

Propulsion d'un serpent robotique sur le sable

Comment l'étude un robot peut-il nous aider à comprendre le déplacement d'un serpent dans du sable et nous aider à mieux se mouvoir dessus ?

Kerryan Macé, Raphaël Levisse, Marianne Brugidou,
Eyal Benlolo



Table des matières

1 Présentation du problème	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	2
1.3 Cadre d'étude	2
1.4 Plan	2
2 Prise en main des moteurs et montage du robot serpent	3
2.1 Prise en main des moteurs	3
2.2 Montage du robot serpent	4
3 Explication du modèle et paramètres en jeu	5
3.1 Explication du modèle	5
3.2 Paramètres en jeu	5
3.2.1 Hypothèse	6
3.2.2 Étude du modèle	6
4 Mise en place des expériences et méthodes utilisées	8
4.1 But des expériences	8
4.2 Méthodologie des expériences	8
4.3 Exploitation des expériences	9
5 Résultats expérimentaux et analyse	11
5.1 Résultats expérimentaux	11
5.2 Cartographie de l'espace des mouvements accessibles	11
5.3 Vitesses maximales	12
5.3.1 Déplacements longitudinaux selon x	13
5.3.2 Déplacements latéraux selon y	13
5.4 Influence de l'inclinaison du milieu	14
5.5 Synthèse des expériences	14
6 Rencontre avec une chercheuse du Muséum d'Histoire Naturelle	15
6.1 Interrogations et problématiques ayant motivé la rencontre	15
6.2 Rencontre et réponses à nos questionnements	15
6.3 Actualisation des objectifs en conséquence et modifications faites sur la conception du serpent	16
7 Influence de l'orientation des servomoteurs dans le serpent	18
7.1 Etude des angles	18
8 Influence de la longueur du serpent	20
8.1 Mesure et analyse de la vitesse du serpent pour 12 et 18 moteurs	20
8.2 Comparaison de la vitesse du serpent en fonction de sa longueur	21
8.3 Cartographie des mouvements obtenus	21
8.4 Conclusion sur la longueur du serpent à privilégier	23
9 Etude de l'effort produit par les servomoteurs	24
9.1 Calcul de l'effort fourni par les moteurs	24
9.2 Influence du milieu sur l'effort fourni et anticipation d'un changement de milieu	24
9.3 Répartition de l'effort le long du serpent	25
10 Etude du déplacement du serpent sur une pente	26
10.1 Cas d'un substrat en bois composite	26
10.2 Ajout d'une fine couche de sable	27

10.3 Etude du déplacement sur une dune de sable	27
11 Etude des frottements	28
11.1 Intérêt de l'étude	28
11.2 Approche expérimentale utilisée	29
11.3 Résultats et analyses	29
12 Conclusion	30
13 Bibliographie	31

1

Présentation du problème

1.1. Contexte

Les intrusions dans les milieux granulaires¹ créent des interactions complexes, car les milieux peuvent présenter à la fois des comportements de solides et des caractéristiques fluides. Le milieu granulaire se déforme élastiquement sous contrainte comme un solide mais commence à s'écouler comme un fluide une fois que le seuil en contrainte est atteint. De grandes variations de la quantité de mouvement et de la fraction volumique du milieu granulaire dans différentes régions entraînent souvent une dynamique de système compliquée présentant des caractéristiques multiphasées. Les milieux, l'écoulement inhomogène et la nature multiphasique limitent souvent la modélisation aux méthodes de particules discrètes, contrairement aux fluides qui peuvent être résolus avec les équations de Navier-Stokes.

Cette situation pose particulièrement problème lors de la propulsion à la surface du sable, notamment à cause de phénomènes d'ensablement et de patinage, comme l'illustre le schéma suivant.

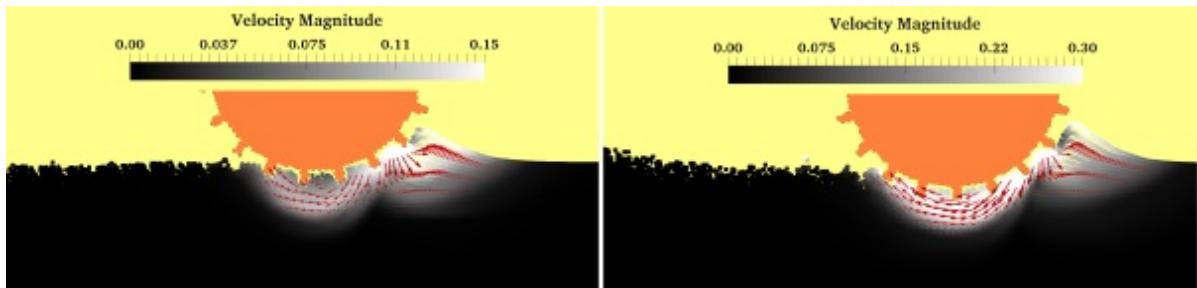


Figure 1.1: Illustration du problème de déplacement d'un véhicule sur du sable

Un exemple notable de ce problème est le rover Curiosity sur Mars qui peut rester bloqué de nombreuses heures sur le sol poussiéreux de Mars. Des robots pouvant se déplacer sur les milieux granulaires sont donc développés afin d'optimiser la circulation sur ces derniers dans l'avenir prochain. Ils se distinguent par la présence de circuits intégrés qui leur permettent de mettre en oeuvre les différents consignes acquises par les capteurs, et ainsi améliorer leurs déplacements en s'adaptant au milieu.

¹Milieu granulaire: Désigne dans notre étude une assemblée de grains dont les rayons sont supérieurs à $100\mu\text{m}$: (sable, gravier, céréales)

1.2. Problématique

Partout dans le monde, les serpents utilisent différentes stratégies pour évoluer dans de nombreux environnements différents : le sol solide, la surface de la mer, des forêts tropicales ainsi que des régions désertiques. En particulier, plusieurs espèces de serpents sont capables de se déplacer sur le sable par une combinaison d'ondulations latérales et de soulèvement de parties du corps. Dans ce projet, nous étudierons quels types de mouvements permettent aux serpents d'avancer sur le sable.

Comment l'étude d'un robot peut-il nous aider à comprendre le déplacement d'un serpent dans du sable et ainsi nous aider à mieux se mouvoir dessus ?

1.3. Cadre d'étude

Dans notre projet, nous allons utiliser les servomoteurs Dynamixel AX-12A de la société Robotis, de hauteur 5cm, que nous assemblons en série pour donner la forme d'un serpent.



Figure 1.2: Servomoteur Dynamixel AX-12A

Ces moteurs partagent des caractéristiques qui nous intéressent pour notre projet : à l'aide d'un code Python, nous pouvons contrôler chacun des moteurs indépendamment en branchant la tête du robot serpent (un des moteurs à l'extrémité du robot) à l'ordinateur qui possède le code Python. Nous pouvons contrôler plusieurs caractéristiques comme la fréquence d'exécution des commandes, les différents angles à appliquer etc. Nous pouvons également recueillir différentes informations en temps réel, comme la position, la vitesse, l'intensité, la tension, la température, etc.

1.4. Plan

Notre travail est divisé en plusieurs parties. Tout d'abord, nous verrons la prise en main des moteurs fournis et le montage du robot serpent. Ensuite, nous étudierons le modèle et les différents paramètres en jeu. Enfin, nous nous concentrerons sur la mise en place des expériences et des méthodes utilisées ainsi que l'analyse des résultats.

2

Prise en main des moteurs et montage du robot serpent

2.1. Prise en main des moteurs

Les servomoteurs que nous utilisons sont des moteurs AX-12A de Dynamixel.



Figure 2.1: Servomoteur AX-12A

Ces moteurs fonctionnent sur une plage de positions allant de 0 à 300°, réparties en 1024 tics. Au début, le mouvement du robot était très saccadé parce que la vitesse à laquelle chaque moteur atteignait une position était réglée avec une grande valeur, nous avons donc diminué cette vitesse, ce qui a rendu son mouvement plus fluide.

Item	Specifications
Baud Rate	7.843 [bps] ~ 1 [Mbps]
Weight	AX-12 (53.5 [g]), AX-12+ (53.5 [g]), AX-12A (54.6 [g])
Dimensions (W x H x D)	32 X 50 X 40 [mm] 1.26 X 1.97 X 1.57 [inch]
Resolution	0.29 [°]
Running Degree	0 ~ 300 [°] Endless Turn
Motor	Cored
Gear Ratio	254 : 1
Stall Torque	1.5 [N.m] (at 12 [V], 1.5 [A])
No Load Speed	50 [rev/min] (at 12V)
Operating Temperature	-5 ~ +70 [°C]
Input Voltage	9.0 ~ 12.0 [V] (Recommended : 11.1V)
Command Signal	Digital Packet
Physical Connection	TTL Level Multi Drop Bus Half Duplex Asynchronous Serial Communication (8bit, 1stop, No Parity)
ID	254 ID (0~253)
Feedback	Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc
Gear Material	Engineering Plastic(Full)
Case Material	Engineering Plastic(Front, Middle, Back)

Figure 2.2: Caractéristiques des servomoteurs (emanual.robotis.com)

Ce que nous devons retenir de ces caractéristiques sont le couple maximal et la vitesse maximale à vide qui sont respectivement de 1,5 N.m et de 59 tours par minute.

