

NOUVEAUX CONCEPTS DE LOCOMOTION POUR VÉHICULES TOUT-TERRAIN ROBOTISÉS

THÈSE N° 2833 (2003)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Institut d'ingénierie des systèmes

SECTION DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Michel LAURIA

ingénieur en microtechnique diplômé EPF
et de nationalités italienne et suisse originaire de Prilly (VD)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. R. Siegwart, directeur de thèse
Prof. R. Clavel, rapporteur
M. W. Maeder, rapporteur
Prof. J.-D. Nicoud, rapporteur
Prof. S. Shooter, rapporteur

Lausanne, EPFL
2003

Remerciements	7
Version Abrégée	11
Abstract	13
1 Introduction	17
1.1 Avant-propos	17
1.1.1 De l'Homme à la machine	17
1.1.2 Qu'est ce qu'un robot ?	18
1.1.3 La robotique mobile	18
1.1.4 Le sous-système de locomotion	19
1.2 Objectifs et contributions	20
1.3 Plan de la thèse	20
2 Rappels théoriques	23
2.1 Mécanique des systèmes matériels	23
2.1.1 Point matériel et cinématique	23
2.1.2 Les systèmes de points matériels et les trois lois de la mécanique	24
2.1.3 L'origine des forces entre les points matériels	25
2.1.3.1 Les forces de gravitation	25
2.1.3.2 Les forces électromagnétiques	25
2.1.4 Les états stables des systèmes de points matériels: la matière ..	26
2.1.5 Les interactions entre les systèmes de points matériels	26
2.1.5.1 Le poids	27
2.1.5.2 Les forces électromécaniques	27
2.1.5.3 Les forces de frottement sec entre les solides	27
2.1.5.4 Les forces normales de contact entre les solides	28
2.1.5.5 Les tensions internes dans les solides	28
2.1.6 Puissance et travail d'une force	29
2.1.7 Forces actives et forces passives	29
2.1.8 Théorème de l'énergie cinétique	30
2.1.9 Forces conservatives et énergie potentielle	30
2.1.10 Forces non conservatives	30
2.1.11 Théorème de l'énergie mécanique	30
3 Les mécanismes de locomotion	33
3.1 Définition	34
3.2 Le rôle de l'environnement dans la locomotion	34
3.3 Considérations énergétiques	35
3.3.1 Echanges avec une source d'énergie	36
3.3.2 Echanges d'énergie avec la charge utile	37
3.3.3 Echanges d'énergie avec l'environnement	37

3.4	Caractérisation d'un mécanisme de locomotion	38
3.4.1	les organes de contact avec l'environnement	38
3.4.2	les organes transformateurs d'énergie	38
3.4.3	les organes de transmission des forces	39
3.5	Classification des mécanismes de locomotion	40
3.5.1	Locomotion passive	40
3.5.1.1	utilisation de la gravitation	40
3.5.1.2	utilisation des courants fluidiques	40
3.5.1.3	locomotion par accrochage	40
3.5.2	Locomotion active	40
3.5.2.1	Propulsion par éjection de matière	41
3.5.2.2	Propulsion par réaction de contact	41
3.6	La locomotion utilisant la propulsion par réaction de contact à la surface d'un milieu solide.	42
3.6.1	Caractérisation du contact entre deux solides	42
3.6.2	Les différentes stratégies de contact	44
3.6.2.1	contact par adhésion à l'environnement	44
3.6.2.2	contact non adhésif par attraction gravitationnelle et friction.	45
3.6.3	Stabilité de la locomotion	45
3.6.4	Classification des mécanismes de locomotion statiquement stables.	46
3.6.4.1	Premier critère: mouvement des organes de contact	46
3.6.4.2	Deuxième critère: continuité du contact	46
3.6.4.3	Troisième critère: géométrie des zones de contact	47
3.7	Conclusion	47

4 Etude des mécanismes de locomotion statiquement stables

	de type RCL	49
4.1	Hypothèses	49
4.2	Les liaisons dans les mécanismes de locomotion de type RCL	50
4.2.1	Modélisation de la liaison par contact non-adhésif et par friction	50
4.2.2	Modélisation de la liaison bilatérale par obstacle	53
4.2.3	Représentation graphique de l'architecture topologique d'un mécanisme de locomotion type RCL.	53
4.3	Mobilité d'un mécanisme de locomotion de type RCL	54
4.3.1	Méthode de Grübler	55
4.3.2	Méthode par calcul du rang de la matrice des contraintes cinématiques.	56
4.3.3	Quelques exemples 2D de calcul de mobilité	57

4.3.4	Gamme de mouvements instantanés d'un mécanisme de locomotion de type RCL	59
4.4	Stabilité des mécanismes de locomotion de type RCL	60
4.4.1	Critère qualitatif de stabilité pour un mécanisme de locomotion de type RCL	60
4.4.2	Distribution des forces de contact conduisant à un équilibre stable.	61
4.4.3	Validité physique d'une distribution de forces de liaison par contact	65
4.4.4	Contrôlabilité du mouvement	66
4.4.5	Validité du torseur de motorisation	68
4.4.6	Optimisation des forces de liaison par contact	71
4.4.7	Conclusion	74
5	Mécanismes de locomotion tout-terrain roulants	77
5.1	Caractérisation morphologique des organes de contact	77
5.1.1	Les roues	78
5.1.2	Les patins	79
5.2	Caractérisation des mécanismes de locomotion roulants	79
5.2.1	Les mécanismes de braquage	80
5.2.2	Les mécanismes de franchissement	80
5.2.3	Les mécanismes permettant la variation de l'empattement des roues.	81
5.3	Catalogue de mécanismes de locomotion tout-terrain roulants	81
6	Modélisation des mécanismes roulants 2D	87
6.1	Hypothèses	87
6.2	Cinématique	91
6.2.1	Cinématique d'une roue	91
6.2.2	Cinématique d'un mécanisme roulant 2D	92
6.2.3	Exemple: cinématique du bi-roue simple	98
6.3	Dynamique	101
6.3.1	Dynamique d'une roue	101
6.3.2	Dynamique d'un mécanisme roulant 2D	103
6.3.3	Modèle quasi statique d'un mécanisme roulant 2D	109
6.3.4	Exemple: modèle quasi statique du bi-roue simple	111
7	Résultats	117
7.1	Robot Space Cat	117
7.2	Roue Tactile pour robots mobiles tout-terrain	122
7.3	Modules électroniques pour le prototypage rapide de robots	129
7.4	Robot Shrimp	130

7.5 Robot Octopus	137
8 Conclusion et perspectives	145
Littérature	149

Remerciements

Cette thèse est le résultat des six années passées comme assistant de recherche au sein du Laboratoire de Systèmes Autonomes (ASL) de l'EPFL.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, le Professeur Roland Siegwart, de m'avoir accueilli dans son laboratoire et pour la confiance qu'il a placée en ma personne et en mes idées (parfois folles je l'admet). Ce dernier m'a permis de choisir librement le sujet de ma thèse et m'a laissé une très grande autonomie durant tout ce travail. La très bonne atmosphère qui règne au sein du laboratoire qu'il dirige est le reflet de sa gentillesse et de son éternelle bonne humeur. De plus, ses très bons conseils et ses compétences en mécanique m'ont souvent sorti de situations difficiles. Enfin, je voudrais le remercier de nous avoir permis d'organiser la conférence de robotique internationale IROS'2002 à Lausanne.

Je tiens ensuite à remercier tous les rapporteurs de ma thèse pour leurs conseils et pour avoir accepté cette tâche. Le Professeur Jean-Daniel Nicoud pour m'avoir inculqué sa passion pour les robots mobiles et pour l'intégration mécatronique poussée à l'extrême. Le Professeur Reymond Clavel pour les nombreuses discussions sur les mécanismes et les degrés de liberté. Le Professeur Steven Shooter pour ses encouragements qui m'ont aidé à mettre un point final à tout ce travail. Willy Maeder pour sa disponibilité et ses bons conseils en matière de construction mécanique.

Je voudrais aussi remercier tous les membres du Laboratoire de Systèmes Autonomes avec qui j'ai passé des moments de discussion et de rigolade inoubliables dans la salle «café» et sur la terrasse (Gilles, Björn, Kai, Nicola, Pierre, Greg, Rollo, Gui, Alex, Jan, ...) et plus spécialement tous mes collègues de bureau qui se sont succédés durant toutes ces années. Dans l'ordre: Markus, Thomas, Urs, Yves, Francesco, Samir.

Merci à tous les étudiants qui ont effectué leur projet de semestre ou de diplôme avec moi (Daniel Baer, François Conti, Olivier Corbat, Yann Crausaz, Mathias Deschler, Xavier Greppin, Gael Helie, Jean-Marc Koller, Ambroise Krebs, Antoine Lorotte, Mathieu Meisser, Baptiste Merminod, Roland Meyer, Stéphane Michaud, Alain Pachoud, Unai Viscarret, Christophe Yamahata).

Un grand merci à notre secrétaire Marie-Jo Pellaud pour sa gentillesse, son sens de l'anticipation et son efficacité légendaire.

Merci aussi aux deux ingénieurs électroniciens du labo, Ralph Piguet et Daniel Burnier, pour avoir éclairé ma lanterne plus d'une fois en matière de conception et de réalisation de circuits.

Dans le cadre de ce travail, de nombreux prototypes ont été réalisés. Ces derniers n'auraient jamais pu voir le jour sans les différents ateliers disséminés dans toute l'école. Pour la mécanique, merci à André Guignard, Jean-Paul Brugger, Jean-Jacques Crausaz, Pascal Zbinden, Claude Amendola et surtout Georges Perrenoud pour tous les travaux qu'ils ont réalisé dans le cadre de ce projet. Pour l'électronique, merci à Georges Vaucher (ACORT), à Philippe Vosseler et toute l'équipe de l'atelier de réalisation de circuits imprimés.

Merci à mon père Vincenzo et à ma mère Francesca de m'avoir élevé en me donnant le bon exemple et de m'avoir permis de faire des études, à mes frères Tony et Marco, à ma soeur Marie-Ange, à toute ma famille en Sicile et en Suisse et ma belle famille au Pérou pour tout leur soutien, leur gentillesse et leurs prières.

