation réalisée par N.Vanesse.

On constate que les mouvements collectifs tels que les chaînes et les tourbillons sont donc des configurations énergiquement favorables pour chaque individu lorsqu'ils se trouvent loin d'un minimum énergétique. S'ils se trouvent dans un puits de potentiel, les vibrobots vont s'y déplacer pour minimiser leur énergie. Néanmoins, si la densité dans le puits augmente, les vibrobots vont se repousser et s'en expulser. Le nombre d'individus dans le piège va diminuer. La quantité de vibrobots dans le puits peut donc dépasser le nombre limite de deux. Il y a donc des échanges avec le puits mais au long terme, il capture qu'un maximum de deux vibrobots. Si un nombre réduit de vibrobots se trouvent cette région, ils vont y rester et y errer. Une configuration florale peut être obtenue et elle représente un individu explorant cette région.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion

La principale motivation de ce mémoire était de réaliser et d'étudier des vibrobots autonomes pouvant interagir entre eux via des interactions dipolaires magnétiques et stériques afin d'observer et de comprendre des configurations similaires à celles de divers systèmes biologiques. Les configurations obtenues dans ces systèmes sont diverses et variées allant de chaînes, de tourbillons constitués de plusieurs individus ou encore des troupeaux désorganisés.

Des particules elliptiques auto-propulsées à quatre pattes appelées vibrobots ont été fabriquées. Des patins modifiant les frottements ont été posés uniquement sur les deux pattes avant. Ils procurent des frottements qui permettent aux pattes de se déformer et de ne pas glisser sur la surface pour ainsi mettre le vibrobot en mouvement.

Ces vibrobots possèdent un ensemble d'électroniques et de capteurs pouvant être contrôlés par un algorithme modifiable afin de leurs dicter leur comportement. Il peut modifier le temps de rotation du moteur qui permet au vibrobot de tourner et ainsi de se déplacer. Pour les capteurs, le magnétomètre joue le rôle essentiel à la création des interactions dipolaires en détectant les aimants de chaque vibrobot.

On a étudié en premier lieu le mouvement individuel sans interaction magnétique. Il a été montré que le vibrobot se déplaçait par un mélange de rotation et de translation. La vitesse angulaire du vibrobot suivait un modèle d'exponentielle saturante. Par ce modèle, on a pu revenir sur la vitesse de translation et remarquer qu'il existait un maximum. En fonction des temps de rotation du vibrobot, une résonance a été observée pour la vitesse angulaire.

Un certain nombre de vibrobots a été placé dans une arène avec un aimant générant un bassin attractif dans le but de comprendre les interactions survenant lorsque des particules veulent minimiser leur énergie. Leurs interactions conduisent à la formation de configurations de chaînes, de tourbillons de deux vibrobots ou d'un mouvement individuel elliptique qualifié de floral qui survient lorsqu'un vibrobot est plongé dans un puits de potentiel.

De plus, des chaînes de vibrobots surviennent hors du puits de potentiel. Des tourbillons, non pas de plusieurs mais uniquement de deux individus sont observés ; ce résultat diffère des simulations [38], du monde vivant et des robots possédant une source d'énergie externe. Ces chaînes et tourbillons sont observables dans les systèmes vivants comme chez les poissons ou encore dans les colonies de fourmis. Ces configurations surviennent plus souvent mais pour des durées plus courtes lorsque le nombre de vibrobots augmente. La stabilité de ces systèmes est une compétition entre des interactions magnétique et stériques. Plus la densité de vibrobots augmente, plus les interactions sont nombreuses provoquant une plus grande probabilité de formations mais aussi de destructions de ces complexes.

6.2 Perspectives

La première étude a été basée sur la compréhension du déplacement du vibrobot. Celui-ci se meut selon des trajectoires elliptiques mais on a supposé qu'elles étaient circulaires. Le modèle de notre déplacement se basait donc sur une approximation et il peut dès lors être intéressant de créer un nouveau modèle en tenant compte de cette trajectoire elliptique. Une étude sur le mouvement des pattes peut aussi être effectuée par une caméra ultra rapide afin de connaître en détails leurs déformations. Ces deux améliorations peuvent ainsi améliorer la compréhension du déplacement des vibrobots.

On observe une résonance dans la vitesse angulaire au temps de rotation $t = 0.8$ s mais son origine est encore méconnue. Cette résonance est une autre piste à explorer pour mieux développer le modèle de la vitesse angulaire et ainsi améliorer au mieux celui de la vitesse de translation moyenne.