2.2. Montage du robot serpent

Le robot est constitué de 7 moteurs imbriqués les uns dans les autres avec une rotation de $\frac{\pi}{2}$ à chaque fois. Le premier a ainsi une position à 0 rad, le second à $\frac{\pi}{2}$, le troisième à 0 rad, etc. Après un moteur sur deux, il y a un cercle noir avec un plat en dessous afin de pouvoir poser le serpent à plat : le but était de réaliser une section du robot qui ressemble à la section des serpents. Nous avons ensuite rajouté 5 autres moteurs au robot pour en avoir 12 au total, pour pouvoir imposer un nombre de longueur d'onde que l'on souhaite. Le serpent est ensuite mis dans une chaussette avec un tissu possédant une texture similaire à une peau de serpent.



(a) Robot avec 7 moteurs



(b) Robot avec 12 moteurs

Figure 2.3: Robot avant et après le rajout de 5 moteurs

3

Explication du modèle et paramètres en jeu

3.1. Explication du modèle

Dans la nature, certains serpents et particulièrement ceux se déplaçant sur des milieux granulaires comme le sable ont tendance à soulever ou à appuyer certaines parties de leur corps. C'est donc ce moyen de locomotion que nous avons tenté de reproduire (side-winding et slithering). Cela se fait en propageant deux ondes au niveau du serpent une latérale et une dorso-ventrale [1]. L'utilité de placer les moteurs à 90° les uns par rapport aux autres est alors intéressante : on propage une onde sur les moteurs de numéro pair et une autre sur les moteurs de numéro impair.

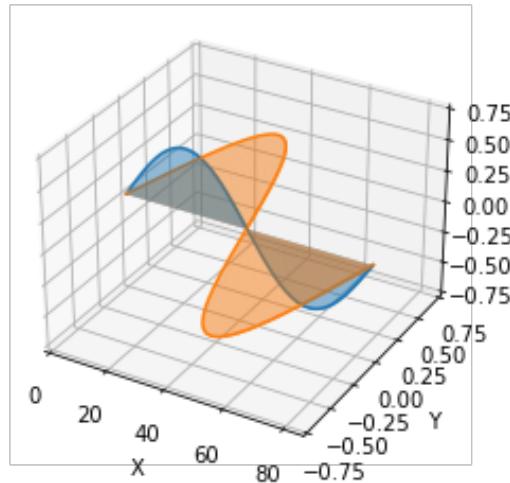


Figure 3.1: Mouvement des deux ondes

3.2. Paramètres en jeu

Le serpent fait au total 90 cm pour 12 moteurs (longueur notée L). On propage deux ondes avec des amplitudes angulaires, θ_i et θ_p , des fréquences des vecteurs d'onde, f_i et f_p , et déphasées de $\Delta\phi$, avec les termes $-k_is$ et $-k_ps$ représentant la propagation des ondes :

$$\theta_t = \theta_0 + \theta_i \sin(\omega_i t - k_i s)$$

$$\theta_{dr} = \theta_0 + \theta_p \sin(\omega_p t - k_p s + \Delta\phi)$$

Au niveau de l'implémentation, on suit la même logique en réajustant la position du moteur en fonction d'une valeur moyenne de 512 tics.

3.2.1. Hypothèse

On prendra dans le cas général $k_1 = k_2$, $\omega_1 = \omega_2$, et $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ avec $\lambda = \alpha L$ où $\frac{1}{\alpha}$ correspond au nombre de longueurs d'ondes dans le robot à chaque instant. Du fait du nombre limité de moteurs et que ce nombre semble s'approcher de 1.3 à 2 dans la littérature, il sera pris égal à 1.

A la lecture des documents, il semble y avoir selon les valeurs de paramètres différents modes de déplacement qui seront décrits plus tard.

3.2.2. Étude du modèle

Une fois ce modèle défini, il a fallu se pencher sur son étude, ses limites et ses caractéristiques. Pour cela, nous avons d'abord étudié le lien entre l'angle numérique entré dans le programme et l'angle réel créé par le robot[3]. On procède de la manière suivante : on retire la composante temporelle, ce qui "fige" le robot puis on utilise le logiciel Fiji (téléchargeable ici : <https://imagej.net/software/fiji/downloads>) pour mesurer distances et angles en pixels. On a donc également normalisé la taille des pixels en fonction du positionnement de la caméra en limitant le cadre et donc l'effet grand angle. On obtient selon les x, 16.28 pixels/cm et 16.41 pixels/cm selon les y. On a alors une relation entre l'angle réel et l'angle à entrer dans le programme.

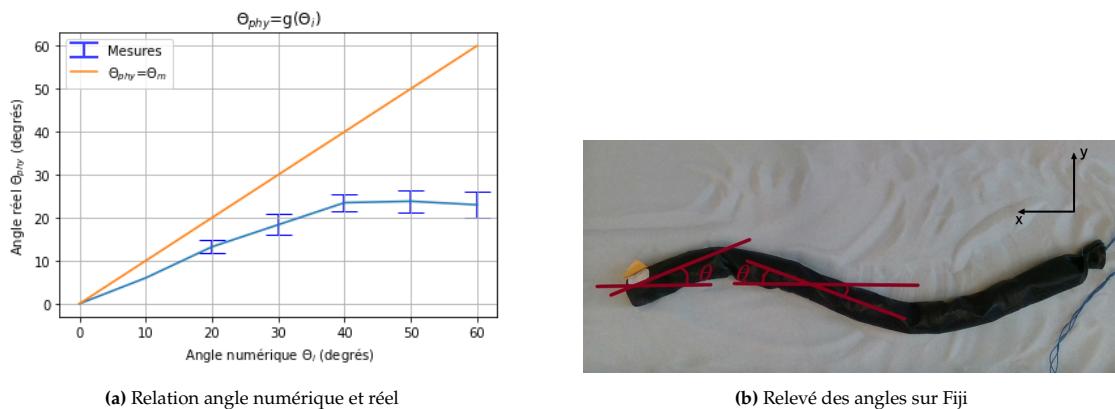


Figure 3.2: Relation entre théorie et expérience

Un autre point d'étude a été l'amplitude du serpent. Pour cela on passe en abscisse curviligne et soit on discrétise pour se rapprocher de la réalité avec six moteurs par onde ou alors on intègre et on compare ces valeurs à la valeur mesurée.

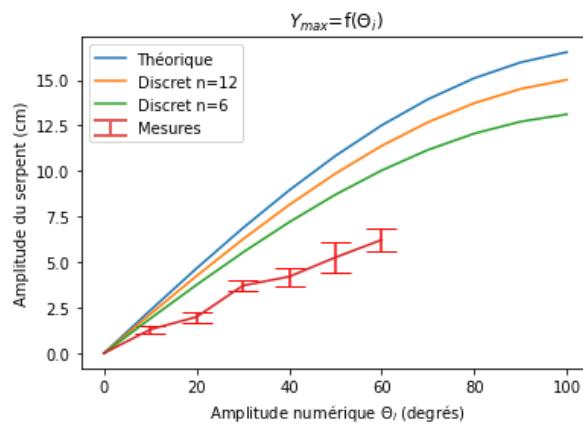


Figure 3.3: Amplitude en fonction de l'angle θ_i

À noter que l'on s'est arrêté à un angle de soixante degrés car au-delà de cette valeur, certains moteurs passaient en "overloaded", probablement du fait de la résistance de la gaine et/ou du sable. Pour voir le statut des moteurs, aller sur le logiciel DYNAMIXEL Wizard (qui permet aussi de les configurer) et il suffit d'éteindre-rallumer le robot pour que les moteurs fonctionnent à nouveau.

4

Mise en place des expériences et méthodes utilisées

4.1. But des expériences

Maintenant que nous avons étudié le modèle et les premiers tests, nous allons pouvoir utiliser notre robot serpent pour réaliser des expériences. Le but est de pouvoir caractériser les différents mouvements possibles de notre robot en fonction des paramètres en entrée, et de pouvoir les comparer dans l'optique de choisir les meilleurs paramètres que nous voulons en fonction de la situation.

4.2. Méthodologie des expériences

Pour réaliser ces expériences, nous avons utilisé le matériel fourni par le laboratoire FAST, dans lequel nous travaillions pour ce projet. Nous avions à disposition un bac en bois que nous avons rempli de billes de verre de diamètre 0,5 mm. Dans ce projet, nous avons travaillé avec seulement ce milieu granulaire particulier car les billes sont de même taille que des grains de sable, et car nous voulions étudier dans un premier temps les paramètres appliqués au robot et non au milieu.



Figure 4.1: Vision globale des expériences

Le bac en bois peut s'incliner dans le sens de la longueur, de sorte que le serpent soit facilité ou limité dans son mouvement. Même si nous décidons de ne pas incliner le bac, l'inclinomètre nous garantit que le bac est bien horizontal et donc que l'expérience se fasse dans les conditions que nous souhaitons.



Figure 4.2: Inclinomètre

Le robot est relié à l'ordinateur dans lequel nous exécutons un code Python pour pouvoir faire bouger le robot.

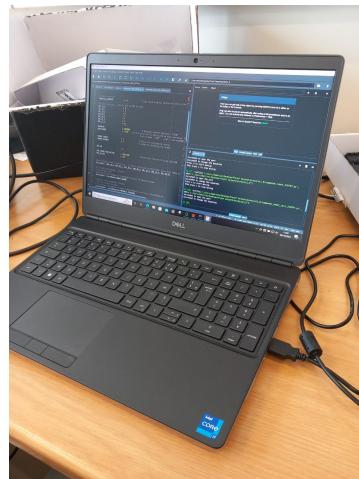


Figure 4.3: Ordinateur relié au robot

Ce code fait appel à plusieurs paramètres dont nous pouvons modifier la valeur, ce qui modifiera le mouvement du robot. Ces paramètres sont f_p et f_i respectivement les fréquences des ondes dorso-ventrales et transverses, α_p et α_i respectivement les écarts d'angles entre deux moteurs consécutifs des ondes dorso-ventrales et transverses, θ_p et θ_i respectivement les angles d'amplitudes des ondes dorso-ventrales et transverses et $\Delta \phi$ le retard de l'onde dorso-ventrale sur l'onde transverse.