Finalement, je voudrais dédier ce travail à mon épouse Verónica pour la remercier de sa patience lorsque je rentrais du labo très tard le soir et surtout pour tout l'amour qu'elle me porte.

Lausanne, le 19 août 2003

Michel Lauria

Version Abrégée

Les véhicules terrestres sont des machines conçues pour transporter des personnes ou des marchandises d'un point à un autre de l'environnement tout en se déplaçant à la surface de la Terre. On parle de véhicule tout-terrain lorsque le bon fonctionnement du mécanisme de locomotion n'est pas dépendant de l'existence, au sein de l'environnement, d'un chemin préexistant créé par l'homme. Pour pouvoir atteindre son objectif, le véhicule a besoin d'un pilote qui le manoeuvre. Le rôle du pilote est multiple. Dans un premier temps, il perçoit l'environnement afin de collecter des informations relatives à la structure du terrain sur lequel il évolue. Dans un deuxième temps, il analyse ces données afin de se localiser dans l'environnement. Dans un troisième temps, il planifie son mouvement en tenant compte des capacités de franchissement du mécanisme de locomotion qu'il conduit, de la destination finale à atteindre et de la structure de l'environnement qui l'entoure. Finalement, il induit le mouvement en contrôlant les moteurs du mécanisme. Selon le type de véhicule, le pilotage peut être entièrement manuel, partiellement assisté par une machine ou totalement autonome. Dans les deux derniers cas, on parle respectivement de véhicule partiellement robotisé et de véhicule totalement robotisé ou robot mobile autonome.

Grâce aux progrès techniques qui ont été réalisés ces dernières années dans le domaine des capteurs et de la micro-informatique, il est possible d'imaginer de nouveaux concepts de locomotion pour le tout-terrain qui soient partiellement ou totalement robotisés. L'objectif de cette thèse est d'étudier, de concevoir, de réaliser et de tester de nouvelles architectures de systèmes de locomotion ayant des capacités de franchissement autonome des obstacles rencontrés en milieu tout-terrain. Dans le cadre de ce travail, nous avons focalisé notre étude sur les mécanismes de locomotion roulants qui se déplacent suffisamment lentement pour que les effets dynamiques puissent être négligés. Deux classes de mécanismes ont été mis en évidence:

- les mécanismes à suspension passive qui s'adaptent automatiquement aux irrégularités du terrain sans aucun mécanisme de rétroaction actif
- les mécanismes à suspension active qui se basent sur une perception du relief du terrain afin de pouvoir contrôler la traction et la stabilité du véhicule en agissant sur des moteurs intégrés dans la structure

Dans le cadre de ce travail, plusieurs concepts novateurs ont été imaginés, réalisés et testés:

- *Shrimp* est un mécanisme de locomotion à suspension passive. Son architecture mécanique extrêmement simple lui confère une très grande robustesse. Ses capacités de franchissement autonome en milieu tout-terrain lui permettent de passer là où d'autres véhicules de même proportion restent bloqués.
- *La roue tactile* est un concept qui associe la perception tactile avec la fonction mécanique d'une roue. Ce travail a permis de démontrer sa faisabilité et son utilité pour améliorer les capacités de franchissement des robots tout-terrain.
- *Octopus* est un mécanisme de locomotion à suspension active. Son architecture mécanique extrêmement complexe lui confère une très grande agilité. Ses capacités de franchissement autonome en milieu tout-terrain dépendent des organes de perception et des algorithmes de contrôle qui ont également fait l'objet d'une recherche dans le cadre de ce travail. Le problème a été partiellement résolu grâce à l'utilisation des roues tactiles pour la détection des zones de contact avec le terrain. A l'heure actuelle, le prototype réalisé n'a pas encore démontré tout son potentiel de franchissement autonome car les roues tactiles réalisées ne permettent pas de mesurer les forces de contact avec la précision nécessaire.

Actuellement, les mécanismes à suspension passive sont arrivés à maturité et sont déjà utilisés dans des applications comme l'exploration planétaire. Cependant, les mécanismes à suspension active gardent un potentiel de franchissement inégalable passivement. Mais ces qualités ne peuvent être exploitées qu'au prix d'une intégration mécatronique de capteurs, de moteurs et d'algorithmes de contrôle spécialisés. La miniaturisation toujours plus poussée des composants électroniques, les matériaux émergents, les nouvelles techniques d'usinage et les nouvelles découvertes en intelligence artificielle permettent d'augmenter peu à peu le rayon d'action des robots mobiles. De nouvelles applications verront certainement le jour lorsque ces nouveaux concepts de locomotion à suspension active seront suffisamment robustes pour affronter le monde réel.

Abstract

Robotic ground vehicles are mechanisms that use gravity and contact forces with the ground to perform motion. They can either be wheeled, tracked or legged. In this thesis we will focus on n-wheeled vehicles able to perform ground following motion with all the wheels maintaining contact at the same time. The main goal of this work is to establish the implication of the topological architecture of the vehicle mechanism on criteria such as climbing skills, robustness, ground clearance, weight, power consumption, and price. Efficient tools will be provided to help the robot designer to understand the implications of important design parameters like the number of wheels, the vehicle mechanism, and the motorisation of joints on the above criteria.

The general state of a robotic ground vehicle can be described using spatial vectors containing both the linear and angular components of physical quantities such as position, velocity, acceleration and linear force. By definition, there is motion when the vehicle's link velocity state vector (expressed from the ground reference) is greater than zero. Wheeled ground following motion is then a special case of vehicle constrained motion where all wheels maintain contact with the ground.

This thesis will describe a general kinematic and dynamic analysis of n-wheeled ground following robots. We will then discuss "contact forces optimisation techniques" and show the relationship between the number of wheels of a vehicle mechanism, the topological structure and the optimised degrees of freedom that we can get for the contact forces distribution. We will conclude with some considerations concerning the sensors needs for on-board terrain estimation.

We will emphasise our argument using our two robot designs as examples:

Shrimp: A 6-wheeled ground vehicle based on a 3 DOF passive suspension mechanism. With this design, no sensor based control is necessary to maintain ground contact with all the wheels. The distribution of tangential contact forces is

done passively but can be optimised with on board active control and sensors for contact properties estimation (gyro, joint position sensors).

Octopus: A 8-wheeled ground vehicle based on a (6 DOF active + 1 DOF passive) suspension mechanism. The autonomous coordination of the active 14 DOF is based on the on-board integration of inclinometer, joint position sensors and tactile wheels able to sense ground contact properties (angle, curvature, force, ...). With this design, active control can distribute the contact forces to minimise tangential forces and increase traction. This decreases the need for friction to climb obstacles.

The theoretical investigation and new sensing concepts enable the design these two robots that demonstrate excellent capabilities for rough terrain.

Passive Wheeled Locomotion Mechanisms (WLM) solutions are now mature enough for real applications like space exploration. However, active WLM solutions demonstrate potential climbing skills that cannot be equalled passively. Enhanced integration of sensors, actuators and advanced embedded control algorithms will lead to greater applications for future field and service robotics applications.

1

Introduction

1.1 Avant-propos

1.1.1 De l'Homme à la machine

Depuis la nuit des temps, les êtres vivants puisent dans la Nature de quoi satisfaire leurs besoins vitaux primordiaux. Au gré des changements climatiques et géologiques de l'environnement, les mécanismes de reproduction, de mutation génétique et de sélection naturelle vont peu à peu permettre à la vie de conquérir la planète et d'occuper un très grand nombre de niches écologiques. Ce mécanisme appelé «évolution» confère aux êtres vivants une remarquable faculté d'adaptation mais génère également un climat de compétition permanent où la survie d'une espèce passe par une éternelle remise en question de sa morphologie et de son mode de vie. C'est ainsi que, suite à un bouleversement géologique majeur, une espèce de mammifères dont nous descendons fut contrainte de quitter son milieu arboricole d'origine pour coloniser la terre ferme qui était alors occupée par de nombreux prédateurs. Peu à peu, la morphologie de ces premiers hominidés se métamorphose. La stature du corps se redresse leur permettant ainsi de voir plus loin pour avoir plus de chance d'échapper aux prédateurs et afin de pouvoir couvrir de plus grandes distances en se fatiguant moins pour trouver de la nourriture. Avec l'apparition de la bipédie, les membres supérieurs se spécialisent dans la manipulation et l'utilisation d'objets de toute sorte. Ces outils vont leur permettre d'étendre leur champ d'action sur l'environnement pour en extraire des ressources auxquelles aucune autre espèce n'avait alors accès. La maîtrise du feu marquera alors un tournant décisif pour l'espèce car ils passent alors du statut de proie à celui du plus redoutable des prédateurs. C'est ainsi que les nombreuses richesses «cachées» de la terre vont peu à peu favoriser ceux qui arriveront à les exploiter au mieux. Depuis ces temps reculés jusqu'à aujourd'hui, l'homme n'a pas cessé d'en découvrir de nouvelles qu'il exploite en créant de nouveaux outils

à partir de ceux dont il dispose et qu'il maîtrise déjà. Par exemple, la roue et le levier font partie des premières inventions qui lui ont permis de manipuler et de déplacer de lourdes charges sur de plus grandes distances et avec moins de fatigue. Grâce à ses découvertes, il a pu bâtir des villes et des sociétés évoluées qui seront à leur tour à l'origine de nouveaux progrès. Il a aussi appris à exploiter de nouvelles sources d'énergie ce qui lui a permis de remplacer le travail de sa propre force musculaire par celui des forces présentes dans la nature sous de nombreuses formes. Qu'elle soit hydraulique, à vapeur ou électrique, la machine devient l'outil indispensable à la société de l'homme moderne. Grâce à la découverte des ordinateurs, la machine se transforme et devient de plus en plus indépendante de son créateur. On parle alors de machine autonome ou de robot.