Il a été observé dans le mouvement d'un vibrobot que les trajectoires qui devaient être rectilignes pouvaient être déviées. En effet, les rotations du vibrobots n'étaient pas symétriques et engendraient des modifications dans sa trajectoire et donc dans le calcul de la vitesse. Cette asymétrie pourrait venir d'impuretés présentes sur l'arène qui modifieraient les frottements au niveau des pattes et donc impacteraient les rotations. Il faudrait une arène dénuée de tout défauts et possédant une surface bien homogène pour obtenir des frottements identiques en tout point. Une autre raison peut être un défaut dans la conception même du vibrobot qui amène à des temps de rotation à gauche et à droite différents. Une analyse plus approfondie sur le mouvement du vibrobot doit donc être effectuée.

Comme nos vibrobots interagissent par interaction dipolaire magnétique jusqu'au second voisin, il peut être intéressant d'augmenter la distance de détection et d'interaction. En augmentant celle-ci, différentes configurations de mouvements collectifs pourraient se manifester comme des tourbillons de plusieurs individus au lieu de ceux à deux vibrobots obtenus lors de nos expériences. Augmenter cette distance revient à utiliser des aimants plus puissants. Les vibrobots pourraient donc être directement attirés par les aimants et se coller les uns aux autres sans jamais se décrocher. Une technique d'encapsulation autour des aimants devrait donc

être développée pour empêcher ce procédé et ainsi obtenir des attractions dipôles-dipôles contrôlées par les magnétomètres. Néanmoins, agrandir la distance d'interaction implique d'accorder plus d'importance aux champs magnétiques parasites. Si la distance de détection augmente, ceux-ci auront donc plus d'impact sur le système. Mais pour certaines configurations comme les chaînes, augmenter cette distance peut aussi jouer un rôle stabilisateur.

Une interaction via le microphone peut être développée pour la mesure de distance entre le vibrobot et un potentiel obstacle comme les parois. Ce microphone permettrait de débloquent le vibrobot lorsque la distance mesurée est constante durant une période de temps trop longue. Si cette distance est constante, le vibrobot est donc coincé.

Les données des mouvements collectifs récoltées et analysées par ImageJ ont permis par la suite d'étudier leur trajectoire via l'analyse du Déplacement Quadratique Moyen (DQM). Le DQM est un outil de physique statistique mettant en évidence les processus diffusion émergeant lors des formations des configurations citée précédemment. Les DQM pour des nombres de vibrobots supérieurs à trois ne sont pas calculables. Lors du traitement d'images, la densité de vibrobots et le nombre de contacts est tel que ImageJ ne parvient pas à contraster suffisamment les individus pour les distinguer individuellement. Pour remédier à ce problème et ainsi récolter des données numériques, un meilleur contraste devrait être mis en place. Un masque noir devrait être imprimé et déposé avec précision sur le dos des vibrobots.

Toutes ces pistes sont donc à explorer pour améliorer et mieux comprendre le mouvement d'un vibrobot et les dynamiques qui surviennent pour plusieurs vibrobots. Une fois ces recherches effectuées, différents algorithmes pourront être rédigés dans l'espoir d'obtenir des nouvelles interactions et donc de nouvelles dynamiques de groupe. Ainsi, les vibrobots pourront donc devenir un outil viable pour améliorer la compréhension et la représentation du monde vivant.

Bibliographie

- [1] I. L. Bajec et F. H. Heppner, *Organized flight in birds*, *Animal Behaviour* **78** (2009).
- [2] A. James, M. J. Plank, et A. M. Edwards, *Assessing Lévy walks as models of animal foraging*, *J. R. Soc. Interface* (2011).
- [3] T. Vicsek et A. Zafeiris, *Collective motion*, *Physics Reports* **517** (2012).
- [4] O. Feinerman, *The physics of cooperative transport in groups of ants*, *Nature Physics* **14** (2018).
- [5] A. Deblais et al., *Boundaries Control Collective Dynamics of Inertial Self-Propelled Robots*, *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018).
- [6] J. Halloy et al., *Social Integration of Robots into Groups of Cockroaches to Control Self-Organized Choices*, *Science* **318** (2007).
- [7] C. Scholz, M. Engel, et T. Pöschel, *Rotating robots move collectively and self-organize*, *Nature Communications* **9** (2018).
- [8] K. Sugawara, Y. Hayakawa, T. Mizuguchi, et M. Sano, *Collective Motion of Multi-Robot System based on Simple Dynamics*, in *Human Robot Interaction*, edited by N. Sarkar, I-Tech Education and Publishing, 2007.
- [9] G. Baglietto et E. V. Albano, *Nature of the order-disorder transition in the Vicsek model for the collective motion of self-propelled particles*, *Physical Review E* **80** (2009).
- [10] H. Chaté, F. Ginelli, G. Grégoire, et F. Raynaud, *Collective motion of self-propelled particles interacting without cohesion*, *Physical Review E* **77** (2008).
- [11] F. Heppner et U. Grenander, *A Stochastic Nonlinear Model for Coordinate Bird Flocks*, 1990.
- [12] G. Ramos-Fernandez et al., *Lévy Walk Patterns in the Foraging Movements of Spider Monkeys (*Ateles geoffroyi*)*, *Behavioral Ecology and Sociobiology* **55** (2003).
- [13] P. M. Kareiva et N. Shigesada, *Analyzing insect movement as a correlated random walk*, *Oecologia* **56** (1983).
- [14] A. Martín-Gómez, D. Levis, A. Díaz-Guilera, et I. Pagonabarraga, *Collective motion of active Brownian particles with polar alignment*, *Soft Matter* **14** (2018).
- [15] C. W. Reynolds, *Flocks, Herds, and Schools : A Distributed Behavioral Model*.
- [16] T. Oboshi, S. Kato, A. Mutoh, et H. Itoh, *A Simulation Study on the Form of Fish Schooling for Escape from Predator*.