Le robot est dans une peau qui s'approche des peaux des serpents, avec une texture et un relief similaire. Nous avons placé une marque sur la tête du robot qui nous servira pour l'exploitation des expériences.



Figure 4.4: Serpent avec sa peau et une marque sur sa tête

4.3. Exploitation des expériences

Pour pouvoir exploiter ces expériences, nous utilisons une caméra reliée à l'ordinateur et accrochée en hauteur horizontalement de façon à enregistrer tout le bac pendant l'expérience, et donc de capturer entièrement les mouvements du robot.



Figure 4.5: Caméra

De plus, la marque sur la tête nous permet d'avoir un repère que nous pouvons tracer. En effet, une fois la vidéo d'une expérience enregistrée, nous pouvons exécuter un code permettant de sélectionner l'objet que nous voulons suivre, en l'occurrence ici la marque sur la tête du robot, et qui enregistre les coordonnées de la sélection pendant toutes la vidéo.



Figure 4.6: Capture d'écran d'un traçage sur une vidéo d'une expérience

Nous pouvons donc reproduire les expériences en modifiant à notre guise les paramètres à chaque fois, filmer chaque expérience, tracer le repère sur le robot et obtenir les données de l'évolution des coordonnées à chaque fois. Il reste donc à analyser l'ensemble de ces données.

5

Résultats expérimentaux et analyse

5.1. Résultats expérimentaux

Une fois le robot construit et prêt à l'emploi, il a fallu déterminer le cadre dans lequel on voulait faire évoluer le robot et comprendre son interaction avec le milieu granulaire. Quelle gamme de mouvement pourrions nous obtenir au travers de ce modèle à deux ondes ?[4] Quelle vitesse maximale est atteignable dans les deux directions de déplacement ?

5.2. Cartographie de l'espace des mouvements accessibles

Suite aux vidéos obtenues, nous avons pu donc entamer le travail d'analyse.

On a décidé de faire varier l'amplitude dorso-ventrale θ_p et le déphasage $\Delta\phi$ entre les deux ondes. Nous avons pu cartographier l'espace des mouvements accessibles : 5 modes de déplacements se sont distingués en fonction de la direction d'avancement du robot et de ses points d'appui. Le straight-slithering (S), le sidewinding-slithering (SD-S) ,le sidewinding (SD), le Rolling-Sidewinding (R-SD) et enfin le Turning-Sidewinding (T-SD).

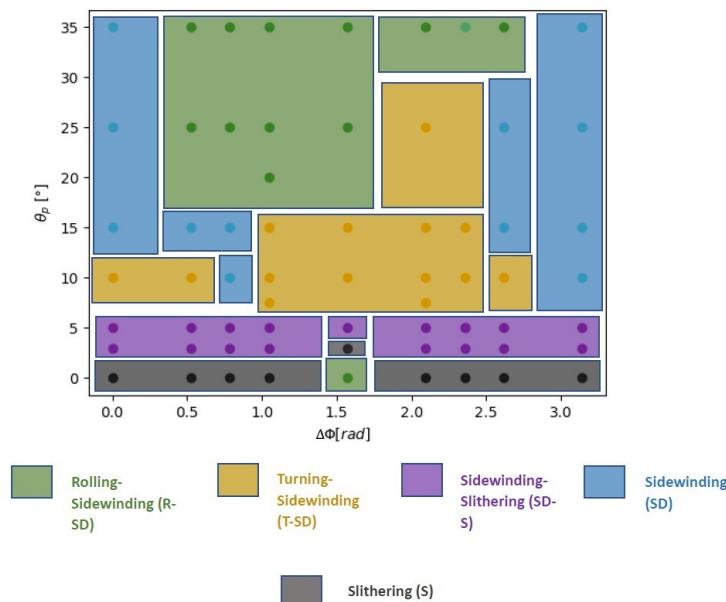


Figure 5.1: Cartographie des mouvements accessibles pour une amplitude transversale fixée $\theta_i = 30^{\circ}$ et $f_i = f_p = 0.4$ Hz ainsi que des fréquences et des longueurs d'onde égales

On remarque alors que des zones spécifiques se distinguent avec **une tendance de symétrisation du domaine autour de $\frac{\pi}{2}$** . Toutefois, il faudrait répéter ces expériences et élargir la gamme des tests effectuer pour affiner le mapping et confirmer cette tendance.

- En dessous des 5° d'amplitude dorso-ventrale, les modes de **déplacement s'orientent exclusivement dans la direction du serpent, selon x**, avec le straight slithering (S) et la variante sidewinding-slithering (SD-S) qui est un déplacement en diagonale.

- **Au-delà des 5°** , les déplacements sont exclusivement selon y avec au centre du T-SD qui est une rotation du serpent autour d'un point fixe qui est sa tête. **Ce mode est intéressant pour des applications futures de pilotage du robot serpent qui est un objectif à long terme du robot. Les serpents ont peu de motricité concernant les virages** et ce mode de déplacement quasi-inexistant dans le monde du vivant montrent la possibilité d'obtenir une telle motricité inédite.

- Lorsque l'amplitude dorso-ventrale finit par se rapprocher de celle de l'amplitude transversale $\theta_p \approx \theta_i$, on a tendance à voir apparaître du R-SD un comportement inexistant chez les serpents qui combine une rotation du serpent sur lui-même ainsi qu'un déplacement transversale selon y. Une fois de plus ce mouvement est intéressant pour des objectifs de pilotage future.

- Sur les extrémités du domaine on retrouve le mouvement des serpents des sables, capable de monter des dunes latéralement grâce au sidewiding.

On comprend donc que le comportement des serpents réels coïncide avec un modèle où le déphasage est nul ou égal à π ainsi qu'à une amplitude dorso-ventrale limitée et inférieure à 5° .

5.3. Vitesses maximales

En extrayant les coordonnées du serpent au cours du temps grâce à un code spécifique, on a pu obtenir ensuite pour chaque couple de paramètre, la vitesse moyenne (verticale et horizontale) normalisée en fonction entre autres de la longueur du robot pour que la donnée soit parlante au cas où on la compare les valeurs obtenues à d'autres articles ou que l'on souhaite agrandir notre serpent dans le futur.

$$\tilde{v} = \frac{v}{fL} = \frac{\Delta x}{T} \frac{T}{L} = \frac{\Delta x}{L}$$

Voici une courbe caractéristique que l'on obtient après traitement d'une vidéo et de laquelle on extrait la vitesse moyenne du serpent.

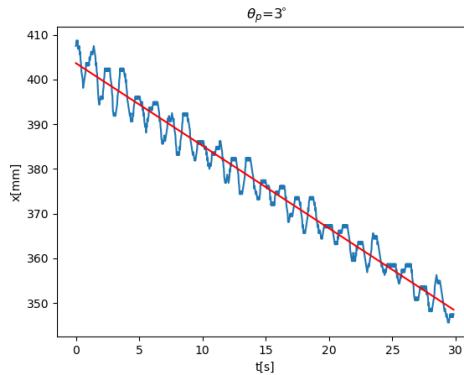


Figure 5.2: Evolution de la coordonnée longitudinale du serpent en fonction du temps pour $\theta_p=3^\circ$, $\theta_i = 30$, $f_i = f_p = 0.4$ Hz et $\Delta\phi=\frac{\pi}{2}$. La vitesse moyenne correspond à la pente de la droite rouge de régression linéaire.

Regardons désormais mode par mode l'évolution de la vitesse moyenne normalisée.

5.3.1. Déplacements longitudinaux selon x

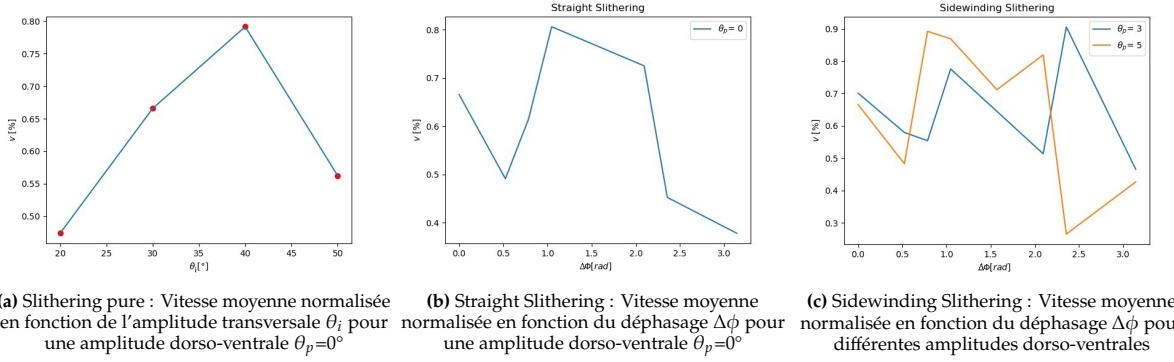


Figure 5.3: Vitesse des déplacements longitudinaux du robot selon x

On observe tout d'abord que **pour l'ensemble des modes de déplacement longitudinaux selon x, les valeurs de vitesse atteintes sont extrêmement faibles et ne dépassent pas les 1%**.