1.1.2 Qu'est ce qu'un robot ?

Pour comprendre ce qu'est un robot, il faut d'abord comprendre les hommes et leurs relations avec l'environnement dans lequel ils vivent. L'homme fait partie des êtres vivants et comme eux, il a des besoins vitaux. A l'origine, ces derniers étaient les mêmes que ceux de tous les êtres vivants à savoir: survivre et se reproduire. Pour les satisfaire, il doit donc constamment interagir avec son environnement pour en extraire de quoi assurer la survie de son espèce. A la base, la nature l'avait déjà doté d'un corps possédant des fonctions sensorimotrices et une intelligence exceptionnelle. Il était déjà capable d'accomplir «à mains nues» les tâches nécessaires à sa survie. Peu à peu, il s'est servi de ce capital pour amplifier ses facultés d'origine. Il a appris à se servir d'outils pour élargir son champ d'action sur l'environnement. Il a ensuite fabriqué des machines utilisant ces outils mais qui étaient mues par d'autres force que la sienne. La robotique est née lorsqu'il a doté ces machines d'une «volonté» propre à se mouvoir selon des règles établies à l'avance pour accomplir une tâche spécifique. De nos jours, les robots sont des machines conçues par l'homme dans le but de l'aider à accomplir certaines tâches matérielles comme la manipulation ou la locomotion. Ces derniers sont des systèmes comprenant une partie «opérative» qui réalise la tâche grâce à un mécanisme articulé qui peut être muni d'un outil et une partie «décisionnelle» ou «commande» qui contrôle la partie opérative [Lallemand94]. Le tout étant bien sûr supervisé par l'homme et toujours sous son contrôle.

1.1.3 La robotique mobile

La robotique mobile est un domaine qui regroupe un ensemble de technologies permettant de construire des machines capables de se mouvoir de façon autonome dans notre environnement. D'une façon générale, le problème à résoudre peut se décomposer de la façon suivante [Siegwart99]:

- La perception de l'environnement

- La localisation dans l'environnement
- La planification du mouvement
- Le mouvement

L'implémentation d'un robot mobile autonome est un réel challenge vu la multidisciplinarité de ces tâches. L'environnement constitue sans doute le facteur qui influence le plus l'architecture d'un robot. A ce propos, nous pouvons établir un parallèle avec la Nature. En effet, cette dernière a été capable de résoudre le problème bien avant nous. Bien que les outils dont elle dispose soient complètement différents des nôtres, nous constatons que les solutions auxquelles elle a abouti, c'est à dire ses créatures, ont une morphologie qui est toujours fortement liée à la nature de l'environnement dans lequel ces dernières évoluent. Ceci explique que la diversité du règne animal et végétal va de pair avec la diversité des milieux pouvant accueillir la vie. De même, bien que la robotique mobile n'en soit encore qu'à ses premiers pas, nous pouvons déjà constater que les créatures artificielles que nous fabriquons ne sont capables de fonctionner que dans un type d'environnement bien spécifique et pour lequel elles ont été conçues.

1.1.4 Le sous-système de locomotion

Par définition, tout système capable de se déplacer possède une faculté de locomotion. D'un point de vue mécanique, dans le cas de la locomotion terrestre, les forces à prendre en considération sont la gravitation et les forces de réaction exercées par l'environnement. Par conséquent, si l'on désire contrôler le mouvement d'un corps, il est nécessaire de pouvoir contrôler ces forces de réaction. La Nature a su exploiter la diversité de l'environnement terrestre pour créer un très grand nombre de systèmes de locomotion tous aussi différents les uns des autres. En effet, il existe des animaux qui rampent, marchent, courent en s'appuyant sur la terre, qui nagent en s'appuyant sur l'eau, qui volent en s'appuyant sur l'air. Certains des mécanismes inventés par la Nature sont même tellement performants qu'ils témoignent d'une très longue évolution (profil hydrodynamique du corps des dauphins).

En robotique mobile, le mouvement est généré par un mécanisme de locomotion crée artificiellement. En règle générale, la planification du mouvement doit tenir compte des possibilités de ce mécanisme afin que le robot puisse se déplacer de façon sûre et efficace en évitant les dangers qui le menacent. Par exemple, un robot destiné à évoluer sur un sol non plat et parsemé d'obstacles de toutes tailles doit être capable de planifier la trajectoire qu'il devra suivre pour atteindre son but en tenant compte de ses propres capacités de franchissement. En d'autres termes, il devrait être en mesure de pouvoir évaluer et comparer les différents chemins qu'il pourrait emprunter afin de pouvoir choisir celui qui lui convient le mieux.

1.2 Objectifs et contributions

Le but de cette thèse est d'étudier, de concevoir, de réaliser et de tester de nouveaux concepts de locomotion qui permettent d'augmenter le rayon d'action des robots mobiles autonomes en milieu tout-terrain. Dans le cadre de ce travail, il faut comprendre la notion de «concept de locomotion» comme étant la combinaison mécatronique des organes mécaniques, de perception et de contrôle, au sein d'un même système (figure 1.1). Notre contribution portera donc sur la recherche de nouvelles architectures de systèmes mécatroniques intégrant de façon intelligente des mécanismes, des capteurs, des actionneurs et du contrôle afin de créer des machines capables de se mouvoir de façon autonome dans des environnements déstructurés, non plats et parsemés d'obstacles.

Nous focaliserons notre étude sur les mécanismes de locomotion roulants qui se déplacent suffisamment lentement pour que les effets dynamiques puissent être négligés.

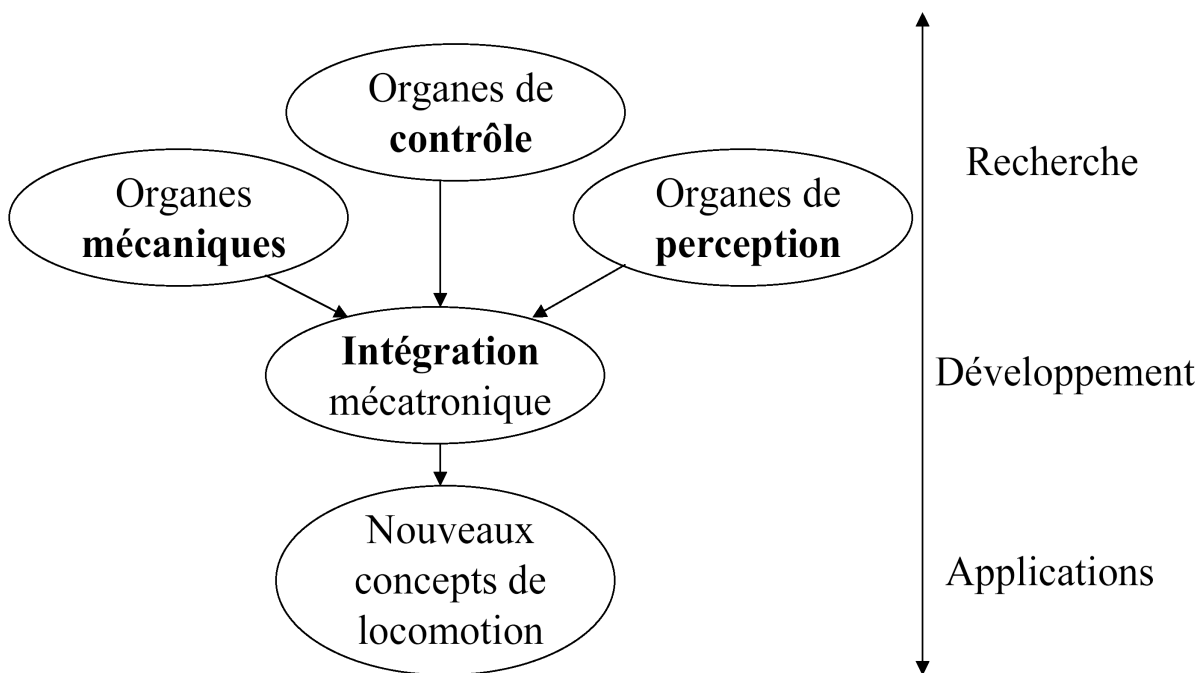


Figure 1.1: Explication illustrée de la notion de «concept de locomotion»

1.3 Plan de la thèse

Voici un résumé des différents chapitres de la thèse:

L'étude de la locomotion nécessite la compréhension des phénomènes d'équilibre et de déséquilibre des forces agissant sur les systèmes matériels. Le but du **deuxième chapitre** est de rappeler quelques bases théoriques qui serviront à la compréhension de ce travail. Nous exposerons en détail les notions qui caractéri-

sent les forces agissant sur les systèmes matériels (force de liaison, force appliquée par contact ou à distance, force active, force passive, force conservative ou non conservative)

Dans le **troisième chapitre**, nous proposerons une étude générale des mécanismes de locomotion. Dans un premier temps, nous commencerons par donner une définition à la notion de mécanisme de locomotion permettant d'exclure certains phénomènes de mouvements relatifs observés dans la nature comme le mouvement des astres. Nous parlerons ensuite du rôle essentiel que joue l'environnement ce qui nous permettra d'aborder les aspects énergétiques de la locomotion. Nous procéderons ensuite à une décomposition fonctionnelle des mécanismes de locomotion. Dans un deuxième temps, nous procéderons à une classification des mécanismes de locomotion. Les deux grands groupes de locomotion, passive (qui se meut grâce à des forces actives appliquées par l'environnement) et active (qui se meut grâce à des forces de motorisation générées de façon interne au mécanisme et qui s'appuie sur des forces passives de liaison exercées par l'environnement), seront ensuite définis. Dans le cadre de ce travail, nous nous attarderons sur la locomotion active utilisant la propulsion par réaction de contact à la surface d'un milieu solide. Après avoir caractérisé physiquement la notion de contact entre deux solides, nous passerons en revue les différentes stratégies de contact que l'on peut rencontrer dans les mécanismes de locomotion. Nous nous intéresserons plus particulièrement à ceux qui utilisent le contact non adhésif par attraction gravitationnelle et friction et qui se déplacent suffisamment lentement pour que les effets dynamiques inertiels puissent être négligés. Ces derniers seront finalement classifiés en utilisant trois critères d'appartenance binaire caractérisant l'évolution temporelle des organes de contact et des zones de contact.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes tout particulièrement intéressés aux mécanismes de type *RCL* (Section 4.4.6) c'est à dire:

- *(R)oll-Legged*: les organes de contact décrivent un mouvement global rotatif
- *(C)ontinuous-Footed*: Les organes de contact ne décollent pas durant la locomotion
- *(L)ittle-Footed*: Les organes de contact possèdent une zone de contact ponctuelle avec l'environnement.