- [17] C. K. Hemelrijk et H. Kunz, *Density distribution and size sorting in fish schools : an individual-based model*, Behavioral Ecology **16** (2005).
- [18] I. D. Couzin, J. Krause, R. James, G. D. Ruxton, et N. R. Franks, *Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups*, Journal of Theoretical Biology **218** (2002).
- [19] U. Lopez, J. Gautrais, I. D. Couzin, et G. Theraulaz, *From behavioural analyses to models of collective motion in fish schools*, Interface Focus **2** (2012).
- [20] K. Sugawara, Y. Hayakawa, T. Mizuguchi, et M. Sano, *Collective Motion of Multi-Robot System based on Simple Dynamics*, in *Human Robot Interaction*, edited by N. Sarkar, IntechOpen, Rijeka, 2007.
- [21] K. Ried, T. Müller, et H. J. Briegel, *Modelling collective motion based on the principle of agency : General framework and the case of marching locusts*, **14** (2019).
- [22] M. Ballerini et al., *Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance : Evidence from a field study*, Proceedings of the National Academy of Sciences **105** (2008).
- [23] B. Pourprix, *Albert Einstein et la théorie du mouvement brownien*.
- [24] M.Kac, *Random Walk and the Theory of Brownian Motion*, The American Mathematical Monthly **54** (1947).
- [25] G. H. Weiss, *Random Walks and Their Applications : Widely used as mathematical models, random walks play an important role in several areas of physics, chemistry, and biology*, (2021).
- [26] L. Sjogren, *Lecture notes in Random Walk*.
- [27] E. A. Codling, M. J. Plank, et S. Benhamou, *Random walk models in biology*, Journal of The Royal Society Interface **5** (2008).
- [28] E. Renshaw et R. Henderson, *The Correlated Random Walk*.
- [29] F. Bartumeus, M. G. E. da Luz, G. M. Viswanathan, et J. Catalan, *Animal search strategies : A quantitative random-walk analysis*, Ecology **86** (2005).
- [30] A. R. Johnson, B. T. Milne, et J. A. Wiens, *Diffusion in Fractal Landscapes : Simulations and Experimental Studies of Tenebrionid Beetle Movements*, Ecology **73** (1992).
- [31] G. M. Viswanathan, E. P. Raposo, et M. G. E. d. Luz, *Lévy flights and superdiffusion in the context of biological encounters and random searches*, Physics of Life Reviews **5** (2008).
- [32] A. Kapanidis, S. Uphoff, et M. Stracy, *Understanding Protein Mobility in Bacteria by Tracking Single Molecules*, Journal of Molecular Biology **430** (2018).
- [33] P. C. Dauby, *Mécanique analytique I*, 2016.
- [34] O. Dauchot et V. Démery, *Dynamics of a Self-Propelled Particle in a Harmonic Trap*, Physical Review Letters **122** (2019).
- [35] F. Becker et al., *Spy bristle bot – A vibration driven robot for the inspection of pipelines*, (2014).
- [36] Capron, *Approche technique des matériaux*.

- [37] H. Löwen, *Active particles in noninertial frames : How to self-propel on a carousel*, Physical Review E **99** (2019).
- [38] D. Grossman, I. S. Aranson, et E. Ben Jacob, *Emergence of agent swarm migration and vortex formation through inelastic collisions*, New Journal of Physics **10** (2008).