- Slithering pure : toutes les parties du robot touchent le sable. On obtient un maximum atteint pour **une amplitude transversale de 40°** . On atteint ensuite les **limites** du robot qui semble saturer avec une décroissance de la vitesse longitudinale du robot, sous forme d'overload.

Pour l'ensemble des déplacements suivants (selon x et selon y), l'influence d'une amplitude dorso-ventrale non nulle ainsi que le déphasage entre les deux ondes se reflète sur le comportement du robot qui désormais n'est plus constamment en contact avec le milieu granulaire mais au contraire semble lever certaines parties de son corps. On parle de zones de contact où s'appuie le serpent et de zones hors sols levées par le serpent. Ce mécanisme explique la diversité des différents modes transversaux que l'on observe.

- Straight Slithering : Ce mouvement longitudinal selon x est classique dans la nature. On observe une vitesse maximale atteinte pour un déphasage de $\frac{\pi}{3}$.

- Sidewinding Slithering : On obtient ici un déplacement toujours longitudinal mais légèrement diagonal avec une vitesse maximale atteinte pour deux couples de paramètre différents. On remarque donc que nous pouvons choisir le couple de paramètre ($\theta_p=3^\circ, \phi=\frac{4\pi}{6}$) pour lequel la vitesse est maximale tout minimisant l'effort demandé aux moteurs pour éviter leur saturation.

5.3.2. Déplacements latéraux selon y

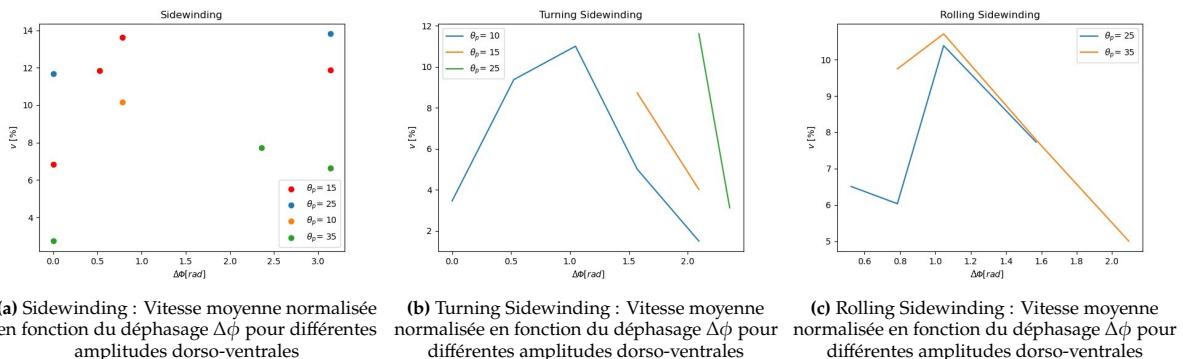


Figure 5.4: Vitesse des déplacements latéraux du robot selon y

On remarque une nette augmentation de la vitesse moyenne pour ces 3 déplacements latéraux selon y. On atteint des valeurs maximales normalisées allant jusqu'à 14%. Pour ces 3 modes de déplacement on remarque également des valeurs maximums de vitesse et les couples pour lesquelles on peut minimiser l'effort demandé aux moteurs.

Les couples optimaux sont :

- Sidewinding : ($\theta_p=15^\circ$, $\Delta\phi=\frac{\pi}{4}$)
- Turning Sidewinding ($\theta_p=10^\circ$, $\Delta\phi=\frac{\pi}{3}$)
- Rolling Sidewinding ($\theta_p=25^\circ$, $\Delta\phi=\frac{\pi}{3}$)

5.4. Influence de l'inclinaison du milieu

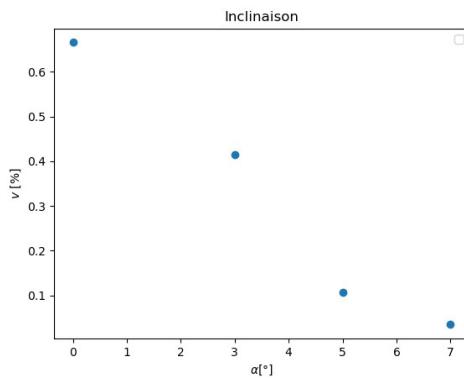


Figure 5.5: Influence de l'inclinaison α du bac de sable sur la vitesse longitudinale du mode « Straight Slithering »

Pour des valeurs relativement faibles d'inclinaison pourtant nous obtenons une décroissance rapide de la vitesse selon x du robot-serpent, avec l'inclinaison. Au-delà des 3° d'inclinaison nous avons un robot qui n'avance quasiment plus longitudinalement.

5.5. Synthèse des expériences

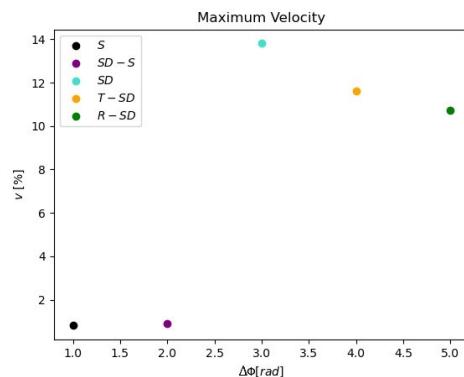


Figure 5.6: Comparaison des vitesses maximales normalisées atteintes pour les 5 modes de déplacements

On se rend compte que l'on atteint des valeurs extrêmement faibles selon x tandis que les mouvements latéraux sont plus bien plus efficaces avec du sidewinding particulièrement performant.

6

Rencontre avec une chercheuse du Muséum d'Histoire Naturelle

6.1. Interrogations et problématiques ayant motivé la rencontre

Dès le début du semestre 8, nous avons eu de nombreuses interrogations concernant les mouvements de notre serpent robotisé en comparaison avec les mouvements effectués par un vrai serpent. Nous nous sommes en particulier demandé :

- Quelles sont les caractéristiques de la peau et des vertèbres d'un serpent, et en quoi ces caractéristiques l'aident-*t*-elles à se mouvoir ?
- Quels sont les mécanismes utilisés par un serpent pour se mouvoir dans un milieu granulaire, que ce soit en slithering ou en sidewinding ?
- Quelle est l'influence du mouvement de la tête d'un serpent sur son déplacement global ?

La réponse à ces questions allant bien sûr orienter la suite de notre projet, nous avons décidé d'aller à la rencontre d'une chercheuse du Muséum d'Histoire Naturelle spécialiste des serpents, Marion Segall, afin d'obtenir des réponses et de pouvoir adapter notre étude du serpent en fonction de celles-ci.

6.2. Rencontre et réponses à nos questionnements

Nous nous sommes donc rendus au Muséum d'Histoire Naturelle pour rencontrer Marion Segall et lui poser nos questions. Durant cet échange, nous avons pu observer et toucher la peau de plusieurs serpents. Les parties de la peau qui sont en contact avec le substrat ont de petites écailles hexagonales tout comme les parties dorsales, alors que les écailles des parties latérales ont une surface beaucoup plus étendue et sont sous forme de lames. Cette différence dans la forme et la taille des écailles permet au serpent une grande flexibilité de mouvement puisque les écailles en forme de lames lui permettent d'onduler facilement, mais également une certaine stabilité puisqu'il conserve une certaine adhérence grâce aux petites écailles dorso-ventrales.

Marion Segall nous a également montré différentes imageries réalisées sur des serpents et des reconstitutions 3D de leurs os : elle nous a expliqué que la multitude de vertèbres qui composent la colonne vertébrale d'un serpent sont ce qui lui permettent une excellente mobilité. En comparaison, notre robot serpent comportant uniquement 12 servomoteurs a une mobilité moindre puisqu'il n'a pas une aussi grande flexibilité. Il s'agit donc d'un point très important à considérer pour améliorer notre robot.

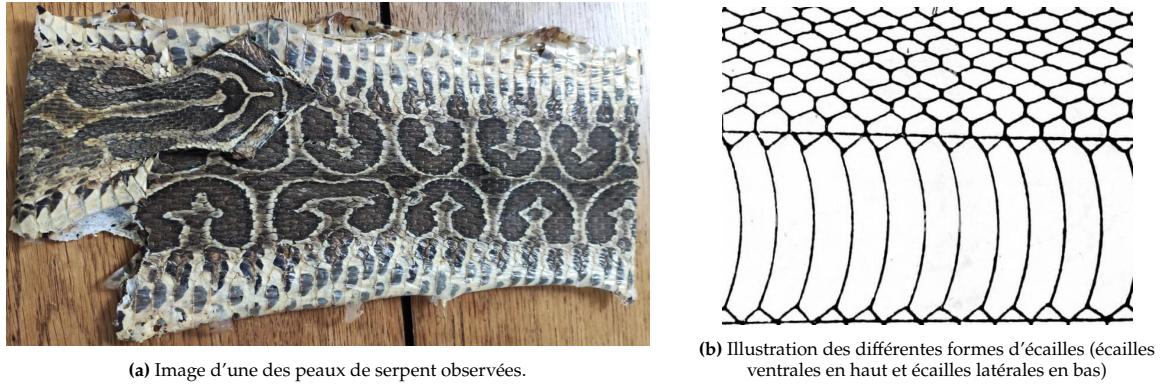


Figure 6.1: Différences constatées entre les écailles ventrales et latérales des serpents.