Dans le **quatrième chapitre**, nous décrirons les hypothèses et nous fournirons les outils mathématiques permettant de modéliser la locomotion des mécanismes de type *RCL*.

Dans le **cinquième chapitre**, nous étudierons plus en détail les caractéristiques spécifiques aux mécanismes de locomotion tout-terrain roulants. Nous décrirons

les différentes classes de mécanismes qui composent ce type de véhicules (les mécanismes de braquage, les mécanismes de franchissement, les mécanisme permettant la variation de l'empattement des roues). Pour terminer, nous fournirons un catalogue de véhicules constituant en quelque sorte l'état de l'art du domaine. Nous compléterons la liste avec les prototypes réalisés dans le cadre de ce travail afin de faciliter la comparaison.

Dans le **sixième chapitre**, nous modéliserons la locomotion des mécanismes roulants 2D sur des terrains non plats. Après avoir posé les hypothèses nécessaires, nous commencerons par établir le modèle cinématique. Ce dernier sera validé par une simulation dans le cas du bi-roue simple. Nous présenterons ensuite le modèle dynamique direct et le modèle dynamique inverse. Cela nous permettra ensuite d'introduire le modèle quasi-statique comme cas particulier. Ce dernier sera également validé par une simulation dans le cas du bi-roue simple.

Dans le **septième chapitre**, nous présenterons les prototypes réalisés ainsi que les résultats expérimentaux obtenus. Nous procéderons par ordre chronologique en commençant par décrire le projet qui a suscité l'envie de commencer cette thèse. Nous décrirons ensuite, les uns après les autres, les différents prototypes réalisés. Nous terminerons par la présentation d'un robot, dont la conception et la réalisation nous a occupé durant une grande partie du temps, et qui synthétise tout ce qui a été fait dans le cadre de ce travail.

Nous concluons avec le **huitième chapitre** où nous évoquerons quelles sont, à notre sens, les perspectives futures à donner à cette recherche.

2

Rappels théoriques

L'étude de la locomotion nécessite la compréhension des phénomènes d'équilibre et de déséquilibre des forces agissant sur les systèmes matériels. Le but de ce chapitre est de rappeler quelques bases théoriques qui serviront à la compréhension de ce travail. Nous exposerons en détail les notions qui caractérisent les forces agissant sur les systèmes matériels (force de liaison, force appliquée par contact ou à distance, force active, force passive, force conservative ou non conservative). Les paragraphes en *italique* sont directement tirés de [Gruber88].

2.1 Mécanique des systèmes matériels

La mécanique est l'étude du mouvement - et du repos - de systèmes matériels caractérisés par des observables spatio-temporelles. De façon plus précise, les systèmes mécaniques seront définis par un ensemble fini ou infini de points matériels soumis à des forces appliquées supposées connues ainsi qu'à des forces de liaison inconnues.

Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons les modèles développés dans le cadre de la mécanique classique non relativiste qui est un cas particulier de la mécanique générale.

2.1.1 Point matériel et cinématique

Dans le cadre de la mécanique, notre perception du «monde» est décrite par l'évolution spatio-temporelle de «l'état pur» d'un ensemble de briques élémentaires appelées «points matériels».

La cinématique est l'étude des mouvements observés indépendamment des causes qui les produisent. Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir repérer la position d'un point matériel à un instant donné par rapport à un ensemble de N

points ($N \geq 4$), non coplanaires, immobiles les uns par rapport aux autres. L'ensemble de tous les points immobiles par rapport à ces N points considérés s'appelle référentiel \mathcal{R} . Ainsi, la notion de mouvement est intrinsèquement liée à celle de référentiel. Un objet, immobile pour un passager assis dans un avion, apparaît en mouvement pour un observateur sur la terre.

2.1.2 Les systèmes de points matériels et les trois lois de la mécanique

Les systèmes matériels sont définis comme un ensemble discret ou continu de points matériels. Par définition:

- Deux systèmes S_1 et S_2 sont dits en interaction si l'évolution temporelle de S_1 dépend de l'évolution de S_2 . Dans le cas contraire, ils sont dits sans interaction.
- Un système sans interaction avec l'extérieur est dit isolé. Par définition, l'évolution de tels systèmes est indépendante de l'extérieur et les causes de l'évolution sont à l'intérieur du système.
- Un système qui ne peut pas échanger de matière avec l'extérieur est dit fermé; dans le cas contraire, il est dit ouvert.
- Une grandeur est dite conservée si elle est constante au cours de l'évolution de systèmes isolés.
- Une grandeur est dite extensive si la valeur de cette grandeur pour un système formé de deux sous-systèmes est égale à la somme des valeurs pour chacun des deux sous systèmes.

La dynamique est l'étude des causes qui sont à l'origine de l'évolution du mouvement dans un système de points matériels. Elle peut se résumer par un ensemble de lois fondamentales décrivant les interactions entre les systèmes. Pour ce faire, nous avons besoin d'introduire deux nouvelles notions qui sont la masse (grandeur associée au système) et la force (grandeur décrivant l'action de l'extérieur sur le système).

Nous pouvons tout d'abord introduire le concept de masse comme étant une grandeur scalaire, positive, extensive et conservée représentant le nombre de particules élémentaires ou quantité de matière dans le système. Cela nous permet ensuite de définir la quantité de mouvement d'un point matériel comme le produit de la masse par la vitesse. La notion de quantité de mouvement d'un système de N points matériels est alors la somme des quantités de mouvement de chacun des points.

Introduisons maintenant le concept de force comme étant toute action de l'extérieur sur le système conduisant soit à une modification de l'état de repos (déformation), soit à une modification du mouvement. Par exemple, si l'on observe deux évolutions différentes d'un même système à partir du même état initial, on dira

que dans le deuxième mouvement il y'a eu soit une nouvelle force, soit une modification de l'une des forces agissant sur le système. Il en découle que la force est la seule façon de faire varier le mouvement d'un système.

L'observation conduit à l'énoncé des trois lois de la mécanique qui sont:

- *La quantité de mouvement d'un point matériel reste constante au cours de l'évolution si et seulement si la résultante des forces qui agissent sur lui est égale à zéro.*
- *La dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement d'un point matériel est égale à la résultante des forces qui agissent sur lui.*
- *Pour tout système fermé, le torseur des forces intérieures est équivalent à zéro à tout instant et quel que soit le mouvement du système.*

2.1.3 L'origine des forces entre les points matériels

Les trois lois de la mécanique suffisent à décrire l'évolution de l'état de tout système matériel à partir d'un état initial connu. Cependant, elles ne disent rien sur l'origine des forces. L'observation nous a conduit à penser qu'il existait quatre forces fondamentales dans la nature. Dans le cadre de la mécanique classique, les forces avec lesquelles nous travaillerons sont toutes d'origine gravifique ou électromagnétique. Les deux autres forces fondamentales (fortes et faibles), ayant une portée de l'ordre du Fermi, ne seront pas observables.

2.1.3.1 Les forces de gravitation

L'observation conduit à l'énoncé de la loi de la gravitation dans sa forme non relativiste:

- Tout point matériel A exerce sur un point matériel B une force attractive, appelée force de gravitation. De plus, l'intensité de cette force est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance.

2.1.3.2 Les forces électromagnétiques

Alors que le principe d'équivalence permet de décrire quantitativement la force d'attraction gravitationnelle à partir des masses et de la distance de deux points matériels, il n'en va pas de même pour les forces électromagnétiques. La manifestation de ce type de force ne peut s'expliquer que par l'introduction d'une nouvelle propriété de la matière que nous appellerons charge électrique. Il s'agit d'une grandeur qui peut être positive ou négative, extensive, conservée, indépendante de l'état du point matériel et de l'extérieur. La notion de charge permet ensuite d'introduire les notions de courant, de champ électrique et de champ magnétique. Tous les phénomènes électriques entre les systèmes matériels peuvent être expli-

qués par les interactions entre ces grandeurs. Ces interactions se résument de la façon suivante [Monard87]:

- Un point matériel chargé crée un champ électrique
- Un point matériel chargé en mouvement crée un champ magnétique
- Un champ électrique exerce une force sur un point matériel chargé
- Un champ magnétique exerce une force sur un point matériel chargé en mouvement
- Une variation de champ magnétique crée un champ électrique
- Une variation de champ électrique crée un champ magnétique

2.1.4 Les états stables des systèmes de points matériels: la matière

On observe dans la nature que les systèmes de points matériels peuvent se regrouper et former des structures plus complexes dont l'état va persister au cours du temps. Ces structures peuvent alors se regrouper pour produire des structures encore plus complexes. On observe que ce phénomène se reproduit à différentes échelles de l'espace. Ainsi, la matière est une structure formée d'atomes et son état peut être solide, liquide, gazeux ou plasma.

2.1.5 Les interactions entre les systèmes de points matériels

L'observation montre que l'action de l'extérieur sur un système de points matériels peut s'effectuer soit par contact, soit par action à distance. De plus, la force peut agir soit en un point, soit être distribuée sur une surface (force de pression, frottement, tension) ou dans un volume (forces gravifiques, d'inertie, de Coriolis). Les forces volumiques sont généralement associées à des forces à distance, tandis que les forces superficielles sont typiquement des forces de contact. En réalité, les forces de contact ne sont qu'une interprétation macroscopique des interactions électromagnétiques entre les atomes qui ne sont effectives qu'à très courte distance. Les phénomènes d'interaction observés entre deux systèmes formés d'un très grand nombre de points matériels ont donné lieu à des modèles macroscopiques et sont étudiés dans le cadre de disciplines comme la thermodynamique, la mécanique des corps célestes, la mécanique des fluides, la chimie, la tribologie, la mécanique des structures, l'électromécanique.

La modélisation macroscopique des phénomènes d'interaction entre systèmes de points matériels nous permet de classer les forces en deux groupes:

- Les forces appliquées: ce sont des forces connues, définies de façon univoque par l'état du système et de l'extérieur.

- Les forces de contraintes ou de liaison: ce sont des forces inconnues a priori qui imposent certaines restrictions aux mouvements. Ces forces s'adaptent à tout instant de manière à ce que la troisième loi de la mécanique et les contraintes de mouvement soient toujours respectées.

Nous allons maintenant passer en revue les différents phénomènes d'interaction qui vont nous intéresser dans le cadre de ce travail.

2.1.5.1 Le poids

La loi de la gravitation nous apprend que tout système matériel fermé est influencé à distance par le reste de la matière de l'univers. La notion de poids est définie de la manière suivante:

- Le poids d'un système matériel fermé A par rapport à un système matériel fermé B est égal à la résultante du torseur de toutes les forces gravifiques exercées par tous les points matériels de B sur tous les points matériels de A.

Le poids est donc une force appliquée définie à chaque instant de façon univoque par l'état des deux systèmes. De plus il n'est pas influencé par la valeur des quantités de mouvement des points matériels de A et B.

2.1.5.2 Les forces électromécaniques

La structure de la matière peut devenir le siège de phénomènes électromagnétiques macroscopiques observables à notre échelle. Les matériaux conducteurs de courant électrique et les matériaux conducteurs de flux magnétique deviennent alors les briques fondamentales de structures plus complexes appelées circuits électriques et circuits magnétiques. Les forces électromécaniques sont des forces appliquées qui résultent de cinq formes possibles d'interactions [Jufer95]:

- L'interaction entre deux courants
- L'interaction entre un courant et un circuit ferromagnétique
- L'interaction entre un aimant permanent et un courant
- L'interaction entre un aimant permanent et un circuit ferromagnétique
- L'interaction entre deux surfaces chargées électrostatiquement

L'électromécanique est aussi le nom que l'on donne à la science qui étudie ces phénomènes.

2.1.5.3 Les forces de frottement sec entre les solides

Le frottement sec entre solides est un phénomène extrêmement complexe et son étude détaillée se fait dans le cadre de la tribologie. *Toutefois, il est possible de prendre en considération les forces de frottement dans le cadre de la mécanique en introduisant des lois phénoménologiques; de telles lois résument un ensemble*

de résultats observés sous certaines conditions, mais elles n'ont pas un caractère absolu et ne sont pas des lois fondamentales. D'une façon générale, on dira que les forces de frottement sec sont des forces de contact qui s'opposent au mouvement relatif entre deux solides. On distingue:

- La force de frottement tangentielle
- La résistance au roulement
- La résistance au pivotement

Dans ce qui va suivre nous les considérerons comme:

- des forces de liaison lorsqu'il n'y a pas de mouvement relatif. On parlera alors de forces de frottement statique et elles pourront se calculer si l'on connaît les forces appliquées et les contraintes de mouvement.
- des forces appliquées lorsqu'il y'a mouvement relatif. On parlera alors de forces de frottement dynamique et elles pourront se calculer à partir des lois phénoménologiques de Coulomb en fonction de la vitesse relative et de la force normale de contact.

2.1.5.4 Les forces normales de contact entre les solides

Ces forces apparaissent à la surface de contact entre deux solides pour s'opposer à leur interpénétration. Dans ce qui va suivre, nous les considérerons comme un torseur de forces de liaison dont la résultante se calcule à partir des forces appliquées et des contraintes de mouvement. Cependant, la distribution des composantes du torseur peut se calculer à partir de la loi phénoménologique de Hertz à partir des caractéristiques physiques des corps en contact.

2.1.5.5 Les tensions internes dans les solides

L'état solide de la matière se caractérise par le fait que la position relative moyenne des atomes reste la même au cours du temps grâce aux interactions électromagnétiques interatomiques. Considérons maintenant un morceau de matière solide ainsi qu'une surface continue qui le coupe en deux systèmes de points matériels A et B. L'action de A sur B est un torseur de forces liées dont les points d'application se situent sur la surface donnée. Ces forces sont les tensions internes qui assurent la cohésion de A par rapport à B. Leur étude se fait dans le cadre de la mécanique des structures [DelPedro01]. Dans ce qui va suivre, nous pouvons les considérer comme:

- des forces appliquées: la loi phénoménologique de Hooke permet de calculer les forces de tension internes à partir d'un état de déformation connu.

- des forces de liaison: Les lois de la mécanique permettent de calculer les forces de tension internes à partir des forces appliquées. La loi phénoménologique de Hooke permet de calculer les déformations à partir des forces appliquées.

2.1.6 Puissance et travail d'une force

La puissance instantanée développée par une force \vec{F} agissant sur un point d'application ayant une vitesse \vec{v} est donnée par la relation:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (2.1)$$

Le travail effectué par cette force pendant l'intervalle de temps (t_1, t_2) est défini par:

$$W_{(t_1, t_2)} = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t) dt \quad (2.2)$$

2.1.7 Forces actives et forces passives

Une force est dite passive si elle ne fournit aucun travail au cours de son évolution temporelle. Par exemple:

- La force de frottement sec est passive dans le cas du roulement sans glissement car la vitesse du point d'application est nulle.
- La force de réaction normale exercée par une surface immobile sur un solide en contact est toujours passive quel que soit le mouvement du solide et du point de contact car la vitesse de ce dernier est toujours perpendiculaire à la force de réaction normale.
- Le poids d'un solide est passif tant que son mouvement reste perpendiculaire au champ de force gravitationnel qui le crée.

Une force est dite active lorsqu'elle fournit un travail non nul au cours de son évolution temporelle.

- La force de frottement sec dynamique est toujours active car elle ne se manifeste que lorsque deux surfaces en contact glissent l'une par rapport à l'autre. La vitesse du point d'application est alors égale à la vitesse de glissement.
- La force normale de contact qui apparaît lorsqu'un solide pousse un autre solide est active car la vitesse du point de contact et la force ne sont pas perpendiculaires.
- Le poids d'un solide est actif si son mouvement n'est pas perpendiculaire au champ de force gravitationnel qui le crée.

2.1.8 Théorème de l'énergie cinétique

L'énergie cinétique E^{cin} d'un système de points matériels est définie par:

$$E^{cin} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{1}{2} \cdot m_{\alpha} \cdot v_{\alpha}^2 \quad (2.3)$$

La dérivée par rapport au temps de l'énergie cinétique est égale à la somme des puissances développées par toutes les forces extérieures et intérieures:

$$\frac{d}{dt}(E^{cin}) = P^{ext} + P^{int} \quad (2.4)$$

2.1.9 Forces conservatives et énergie potentielle

Une force est dite conservative si son travail ne dépend que des extrémités et non de la forme du chemin de son point d'application. On peut montrer que le poids est une force conservative. Il en va de même pour les forces élastiques produites par déformation de la matière.

L'énergie potentielle se définit exclusivement pour un point matériel situé en un point P soumis à un champ de forces conservatif. Pour ce faire, on choisit arbitrairement un point O . L'énergie potentielle du point matériel est égale au travail que devrait fournir la force pour passer du point P au point O . Ce travail ne dépend que de la position de P par rapport à O et non du chemin décrit par le point d'application de la force.

2.1.10 Forces non conservatives

Les forces sont non conservatives lorsque leur travail dépend de la trajectoire ou de l'horaire. Si le travail fourni est négatif, la force est dissipative (forces de frottement dynamiques). Si le travail fourni est positif, la force est propulsive ou motrice (muscle ou moteur).

2.1.11 Théorème de l'énergie mécanique

L'énergie mécanique d'un système de points matériels est égale à la somme des énergies cinétiques et potentielles du système.

$$E^{mec} = E^{cin} + E^{pot'ext} + E^{pot'int} \quad (2.5)$$

Dans la relation ci-dessus, on distingue les énergies potentielles dues aux champs de force conservatifs internes de celles dues aux champs de forces conservatifs externes.

La dérivée par rapport au temps de l'énergie mécanique d'un système matériel est égale à la puissance développée par toutes les forces qui ne contribuent pas à l'énergie potentielle (non conservatives):

$$\frac{d}{dt}(E^{mec}) = P^{nc} \quad (2.6)$$

3

Les mécanismes de locomotion

Dans ce chapitre, nous proposons une étude générale des mécanismes de locomotion.

Dans un premier temps, nous commencerons par donner une définition à la notion de mécanisme de locomotion permettant d'exclure certains phénomènes de mouvements relatifs observés dans la nature comme le mouvement des astres. Nous parlerons ensuite du rôle essentiel que joue l'environnement ce qui nous permettra d'aborder les aspects énergétiques de la locomotion. Nous procéderons ensuite à une décomposition fonctionnelle des mécanismes de locomotion.

Dans un deuxième temps, nous procéderons à une classification des mécanismes de locomotion. Les deux grands groupes de locomotion, passive (qui se meut grâce à des forces actives appliquées par l'environnement) et active (qui se meut grâce à des forces de motorisation générées de façon interne au mécanisme et qui s'appuie sur des forces passives de liaison exercées par l'environnement), seront ensuite définis. Dans le cadre de ce travail, nous nous attarderons sur la locomotion active utilisant la propulsion par réaction de contact à la surface d'un milieu solide. Après avoir caractérisé physiquement la notion de contact entre deux solides, nous passerons en revue les différentes stratégies de contact que l'on peut rencontrer dans les mécanismes de locomotion. Nous nous intéresserons plus particulièrement à ceux qui utilisent le contact non adhésif par attraction gravitationnelle et friction et qui se déplacent suffisamment lentement pour que les effets dynamiques inertiels puissent être négligés. Ces derniers seront finalement classifiés en utilisant trois critères d'appartenance binaire caractérisant l'évolution temporelle des organes de contact et des zones de contact.