Nous avons ensuite pu observer des serpents fouisseurs, qui sont de petits serpents qui vivent dans du sable et sont donc particulièrement adaptés aux milieux granulaires. L'observation de leurs mouvements nous a permis de comprendre l'importance du fléchissement des parties latérales : les angles formés par le corps de ces serpents sont bien plus importants que ceux de notre robot actuel. De plus, il nous a été précisé que le mouvement le plus intéressant à étudier était non pas le slithering mais le side-winding, puisque les serpents se déplaçant sur du sable utilisent majoritairement ce type de mouvement pour se déplacer. En effet, il est bien plus efficace et c'est aussi ce que nous avions constaté lors des expérimentations sur le robot du semestre précédent. Elle nous a aussi confirmé que le corps des serpents était traversé par de nombreuses longueurs d'onde à un instant fixé en side-winding. Une piste serait donc de modifier la conception de notre serpent actuel pour qu'il se rapproche de ces observations biologiques.

Enfin, la chercheuse nous a indiqué qu'il n'y avait actuellement pas de résultats d'études sur le mouvement de la tête des serpents, et qu'il était par conséquent peu utile de s'y intéresser de notre côté pour un robot serpent. Nous avons donc décidé de ne pas étudier ce mouvement pour la suite de notre projet, et de continuer à donner les mêmes informations aux servomoteurs quelle que soit leur position dans le serpent.

6.3. Actualisation des objectifs en conséquence et modifications faites sur la conception du serpent

Tout d'abord, nous avons décidé de changer la conception même du serpent, en n'orientant pas les moteurs de la même manière. Jusqu'à présent, les moteurs de notre robot étaient orientés en 1:1, c'est-à-dire qu'un moteur avec un axe de rotation vertical suivait un moteur avec un axe de rotation horizontal, puis de nouveau un moteur avec un axe horizontal, et ainsi de suite. Pour ce semestre, nous avons décidé de nous intéresser uniquement à des robots serpents orientés en 2:1, avec un moteur vertical suivant deux moteurs horizontaux, et ainsi de suite. En effet, la chercheuse nous a bien expliqué qu'il était très important pour un serpent d'atteindre de grands angles au niveau transversal, et nous pensons que cette conception nous permettra d'améliorer la valeur de ces angles maximaux puisque deux moteurs sur trois seront mobilisés au niveau transverse, contre un sur deux jusqu'alors.

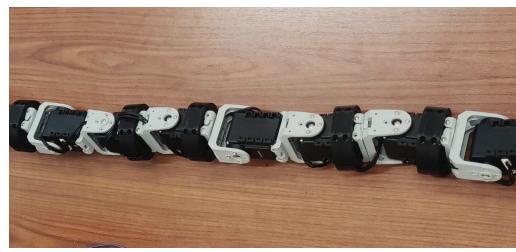
Concernant ce que nous avons pu observer sur les écailles du serpent, nous avons décidé de nous intéresser à l'influence des frottements subis par la peau de notre serpent. En effet, les différentes chaussettes synthétiques que nous utilisons n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une vraie peau de serpent, et nous avons voulu comparer les différences qui résultent de ces chaussettes par rapport à la peau d'un vrai serpent. Les écailles étant en particulier utiles aux serpents pour gravir des dunes, nous avons également choisi de nous intéresser à la manière dont notre robot serait capable d'avancer sur des pentes de sable.

Enfin, nous avons décidé de nous pencher sur l'influence de la taille de notre robot. En effet, un serpent a besoin de nombreuses longueurs d'onde dans son corps à chaque instant pour pouvoir se

6.3. Actualisation des objectifs en conséquence et modifications faites sur la conception du serpent 17



(a) Ancienne configuration : moteurs orientés en 1:1



(b) Nouvelle configuration : moteurs orientés en 2:1

Figure 6.2: Différence d'orientation des moteurs du serpent

déplacer, et le fait d'avoir uniquement 12 moteurs limite ce nombre-ci, alors qu'on avoir par exemple 18 permet déjà plus de longueurs d'onde. Comparer les performances d'un serpent à 12 moteurs et d'un autre à 18 moteurs pourrait donc nous être utile pour voir si une grande longueur est vraiment bénéfique.

7

Influence de l'orientation des servomoteurs dans le serpent

7.1. Etude des angles

Comme présenté en partie 7, l'un des objectifs a été d'augmenter la taille du serpent dans le but d'obtenir un meilleur mouvement mais aussi de pouvoir étudier l'effet d'autres paramètres. En augmentant la taille du serpent ainsi que la configuration des moteurs, l'idée est d'être en mesure d'obtenir de plus grandes amplitudes, plus proches des valeurs entrées mais aussi d'obtenir plus de longueurs d'ondes dans le serpent. Pour vérifier l'utilité de cela, on commence par étudier, comme fait en 3.2.2, les angles du robot.

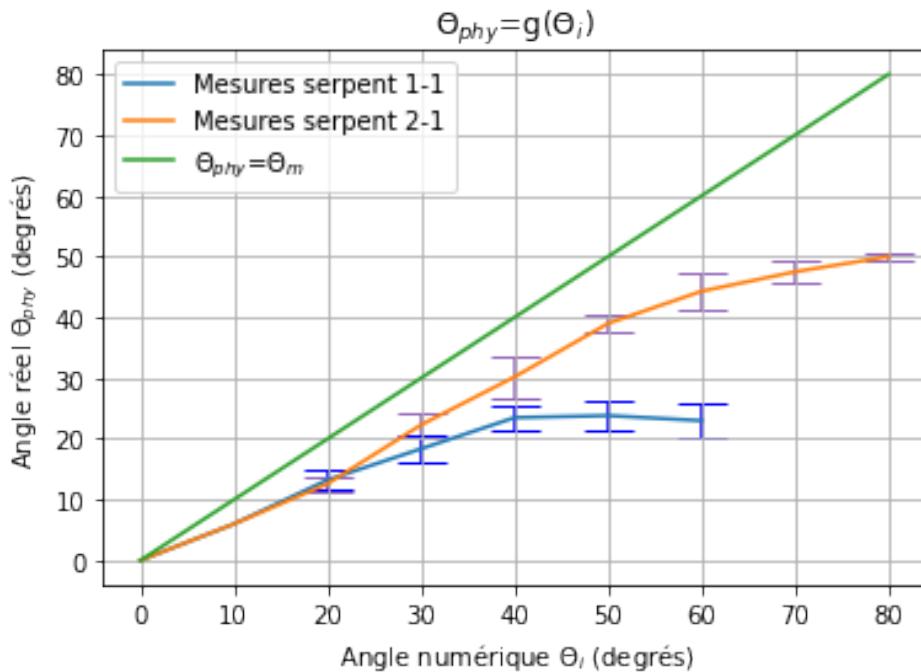


Figure 7.1: Relation entre angle numérique et réel pour les deux configurations.

En changeant également la peau et la configuration, les valeurs obtenues en orange pour le second robot montrent une meilleure correspondance avec la réalité : on est capable d'augmenter l'amplitude sans que les moteurs ne soient overload. Le tableau suivant reprend les valeurs des angles obtenues (à

partir de FIJI). Les incertitudes sont calculées à partir de 5 mesures comme l'écart moyen à la moyenne.

Angle θ_p	20	30	40	50	60	70	80
Angle mesuré configuration 1:1	13.24	18.37	23.5	23.83	23	overload	overload
Ecart configuration 1:1	1.5	2.4	2	2.6	3	None	None
Angle mesuré configuration 2:1	12.6	22.3	30.2	39	44.3	47.5	50
Ecart configuration 2:1	1.3	2	3.5	1.3	2.9	1.7	0.5

8

Influence de la longueur du serpent

8.1. Mesure et analyse de la vitesse du serpent pour 12 et 18 moteurs

Afin de comparer les performances et le comportements de deux serpents, un à 12 moteurs et l'autre à 18 moteurs, nous avons mesuré leur vitesse et caractérisé leur mouvement pour différentes valeurs de paramètres.

Pour les paramètres, nous avons d'abord choisi de nous intéresser à θ_i et θ_p , les amplitudes angulaires respectivement transversales et dorso-ventrales. Pour l'amplitude transversale θ_i , nous avons expérimenté avec les valeurs 10, 30 et 50 degrés puisque nous avions déjà observé qu'en dehors de l'intervalle [10 ; 50], les robots serpents avaient une vitesse nulle car les moteurs avaient une rotation moindre, ou au contraire trop grande. Quant à θ_p , nous avons décidé de choisir les valeurs 0, 10 et 20 degrés, puisqu'au delà de 20 degrés les robots n'étaient plus stables et se retournaient : ils se soulevaient trop en comparaison avec l'amplitude transversale.

Enfin, un dernier paramètre que nous avons voulu faire varier pour nos expérimentations est α , qui correspond au nombre de longueurs d'onde qui sont présentes dans le serpent à un instant t fixé. Cet α est le même pour les moteurs transverses et dorso-ventraux : $\alpha = \alpha_i = \alpha_p$. Cet α vaudra 1, 2 ou 3, puisque davantage de longueurs d'onde dans le serpent n'est pas intéressant : celui-ci comportant au plus 18 moteurs, l'onde ne serait pas suffisamment discrétisée au delà.