3.1 Définition

Par définition, le «mouvement» décrit un *changement de position dans l'espace en fonction du temps par rapport à un système de référence* et la «locomotion» décrit toute *action de se mouvoir ou de se déplacer d'un lieu vers un autre* ou toute *fonction qui assure ce mouvement* [Petit Robert I]. Considérons un système matériel S_1 fermé en mouvement par rapport à un système matériel S_2 ouvert. Si la configuration et la structure des points matériels qui forment S_1 n'est pas le fruit du hasard mais le résultat d'une recherche délibérée visant à développer la faculté de locomotion de S_1 par rapport à S_2 , alors la notion de «mécanisme de locomotion» peut servir à désigner deux choses:

- une description phénoménologique des causes du mouvement de S_1 par rapport à S_2 .
- une description morphologique de S_1

Cette définition permet de restreindre la notion de «mécanisme de locomotion» à deux grandes classes de systèmes matériels qui sont:

- les êtres vivants dont la faculté de locomotion est le résultat de l'évolution
- les systèmes mécaniques mobiles artificiels dont la faculté de locomotion est le résultat de la recherche d'une forme d'intelligence évoluée

Cette définition permet d'exclure certains phénomènes de mouvement relatif observés dans la nature comme par exemple:

- le mouvement des astres
- l'écoulement d'un liquide à la surface d'un solide
- les phénomènes météorologiques

Par la suite, nous utiliserons le terme «mécanisme de locomotion» pour désigner S_1 et le terme «environnement» pour désigner S_2 .

3.2 Le rôle de l'environnement dans la locomotion

L'environnement est le substrat nécessaire à tous les mécanismes de locomotion. Il joue un rôle multiple:

- Il sert de système de référence dans la définition du mouvement des mécanismes de locomotion
- Il applique les forces qui sont la cause du mouvement des mécanismes de locomotion
- Il sert de tampon énergétique aux mécanismes de locomotion

L'environnement est un système formé d'un nombre gigantesque de points matériels. Les interactions avec un mécanisme de locomotion peuvent avoir lieu de deux manières différentes (Section 2.1.5):

- Par action à distance: cette catégorie regroupe l'attraction gravitationnelle et les phénomènes électromagnétiques de longue portée.
- Par contact direct: cette catégorie regroupe tous les phénomènes de frottement qui s'opposent au mouvement relatif de deux systèmes matériels qui tendent à occuper la même portion d'espace.

Il existe donc une symbiose entre un mécanisme de locomotion et l'environnement pour lequel il a été créé. En d'autres termes, un mécanisme donné ne possédera pas forcément la faculté de locomotion dans tous les types d'environnements. Dans la nature, on observe que l'évolution a adapté les mécanismes de locomotion des êtres vivants à un nombre très varié d'environnements terrestres. L'homme, lui, a été capable de transformer l'environnement pour faciliter dans un premier temps sa propre locomotion en créant des voies de locomotion (chemins, escaliers, ponts, ...). Il a ensuite pu créer des mécanismes de locomotion extrêmement performants capables de fonctionner le long de voies artificielles spécialisées. (automobile sur asphalte, train sur rails, ...)

3.3 Considérations énergétiques

Du point de vue de l'ingénieur, un mécanisme de locomotion est un système qui permet de déplacer une charge utile de façon contrôlée ou non d'un point à l'autre de l'environnement. On peut dire que tout mécanisme de locomotion est susceptible de posséder trois types d'interfaces avec l'extérieur (figure 3.1):

- Une interface avec l'environnement dans lequel il évolue
- Une interface avec une ou plusieurs sources d'énergie
- Une interface avec la charge utile qu'il transporte

De façon générale, la fonction d'un mécanisme est de transformer de l'énergie [Spinnler97]. Dans le cas d'un mécanisme de locomotion, les énergies en jeu sont:

- l'énergie cinétique des masses en mouvement
- l'énergie potentielle des masses soumises à l'action de la pesanteur
- l'énergie fournie par les moteurs du mécanisme
- l'énergie potentielle des éléments élastiques du mécanisme
- l'énergie dissipée par frottement

A un instant donné de l'évolution d'un mécanisme de locomotion, on distingue:

- les flux d'énergie du mécanisme avec la source d'énergie
- les flux d'énergie du mécanisme avec la charge utile

- les flux d'énergie du mécanisme avec l'environnement

Tous ces flux d'énergie sont bidirectionnels. Nous allons maintenant décrire plus en détail les différents échanges énergétiques qui peuvent avoir lieu entre un mécanisme de locomotion et le monde extérieur.

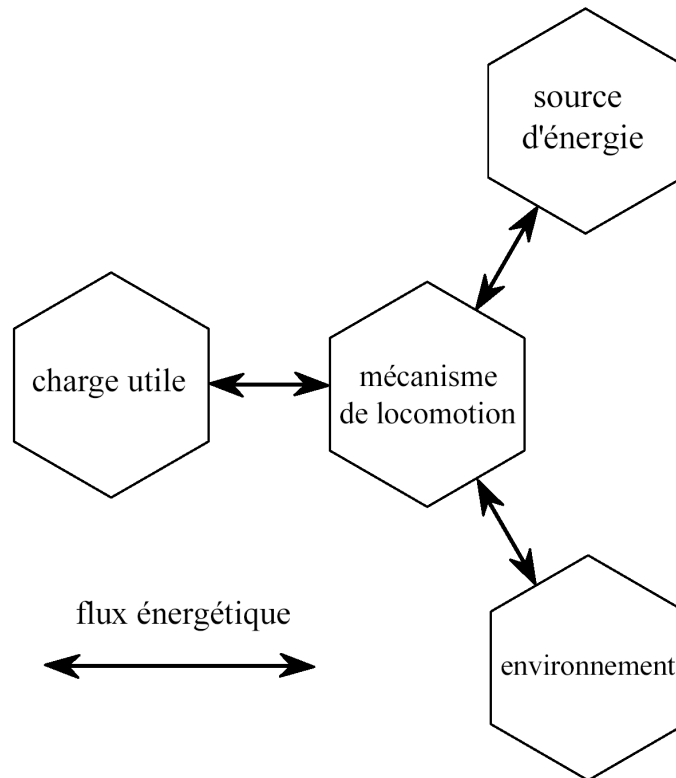


Figure 3.1: Les différents flux énergétiques d'un mécanisme de locomotion avec l'extérieur

3.3.1 Echanges avec une source d'énergie

L'énergie motrice d'un mécanisme peut provenir d'une source d'énergie mécanique ou non mécanique. Pour les mécanismes de locomotion, les sources d'énergie non mécaniques (accumulateurs électriques, carburants) sont beaucoup plus souvent utilisées dans la pratique car elles possèdent un meilleur rapport d'énergie massique que les sources d'énergie mécaniques (cinétique, potentielle gravitationnelle, potentielle élastique). A ce sujet, on se référera à [Nicoud00] pour une étude comparative de ces différentes solutions. La transformation en énergie mécanique est effectuée par un organe moteur. Grâce à lui, la puissance délivrée au mécanisme peut en général être modulée temporellement par un système de contrôle. Dans tous les cas, le flux énergétique entre dans le mécanisme sous la forme de forces appliquées aux différentes pièces mobiles de l'organe moteur. Par le principe de l'action-réaction, ces forces appliquées vont toujours par paires. Un moteur en mouvement reçoit un effort passif et fournit un effort actif. La puissance

délivrée par le moteur est donnée par le travail de l'effort actif. L'effort passif ne travaille pas et sert uniquement de réaction.

Dans certains cas, le flux d'énergie peut s'inverser et on dit que le moteur fonctionne comme générateur. Une partie de l'énergie mécanique ainsi transformée peut alors être stockée dans la source et pourra être réutilisée lorsque le flux changera à nouveau de direction.

La principale source d'énergie mécanique utilisée dans les mécanismes de locomotion est l'énergie potentielle élastique.

Les principales sources d'énergie non mécanique utilisées pour alimenter les mécanismes de locomotion sont les accumulateurs électriques et les carburants.

3.3.2 Echanges d'énergie avec la charge utile

La charge utile est une masse que l'on désire déplacer d'un point à un autre de l'environnement. Les échanges d'énergie avec le mécanisme de locomotion sont de nature bidirectionnelle. On peut les classifier en deux catégories:

- La charge utile peut recevoir ou fournir de l'énergie cinétique selon qu'elle accélère ou qu'elle ralentit.
- La charge utile peut recevoir ou fournir de l'énergie potentielle gravitationnelle selon qu'elle monte ou qu'elle descend.

Le mécanisme de locomotion a donc un double rôle. Non seulement, il doit être capable de fournir de l'énergie cinétique et potentielle à la charge utile mais il doit également être en mesure de la récupérer. La charge utile peut donc être à la fois réceptrice et motrice selon le sens des flux énergétiques.

3.3.3 Echanges d'énergie avec l'environnement

Les frottements sont à l'origine des échanges dissipateurs d'énergie avec l'environnement. Dans les mécanismes de locomotion, on distingue:

- les frottements internes qui s'opposent au mouvement relatif de deux pièces du mécanisme en contact glissant. L'énergie du travail de ces forces est dissipée de façon thermique dans l'environnement et se traduit en général par une usure des surfaces de contact. Dans la plupart des cas, on cherche à limiter ce phénomène dans les mécanismes. Cependant, la dissipation thermique est souvent le seul moyen d'arrêter un mécanisme en mouvement. On utilise alors des organes spéciaux de freinage conçus à cet effet.
- la dissipation thermique par effet Joule des moteurs électriques
- les frottements externes qui s'opposent au mouvement du mécanisme par rapport à l'environnement. On peut citer par exemple les frottements hydrodynamiques et la résistance au roulement. Dans la plupart des cas, on cher-

che à limiter ces phénomènes d'interaction en créant par exemple des surfaces aérodynamiques (coques de bateau, fuselage d'avion). Dans d'autres cas, on cherche à amplifier ce phénomène pour freiner le système mécanique (parachute).