Nous avons donc mesuré les vitesses d'un serpent à 12 moteurs et d'un autre à 18 moteurs, pour $\theta_i \in \{10, 30, 50\}$, $\theta_p \in \{0, 10, 20\}$ et $\alpha \in \{1, 2, 3\}$. Nous obtenons ainsi les graphiques suivants :

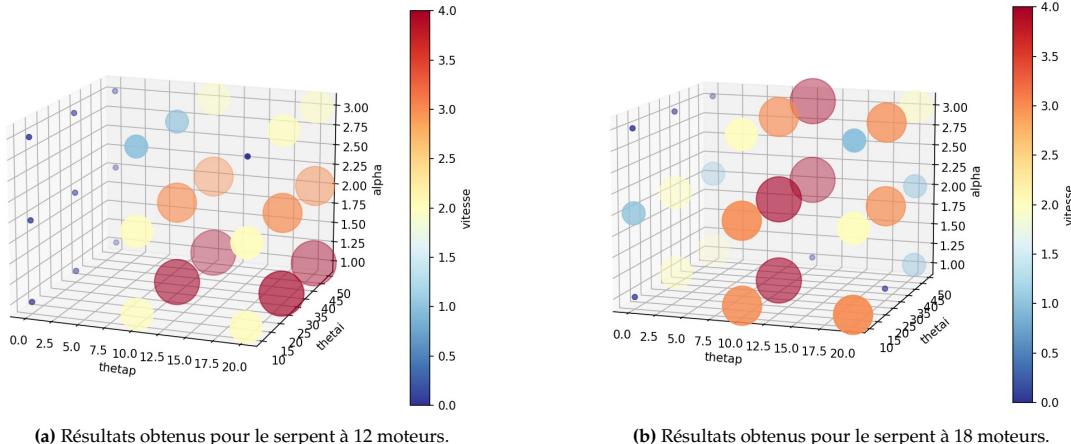


Figure 8.1: Graphiques 3D des vitesses observées en fonction des paramètres θ_i , θ_p et α choisis et du nombre de moteurs dans le serpent.

On observe sur ces graphiques que les vitesses sont bien différentes entre le serpent à 12 moteurs et celui à 18. En particulier, les performances du serpent à 18 moteurs sont en moyenne meilleures, notamment pour $\theta_p = 10$: ce serpent est alors très efficace.

On remarque également des caractéristiques communes aux deux serpents : pour $\theta_p = 0$, aucun ne semble réussir à avancer, ce qui est cohérent avec ce que nous avons supposé : pour faire du side-winding, un serpent a besoin de soulever certaines parties de son corps pour ne pas subir de frottements sur les parties qu'il veut avancer, et s'appuie sur celles qui restent immobiles pendant ce temps. Dans le cas où $\theta_p = 0$, il ne subit aucune onde au niveau dorso-ventral, donc ne peut pas se soulever, ce qui augmente considérablement ses frottements et l'empêche d'avancer.

On peut enfin observer que les paramètres pour lesquelles les vitesses sont maximisées ne sont pas les mêmes pour les deux serpents : pour le serpent à 12 moteurs, fixer $\alpha = 3$ ne renvoie jamais de bonnes valeurs de vitesses, alors que ce n'est pas le cas pour le serpent à 18 moteurs. Cela s'explique par le fait que 3 longueurs d'onde réparties dans un serpent de 12 moteurs sont forcément moins bien discrétisées que dans un serpent de 18 moteurs, ce qui ne permet pas à un petit serpent d'avoir un mouvement idéal, surtout pour des θ faibles.

Un serpent à 18 moteurs permet donc une plus grande flexibilité dans les paramètres, et est souvent plus rapide qu'un serpent à 12 moteurs.

8.2. Comparaison de la vitesse du serpent en fonction de sa longueur

A l'aide des mesures faites dans la partie précédente, nous avons ensuite pu calculer les valeurs de $\frac{V}{fL}$ à la fois pour le serpent à 12 moteurs et celui à 18. Cette expression représente le pourcentage d'avancée du serpent en une période par rapport à sa taille.

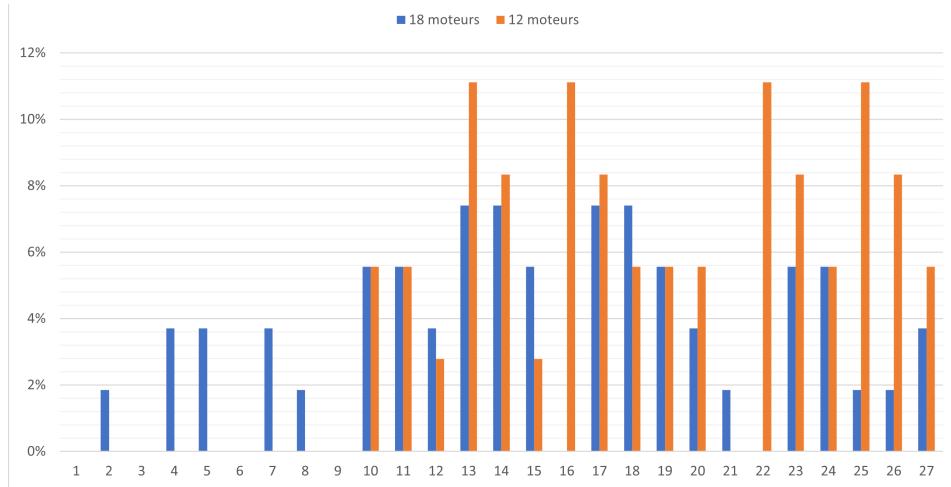


Figure 8.2: Comparaison des valeurs de $\frac{V}{fL}$ pour un serpent à 12 ou à 18 moteurs, pour différents paramètres en entrée (chaque abscisse correspond à un set de valeurs d'entrée $(\theta_i, \theta_p, \alpha)$ différent).

On remarque ainsi que même si les vitesses du serpent à 18 moteurs sont meilleures d'un point de vue absolu, ces chiffres sont à relativiser lorsqu'on compare la vitesse à la taille du serpent considéré. En effet, ici, nous voyons que le pourcentage relatif obtenu pour le serpent à 12 moteur est souvent supérieur à celui du serpent à 18 moteurs. Cependant, la taille du robot n'étant pas une contrainte pour notre projet, nous aurions quand même tendance à considérer que les chiffres les plus révélateurs sont ceux de la vitesse absolue, et donc à privilégier le serpent à 18 moteurs.

8.3. Cartographie des mouvements obtenus

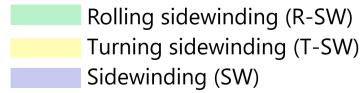


Figure 8.3: Légende pour la cartographie des mouvements.

Durant ces mesures, nous avons aussi relevé les différents types de mouvements effectués par les deux serpents. Nous avons obtenu différentes variantes de side-winding : le side-winding pur où le robot opère simplement une translation sur le côté ; le turning side-winding où le robot opère une translation associée à une rotation, et le rolling side-winding où le robot tourne sur lui-même. Le side-winding permet souvent la vitesse la plus élevée et est donc pertinent pour se déplacer, et le turning side-winding permet quant à lui de diriger le serpent pour qu'il atteigne un but qui ne serait pas directement sur l'axe qu'il emprunterait en side-winding pur. Quant au rolling side-winding, il est néfaste puisqu'il indique que le serpent n'est pas stable, et car il implique souvent une vitesse quasi-nulle voire nulle. Ce mouvement est donc à éviter, contrairement au side-winding et au turning side-winding.

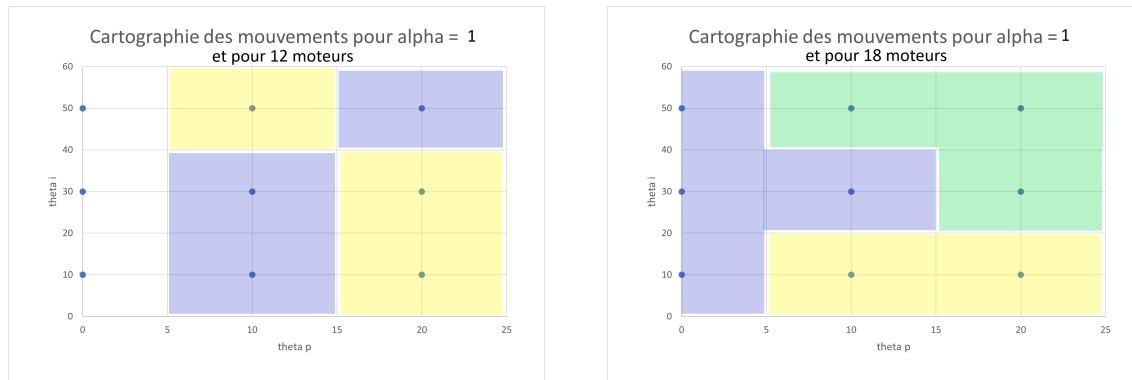


Figure 8.4: Cartographie des mouvements des deux serpents à 12 et 18 moteurs pour le paramètre $\alpha = 1$ fixé.

Pour une seule longueur d'onde se propageant dans chacun des serpents ($\alpha = 1$), la cartographie que l'on obtient confirme d'abord que le serpent à 18 moteurs a plus facilement un mouvement, contrairement à celui de 12 moteurs qui reste immobile sur 1/3 des mesures. Cependant, le robot de 18 moteurs est aussi plus souvent instable, puisqu'un tiers des mesures montrent qu'il a un mouvement de rolling side-winding. En revanche, les deux serpents ont tous les deux des mouvements de side-winding et de turning side-winding, ce qu'il fait qu'en choisissant judicieusement les paramètres θ_i et θ_p , on pourrait les faire suivre un tracé.