Dans certains cas, l'environnement peut fournir de l'énergie au mécanisme de locomotion. Des organes spéciaux sont introduits dans le mécanisme pour capter et transformer ces sources d'énergie afin de motoriser le système (voiles de bateaux, cellules solaire, pantographe de train électrique).

3.4 Caractérisation d'un mécanisme de locomotion

Un mécanisme de locomotion est formé de plusieurs parties fonctionnelles ou organes. Nous allons maintenant passer en revue les trois grand types d'organes d'un mécanisme de locomotion.

3.4.1 les organes de contact avec l'environnement

Une partie des forces d'interaction exercées par l'environnement sur un mécanisme de locomotion ont lieu par contact direct. La forme, l'état de surface ou le type de matériau des organes de contact sont les principaux facteurs qui influencent l'interaction mécanique. Le dimensionnement de ces différents paramètres va dépendre de l'effet recherché. Pour l'optimisation, on distingue quatre cas de figure:

- on cherche à obtenir un appui passif stable de la part de l'environnement (adhérence d'une roue, portance d'une aile d'avion)
- on cherche à limiter la résistance au mouvement (coques de bateau, fuselage d'avion)
- on cherche à augmenter la résistance au mouvement (parachute)
- on cherche à obtenir un entraînement direct de la part de l'environnement (voile de bateau)

3.4.2 les organes transformateurs d'énergie

Un mécanisme de locomotion est un système capable de transformer l'énergie. Certains mécanismes utilisent des organes transformateurs d'énergie embarqués et intégrés au mécanisme de locomotion. Il en existe plusieurs types caractérisés par:

- le type de conversion énergétique
- le bilan énergétique et le rendement de la conversion
- la réversibilité du mécanisme de conversion

- la contrôlabilité du flux énergétique

On distingue trois grandes classes d'organes transformateurs embarqués:

- les moteurs: ils utilisent une source d'énergie qui peut être de nature mécanique (élément élastique précontraint, volant d'inertie) ou non mécanique (accumulateur électrique, carburant). La réversibilité et le rendement dépendent fortement de la technologie utilisée. Leur principal attrait réside dans le fait que la puissance de sortie peut être modulée par un système de contrôle. Les systèmes de locomotion utilisant des moteurs sont appelés «systèmes de locomotion actifs» (Section 3.5.2).
- les éléments élastiques: ils transforment de façon réversible l'énergie cinétique du mécanisme de locomotion en énergie potentielle élastique. Leur principal attrait réside dans la rapidité du temps de réponse, la réversibilité de la conversion et la simplicité de mise en oeuvre. Couplés à des organes de freinage, ils peuvent être mis à profit pour amortir les chocs et les vibrations (amortisseur). Contrairement aux moteurs, ils ne sont pas contrôlables directement. Ces éléments réagissent passivement à l'environnement. On dit qu'ils confèrent un caractère passif au système de locomotion. On veillera à ne pas confondre la notion de suspension passive (Section 5.2.2) avec la locomotion passive qui sera définie plus loin (Section 3.5.1).
- les organes de freinage: ils transforment de façon irréversible, en utilisant le phénomène du frottement, l'énergie cinétique en chaleur (freins mécaniques, freins hydrauliques, freins électromagnétiques). Leur principal attrait réside dans la simplicité de construction. Leur action peut être modulée par un système de contrôle (ABS). Certains types d'organes de freinage utilisent la déformation plastique de la matière et sont conçus pour limiter les dégâts en cas de collision brutale accidentelle avec l'environnement (pare-choc de voiture).

3.4.3 les organes de transmission des forces

Les organes de transmission permettent le passage des forces:

- entre les organes transformateurs d'énergie et les organes de contact
- entre un organe de contact et un autre organe de contact
- appliquées à distance par l'environnement (poids) et transmises aux organes de contact
- appliquées par la charge utile et transmises aux organes de contact

L'ensemble des organes qui assurent ces fonctions forment le squelette d'un mécanisme de locomotion. On peut se représenter ce squelette comme un ensemble de corps solides interconnectés par des éléments de guidage [Spinnler97].

3.5 Classification des mécanismes de locomotion

Le but de cette section est de classifier les différents modes de locomotion. Précisons que la plupart des mécanismes rencontrés dans la nature ou fabriqués par l'homme vont combiner plusieurs modes en même temps.

3.5.1 Locomotion passive

On parle de locomotion passive lorsque l'énergie motrice d'un mécanisme de locomotion est fournie par l'environnement ou par un autre mécanisme à travers des forces actives appliquées par contact ou à distance. Dans la nature, toutes les plantes utilisent ce type de locomotion pour disséminer leur pollen et leurs graines.

3.5.1.1 utilisation de la gravitation

Tomber sous l'action de la gravitation constitue sans doute la façon la plus simple de se mouvoir. En effet, aucun mécanisme spécialisé n'est nécessaire pour qu'un système soit soumis à la loi de la pesanteur. Par exemple, le Couroupita ou «Cannon-Ball Tree» est l'arbre qui produit les plus grosses graines du règne végétal. Celles-ci sont très lourdes, très grosses et parfaitement sphériques. Lorsque ces véritables boulets de canon tombent du haut de leur 15 mètres, il est très difficile d'arrêter leur course le long des pentes des îles tropicales.

3.5.1.2 utilisation des courants fluidiques

L'air et l'eau peuvent être le siège de courants fluidiques. Ces derniers peuvent devenir des moyens de transport très efficaces si l'on est capable de les capter. Un très grand nombre de plantes utilisent le vent pour disséminer leur pollen et leurs graines.

3.5.1.3 locomotion par accrochage

Certains mécanismes de locomotion sont spécialement conçus pour se faire tracter par d'autres. Ces derniers sont généralement munis d'un système d'accrochage et de décrochage. Par exemple, les graines de certaines plantes sont munies de crochets microscopiques qui s'agrippent parfaitement aux fourrures des animaux et aux vêtements. Le crochet se casse après un certain temps pour libérer la semence.

3.5.2 Locomotion active

On parle de locomotion active lorsque la puissance motrice est développée au sein même du mécanisme de locomotion. Un organe moteur se charge de transformer une source d'énergie potentielle embarquée (accumulateur électrique, carburant, ressort précontraint, gaz sous pression) ou une source d'énergie non

mécanique captée (cellules solaires, pantographe) en puissance mécanique. Nous allons maintenant passer en revue les deux grands modes de propulsion que l'on rencontre dans la nature et dans les systèmes conçus par l'homme.

3.5.2.1 Propulsion par éjection de matière

La projection dans une direction de masses pesantes embarquées permet de produire les forces nécessaires au mouvement dans la direction opposée. Dans la nature, certaines plantes produisent des graines gorgées d'eau qui, une fois arrivées à maturité, explosent à la moindre perturbation extérieure libérant ainsi le liquide contenu tout en expédiant le reste de la graine le plus loin possible.

3.5.2.2 Propulsion par réaction de contact

Le mouvement global du mécanisme de locomotion est créé par un déséquilibre entre les différentes forces appliquées par l'environnement (poids, frottements, ...). Ce déséquilibre est généré par un mouvement relatif forcé des différentes parties du mécanisme. Ce mouvement forcé est entretenu par des forces actives de motorisation. Dans ce mode de locomotion, les forces de frottement avec l'environnement interviennent de deux façons différentes:

- Lorsqu'elles sont passives, ces forces sont indispensables à la locomotion car elles permettent au mécanisme de s'appuyer sur l'environnement afin de pouvoir avancer. Précisons que ces forces ne travaillent pas et ne contribuent donc pas directement à la transmission de la puissance motrice.
- Lorsqu'elles sont actives, ces forces vont toujours vouloir s'opposer au mouvement. La plupart des mécanismes de locomotion sont optimisés pour diminuer les pertes générées par cette résistance au mouvement. Cependant, dans certains mécanismes de locomotion, l'existence de ces forces est indispensable car elles constituent le seul moyen de freiner le système.

On peut classer ce type de locomotion en trois grands groupes selon l'état de la matière qui compose l'environnement.

- la locomotion dans un milieu gazeux appelée plus communément locomotion aérienne si le gaz en question est de l'air.
- la locomotion dans ou à la surface d'un milieu liquide appelée plus communément locomotion aquatique si le liquide en question est de l'eau.
- la locomotion dans ou à la surface d'un milieu solide appelé plus communément locomotion terrestre si le solide en question est la partie solide d'une planète.

Ce mode de propulsion est omniprésent dans le règne animal [Alexander92]. Certaines créatures dites amphibies sont même capables de se mouvoir dans plusieurs milieux différents.

3.6 La locomotion utilisant la propulsion par réaction de contact à la surface d'un milieu solide

Dans ce type de locomotion, le sous-espace de la zone d'interaction possible par contact entre le mécanisme de locomotion et l'environnement est limité à la surface de ce dernier. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons aux mécanismes de locomotion possédant des organes de contact pouvant être assimilés à des corps matériels solides.

3.6.1 Caractérisation du contact entre deux solides

Deux solides sont en contact lorsqu'ils occupent deux portions de l'espace qui sont contiguës. D'un point de vue microscopique, ce phénomène se caractérise par l'apparition de forces à faible rayon d'action mais de forte intensité. D'un point de vue macroscopique, ces forces de contact peuvent se classer de la façon suivante [Curnier00]:

- les forces normales de répulsion dues à la non interpénétration des solides
- les forces normales d'attraction dues à l'adhésion par collage
- les forces tangentielles d'attraction dues à l'adhérence par grippage
- les forces tangentielles d'attraction dues à l'adhérence par collage
- les forces tangentielles d'attraction dues à la lubrification

A notre échelle, l'adhésion et l'adhérence par collage sont souvent négligeables par rapport aux forces normales répulsives de non interpénétration et aux forces tangentielles d'adhérence par grippage. Cela est dû au fait que les forces de répulsion dues à la non interpénétration des orbites électroniques des atomes sont beaucoup plus fortes que les forces atomiques d'attraction (électrostatique, électromagnétique, Van der Waals).