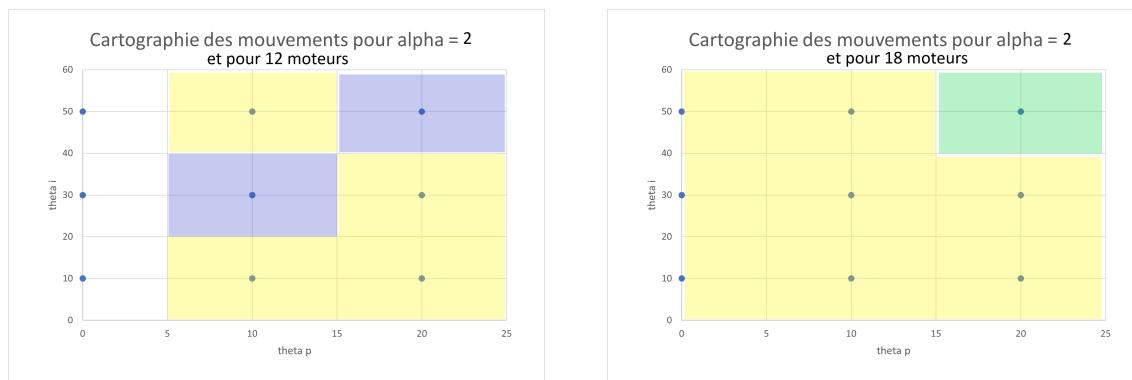


Figure 8.5: Cartographie des mouvements des deux serpents à 12 et 18 moteurs pour le paramètre $\alpha = 2$ fixé.

Lorsqu'on choisit cette fois-ci 2 longueurs d'onde se propageant dans chaque serpent, on remarque

que les cartographies sont relativement similaire à $\alpha = 1$ pour le serpent de 12 moteurs, mais diffèrent pour celui de 18 moteurs. Ainsi, le serpent de 12 moteurs reste stable et capable d'effectuer les deux mouvements qui nous intéressent, même s'il n'a pas de mouvement pour certaines valeurs des paramètres. En revanche, pour le serpent à 18 moteurs, on remarque qu'il n'est plus capable d'effectuer de side-winding pur, et est donc obligé d'adopter un mouvement de rotation qui n'est pas toujours nécessaire. De plus, il conserve un mouvement de rolling side-winding pour un couple de paramètres, ce qui n'est pas non plus souhaitable. Pour $\alpha = 2$, on voit donc que le serpent à 12 moteurs est le plus adapté.



(a) Mouvements obtenus pour le serpent à 12 moteurs et pour $\alpha = 3$. (b) Mouvements obtenus pour le serpent à 18 moteurs et pour $\alpha = 3$.

Figure 8.6: Cartographie des mouvements des deux serpents à 12 et 18 moteurs pour le paramètre $\alpha = 3$ fixé.

Enfin, pour 3 longueurs d'onde se propageant dans chaque robot, on remarque encore une fois que le robot de 12 moteurs est le plus stable puisqu'il ne fait jamais de rolling sidewinding, mes les deux robots sont ici capables de faire du side-winding pur tout comme du turning side-winding.

8.4. Conclusion sur la longueur du serpent à privilégier

Pour conclure, ces mesures de vitesses ainsi que ces cartographies nous ont permis de voir qu'un serpent à 18 moteurs permettait une plus grande vitesse absolue et une plus grande flexibilité dans le choix des paramètres. Cependant, il lui arrive d'être instable contrairement au serpent à 12 moteurs qui lui est toujours stable, et sa vitesse relative n'est pas forcément meilleure. Il est donc à privilégier uniquement si le facteur de la longueur du robot n'est pas un problème (dans une étendue de sable par exemple) et si le choix des paramètres est fait de manière à ce qu'il ne fasse jamais de rolling side-winding.

9

Etude de l'effort produit par les servomoteurs

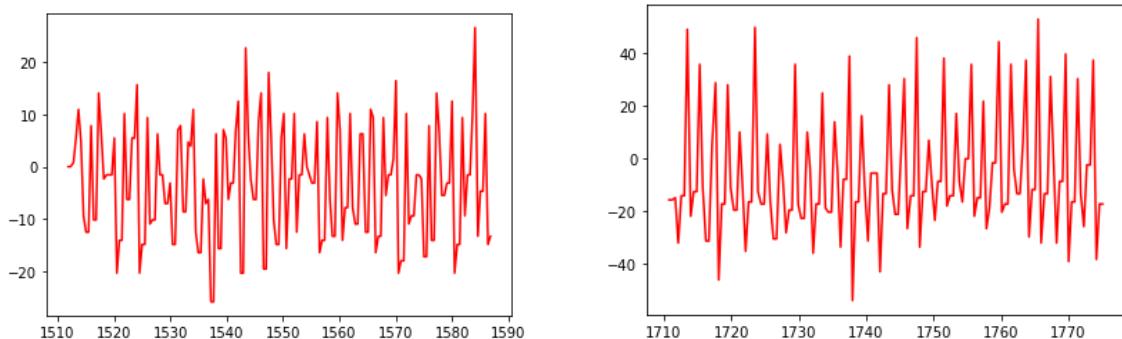
9.1. Calcul de l'effort fourni par les moteurs

Nous aimions comprendre quels sont les efforts que les servomoteurs du serpent fournissent pour effectuer les mouvements qui leur sont demandés, en fonction de leur position dans le serpent et du milieu dans lequel ils se trouvent.

Pour calculer l'effort fourni par nos servomoteurs, nous avons eu l'idée de mesurer le payload de chacun d'entre eux. En effet, le payload étant le pourcentage de l'intensité maximale à fournir pour qu'un servomoteur puisse effectuer le mouvement qui lui est demandé. Ainsi, plus le payload est proche de 100 et plus l'effort que le moteur doit fournir est important.

9.2. Influence du milieu sur l'effort fourni et anticipation d'un changement de milieu

Nous avons d'abord choisi un moteur et observé la courbe de son payload en fonction du temps, à la fois pour un serpent se déplaçant sur un sol dur et pour le même serpent se déplaçant celle fois-ci sur du sable.



(a) Payload en fonction du temps pour un des moteurs d'un serpent se déplaçant sur un sol dur. (b) Payload en fonction du temps pour un des moteurs d'un serpent se déplaçant sur du sable.

Figure 9.1: Comparaison du payload pour un des moteurs d'un serpent se déplaçant sur deux sols différents.

On remarque que les valeurs du payload sont comprises entre -25 et 25 pour un serpent se déplaçant sur un sol dur, alors qu'elles sont comprises entre -50 et 50 pour un sol sableux. On en conclut que les moteurs font un effort doublement plus important lorsque le serpent se déplace dans du sable que sur

un sol dur, ce qui est cohérent car un serpent doit faire plus d'efforts lorsqu'il est dans du sable pour avancer puisqu'il est entouré de sable.

Ainsi, il est possible de détecter le type de sol sur lequel est situé un serpent simplement en récupérant la valeur du payload d'un des moteurs et en analysant ses valeurs maximales et minimales : si elles sont de l'ordre de 25%, il s'agit d'un sol dur alors que si elles sont de l'ordre de 50%, il s'agit d'un sol composé de sable. En détectant ces changements dans les valeurs du payload, on peut donc également détecter un changement de milieu, et adapter les paramètres du serpent pour qu'il reste efficace sur ce nouveau milieu.

9.3. Répartition de l'effort le long du serpent

En appliquant le même type de mesures le long du serpent, nous nous sommes rendus compte que les servomoteurs qui sont situés au centre du serpent devaient fournir un effort légèrement supérieur à celui des servomoteurs situés sur la tête ou la queue du serpent. On pourra donc penser dans un second temps à adapter les amplitudes données aux moteurs en fonction de leur position pour éviter qu'il ne subissent trop d'efforts.

10

Etude du déplacement du serpent sur une pente

L'étude faite en partie 5 a montré que le slithering était concrètement inefficace face à des pentes même faibles. L'idée a alors été d'étudier la montée de pente en sidewinding avec le nouveau serpent.

10.1. Cas d'un substrat en bois composite

La première étape a été d'étudier le mouvement et la capacité du serpent à monter des pentes de bois en absence de sable. Une première observation a été que l'augmentation de la pente impliquait une nécessité de diminuer l'angle dorso-ventral. De plus, la limite à partir de laquelle le serpent ne pouvait gravir la pente ou bien était instable pour tous les θ_{dv} a été trouvée à 12° . Les instabilités étaient principalement dues à une incapacité à entamer le mouvement, c'est à dire à monter sur la pente sans glisser ou alors dues à son centre de gravité trop élevé et conduisant à la chute du serpent vers l'arrière.



Figure 10.1: Montée de pente sur bois composite.

10.2. Ajout d'une fine couche de sable

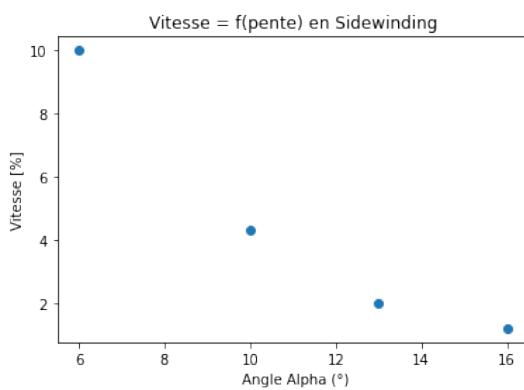
Une seconde étape était d'étudier une pente présentant une fine couche de sable d'environ 1 cm sur une planche de bois rugueux et adhérent. La limite se trouve également aux alentours des 12° . Un nouveau problème étant que le serpent glisse sur le sable lorsque la couche est très fine et ce même pour de petits angles.



Figure 10.2: Montée de pente sur fine couche de sable.

10.3. Etude du déplacement sur une dune de sable

Enfin, la dernière étape a été d'étudier la montée d'une pente entièrement sableuse. Cela est particulièrement intéressant puisque monter des dunes peut s'avérer très complexe pour certains rovers et que les serpents y sont particulièrement doués. Contrairement à 10.1 et 10.2 où l'on adaptait le θ_{dv} à la pente pour s'approcher d'une optimalité, ici on s'intéresse à l'influence de la pente, tous les autres paramètres étant fixés



(a) Relation entre la vitesse et l'angle de la dune.



(b) Création de dunes à gravir dans le bac.

Figure 10.3: Comparaison du payload pour un des moteurs d'un serpent se déplaçant sur deux sols différents.

La limite de 12° est largement dépassée et ce avec des vitesses qui bien que décroissantes restent acceptables.

11

Etude des frottements

11.1. Intérêt de l'étude

En parallèle de nos études empiriques nous avons continué à creuser la théorie derrière la locomotion du serpent et à chercher si un mouvement optimal formé par les deux ondes spatiales pouvait être trouvé.

Si un tel mouvement pouvait être trouvé, c'est-à-dire trouver les paramètres d'onde optimaux : $\lambda, \theta_p, \theta_{dv}, \phi$ et f . Alors, le but du projet serait accompli, il suffirait juste d'adapter le mouvement au substrat et aux paramètres extérieurs.

Parmi plusieurs articles de recherche explorés, l'un a particulièrement attiré notre attention [5]. Dans cet article, les auteurs s'appuient sur une étude énergétique du serpent pour comprendre ses modes de locomotion. Pour cela, ils s'appuient sur 3 paramètres qui sont les coefficients de frottements du serpent selon 3 directions : μ_f, μ_b et μ_t pour vers l'avant, vers l'arrière et vers le côté (transverse) respectivement. Le graphe ci-dessous par exemple, permet de savoir en fonction des coefficients de

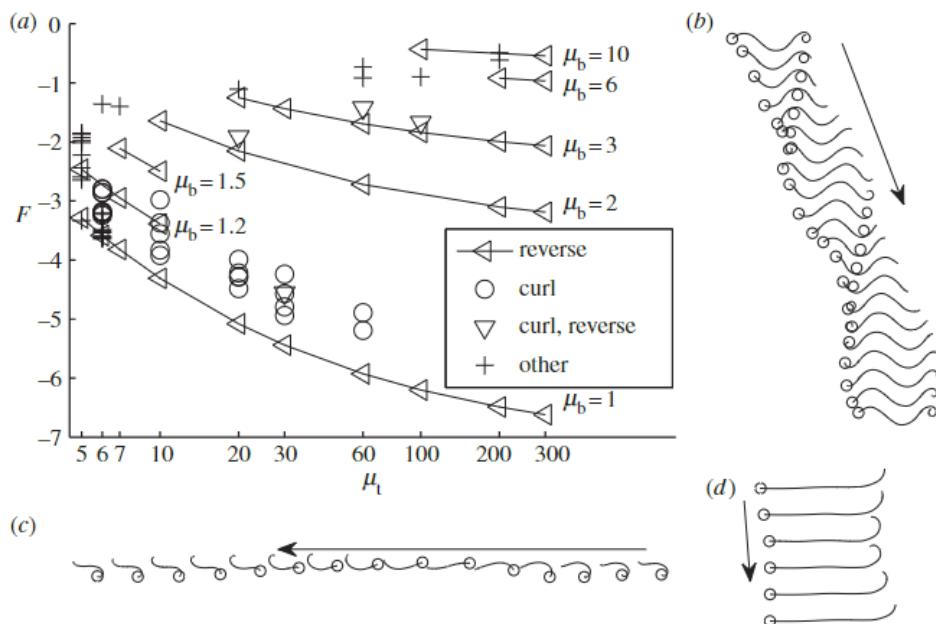


Figure 11.1: Résultats théoriques et mouvement optimal selon les coefficients de frottements

frottements déterminés à l'avance si on doit utiliser des ondes directes ou indirectes avec bouclage du

serpent ou non. D'autres graphiques peuvent-être trouvés pour adapter au mieux le mouvement du serpent.

11.2. Approche expérimentale utilisée

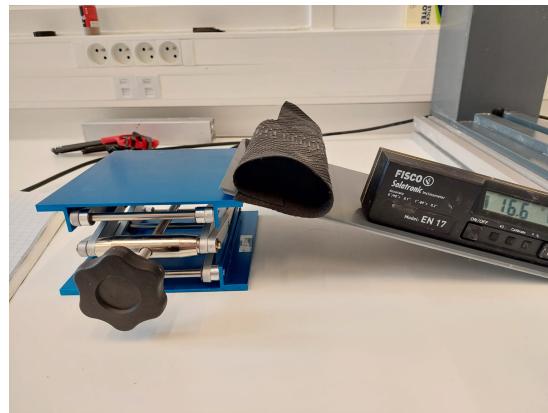


Figure 11.2: Illustration du problème de déplacement d'un véhicule sur du sable

Pour utiliser les résultats, nous avons calculé les coefficients de frottements μ_f , μ_b et μ_t en étudiant le début de glissement sur différents substrats. Les résultats obtenus pour la peau simili-serpent ont été résumés dans le tableau suivant.

Sable	Plexiglass
$\mu_f : 0,8$	$\mu_f : 0,7$
$\mu_b : 1,2$	$\mu_b : 1,05$
$\mu_t : 0,84$	$\mu_t : 0,8$

11.3. Résultats et analyses

Grâce aux coefficients obtenus nous avons pu tester des mouvements théoriques optimaux selon les substrats.

Les tests se sont montrés infructueux et le serpent prenait à chaque fois des positions instables et se retournait sur lui-même.

Plusieurs éléments peuvent expliquer ces résultats. D'une part, notre serpent à des mouvements fortement discrétilisés à cause de la taille des moteurs (8cm) par rapport à celui d'un serpent réel pour lequel les vertèbres sont de l'ordre du demi centimètre. D'autre part, un vrai serpent s'appuie sur la rétraction de ses écailles pour produire des zones de son corps où les coefficients de frottements sont plus élevés ce qui joue sur sa locomotion.

La somme de ces différents éléments joue fortement sur l'utilisation des résultats de l'article. Pour continuer sur cet axe ci, il faudrait intégrer la discrétilisation du serpent au calcul d'optimisation et également intégrer les limites de couple des moteurs.



Figure 11.3: Ecailles ventrales d'un serpent

12

Conclusion

Les résultats du premier semestre nous avait amené à un début de compréhension de la complexité du déplacement des serpents sur milieu granulaire encore trop peu étudié et documenté. Avec la construction du robot et une première analyse des mouvements accessibles par notre robot, nous avions cartographié différents mouvements, avec certains proches du serpent réel et d'autres inédits comme le Turning-Sidewinding.

Ces premières analyses, et questionnements également, ont permis de commencer le deuxième semestre avec des objectifs précis. La rencontre avec Marion Segall a confirmé certains de nos objectifs et en a proposé d'autres. Nous nous sommes concentrés sur le sidewinding, avons optimisé la taille du serpent et sa discréétisation et avons exploré l'utilité de l'information des couples moteurs.

Les résultats sont nombreux et ont été détaillés dans les parties précédentes, toutefois le cœur du projet est encore à développer et il reste de très nombreuses marges de manœuvres :

- Approfondir la détection de milieu, en visant l'implémentation dans le code de locomotion à terme pour que le serpent puisse adapter son mouvement. Pour cela, s'appuyer sur les couples moteurs dont la moyenne sur un cycle dépend du substrat.

- Etudier les zones de contact du serpent avec le substrat dans son mouvement à l'aide d'une caméra 3D. Ceci permettrait d'identifier comment il repose les parties de son corps et lesquels il suréleve.

- Commencer à embarquer des éléments sur le serpent. En mettant des gyroscopes par exemple, on pourrait détecter la pente d'une dune et imposer le mouvement optimal pour la pente désirée en s'appuyant sur la cartographie déjà effectuée.

- Réadapter le calcul théorique du mouvement optimal utilisé dans la partie 11 pour intégrer les erreurs liées à la discréétisation et aux moteurs imparfaits.

Sur le long terme, nous cherchons à pouvoir piloter le serpent robot. Il reste encore de nombreuses étapes avant le pilotage, que nous avons partiellement étayé ci-dessus, ce qui est normal pour un projet aussi riche que celui-ci.

De la part de toute l'équipe, nous aimerais remercier Baptiste Darbois-Texier, notre encadrant, sans qui ce projet ne pourrait avoir lieu ainsi que Maria Makarov et Emmanuel Godoy, et nous souhaitons bon courage à l'équipe qui reprendra ce projet !

13

Bibliographie

- [1] Hamidreza Marvi, Chaohui Gong, Nick Gravish, Henry Astley, Matthew Travers, Ross L. Hatton, Joseph R. Mendelson III, Howie Choset, David L. Hu, Daniel I. Goldman. **Sidewinding with minimal slip: Snake and robot ascent of sandy slopes.** 2014
- [2] David L. Hu, Michael Shelley. **Slithering locomotion.** 2012
- [3] Perrin E Schiebel, Henry C Astley, Jennifer M Rieser, Shashank Agarwal, Christian Hubicki, Alex M Hubbard, Kelimar Diaz, Joseph R Mendelson III, Ken Kamrin, Daniel I Goldman. **Mitigating memory effects during undulatory locomotion on hysteretic materials.** 2020
- [4] Xiaotian Zhang, Noel Naughton, Tejaswin Parthasarathy, Mattia Gazzola **Friction modulation in limbless, three-dimensional gaits and heterogeneous terrains.** 2021
- [5] Alben S. 2013 Royal Society Publishing, University of Michigan **Optimizing snake locomotion in the plane..** 2013