L'évolution temporelle du contact entre deux solides peut être décrite d'un point de vue purement cinématique. Il y a cinq cas de figure qui peuvent se présenter pour les 6 degrés de liberté (DDL) relatifs:

- décollage: l'aire de la zone de contact diminue. Lorsqu'elle s'annule on considère que les deux solides ne se touchent plus. (1/2 DDL)
- compression: l'aire de la zone de contact augmente. (1/2 DDL)
- roulement: la zone de contact se déplace relativement aux deux surfaces des solides en combinant le décollage et la compression simultanée de deux portions de la zone de contact. (2 DDL) (figure 3.2 a)
- glissement tangentiel: la zone de contact se déplace relativement à l'une des deux surfaces des solides mais reste fixe par rapport à l'autre surface. (4 DDL) (figure 3.2 b et c)

- glissement pivot: La zone de contact reste fixe par rapport aux surfaces des solides. Il y'a tout de même un mouvement de rotation relatif autour d'un axe perpendiculaire qui coupe la zone de contact. (1 DDL) (figure 3.2 d)

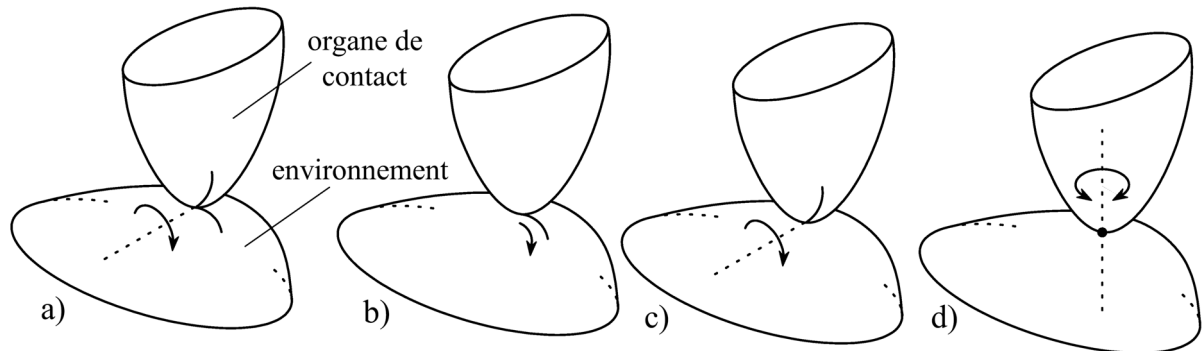


Figure 3.2: représentation graphique de l'évolution temporelle du contact entre deux solides (a) contact roulant (b) glissement tangentiel à la surface de l'environnement (c) glissement tangentiel à la surface de l'organe de contact (d) glissement pivot

D'un point de vue dynamique, les choses deviennent beaucoup plus compliquées. La distribution des forces à l'intérieur de la zone de contact va dépendre d'une multitude de paramètres qui sont:

- l'état de surface des solides en contact
- la géométrie des surfaces en contact
- les modules d'élasticité des matériaux en contact
- la composition chimique des solides en contact
- la présence d'un lubrifiant entre les surfaces en contact

La prédiction exacte du mouvement relatif de deux solides en contact est très difficile à réaliser dans la pratique vu la quantité de paramètres à connaître dont certains sont même impossibles à mesurer avec précision. Dans le cadre de ce travail, on se contentera d'une approximation basée sur l'hypothèse que le mouvement relatif entre les deux solides est connu à l'avance. Pour chacun des 6 degrés de liberté relatifs, on devra alors choisir entre deux cas de figure:

- On suppose que les forces de contact suffisent à bloquer le degré de liberté en question malgré la présence d'autres forces appliquées sur les deux solides. Ces forces de frottement statiques sont alors appelées «forces de liaison par contact».
- On suppose que le degré de liberté est libre mais que les forces de contact freinent le mouvement relatif. Ces forces de frottement dynamiques sont alors appelées «forces appliquées par contact de résistance au mouvement». Elles sont relatives au degré de liberté considéré.

On dit que deux solides en contact forment une liaison mécanique idéale lorsque:

- les forces de liaison par contact peuvent prendre n'importe quelle amplitude
- les forces appliquées par contact de résistance au mouvement sont nulles
- la liaison persiste dans le temps

En réalité, les liaisons mécaniques s'éloignent du modèle idéal pour les raisons suivantes:

- il y' a toujours une limite physique à l'amplitude des forces de frottement statiques qui peuvent être transmises par contact
- il y' a toujours une force de résistance au mouvement due au frottement dynamique par contact
- la liaison ne persiste pas toujours dans le temps

3.6.2 Les différentes stratégies de contact

Nous allons maintenant passer en revue les différentes stratégies de contact inventées par l'homme et la nature qui permettent la locomotion utilisant la propulsion par réaction de contact à la surface d'un milieu solide.

3.6.2.1 contact par adhésion à l'environnement

Pour que la locomotion par adhésion puisse se faire, les organes de contact doivent être capable de s'accrocher à l'environnement mais aussi de se décrocher. Plusieurs techniques peuvent être utilisées:

- L'organe de contact enveloppe et serre une protubérance de l'environnement. (singe qui se balance d'une branche à une autre, athlète qui grimpe le long d'une perche verticale, robot pour les canalisations)
- L'organe de contact est doté de crochets rétractables qui s'enfoncent à l'intérieur de l'environnement (chat qui grimpe à un arbre)
- L'organe de contact est doté de ventouses (robot nettoyeur de vitres)
- L'organe de contact est doté d'électro-aimants (robot pour façades métalliques)
- L'organe de contact secrète une substance collante (araignées)
- L'organe de contact est doté d'une multitude de poils microscopiques électrostatiques (lézard)

Nous constatons que la nature a une avance considérable sur la technologie de l'homme. Les futurs progrès que nous réaliserons dans ce domaine auront sans doute d'énormes répercussions dans le secteur des mécanismes de locomotion et de la robotique mobile.

3.6.2.2 contact non adhésif par attraction gravitationnelle et friction

C'est le mode le plus répandu dans la nature et dans les mécanismes de locomotion créés par l'homme car les organes de contact sont beaucoup moins sophistiqués que ceux décrits dans la section précédente. Ce mode de contact utilise l'attraction gravitationnelle de l'environnement pour créer une liaison mécanique entre l'organe de contact et le sol. Les propriétés de la liaison ainsi obtenue sont les suivantes:

- les forces normales exercées par l'environnement sont de nature répulsive exclusivement. On parle alors de liaison unilatérale.
- l'amplitude maximale de la force de frottement tangentielle transmissible par la liaison est limitée. Celle-ci dépend de la force normale appliquée et de la nature physique des surfaces en contact.

La surface des organes de contact comporte généralement un relief afin d'augmenter l'adhérence au terrain (crampons sur terrain mou). Les mécanismes de locomotion qui utilisent ce mode de contact doivent être capables d'estimer les propriétés géométriques et physiques du terrain sur lequel ils évoluent afin de limiter les risques de perdre le contrôle sur la trajectoire qu'ils désirent suivre.

3.6.3 Stabilité de la locomotion

La locomotion est une action qui comporte quelques risques. En effet, une mauvaise estimation des caractéristiques du terrain ou la soudaine apparition de perturbations externes peuvent conduire le mécanisme de locomotion à perdre le contrôle du mouvement. Certaines parties du mécanisme peuvent soudainement se retrouver en contact avec l'environnement alors que les organes prévus à cet effet deviennent incapables d'exercer correctement leur fonction. Deux cas de figures se présentent:

- Le mécanisme est incapable d'assurer tout seul le retour à un mode de locomotion normal. Seule une intervention externe peut le débloquer (tortue retournée).
- Le mécanisme possède une faculté autonome de redressement. Celle-ci ajoute généralement de la complexité au système.

Afin de minimiser les risques de se retrouver bloqués, certains mécanismes de locomotion se déplacent de façon quasi-statique. En d'autres termes, tous les mouvements sont suffisamment lents pour que les effets dynamiques inertiels soient négligeables. On peut alors s'imaginer le mouvement comme étant une succession d'états statiquement stables. Ce mode de locomotion simplifie considérablement la complexité générale du système, simplifie sa modélisation et diminue les risques liés à la perte de contrôle du mouvement. C'est ce mode de locomotion qui nous intéressera dans le cadre de ce travail.

A l'opposé, les mécanismes de locomotion tout-terrain rapides contrôlent leur mouvement de façon dynamique. Dans la nature, tous les mammifères sont capables de se déplacer de cette façon. Il s'agit là d'un vaste sujet de recherche qui ne sera pas abordé dans le cadre de ce travail.

3.6.4 Classification des mécanismes de locomotion statiquement stables

La première façon de classer les mécanismes de locomotion statiquement stables consiste à les regrouper par genre d'organe de contact. Traditionnellement, on distingue quatre groupes:

- les mécanismes marcheurs dont les organes de contact sont les pattes
- les mécanismes roulants dont les organes de contact sont les roues
- les mécanismes à chenille
- les autres

Dans sa thèse, Yim propose une taxinomie très différente des mécanismes de locomotion statiquement stables utilisant la propulsion par réaction de contact par attraction gravitationnelle et friction [Yim95]. Ce dernier commence par définir ce mode de locomotion comme étant la succession répétitive des quatre actions suivantes dans n'importe quel ordre:

- La disparition des zones de contact situées à l'arrière du mécanisme de locomotion (relativement au sol et à la direction du mouvement).
- L'apparition de nouvelles zones de contact à l'avant du mécanisme de locomotion (relativement au sol et à la direction du mouvement).
- Le décalage du centre de gravité global du mécanisme de locomotion vers l'avant (relativement au sol et à la direction du mouvement).
- Le maintien de l'équilibre statique tout au long du mouvement.

Il classe ensuite les différents mécanismes en huit sous-groupes en utilisant trois critères d'appartenance binaires.

3.6.4.1 Premier critère: mouvement des organes de contact

Ce critère décrit le mouvement global des organes de contact durant un cycle de locomotion. Il définit deux groupes:

- *(R)oll-Legged*: les organes de contact décrivent un mouvement global rotatif
- *(S)wing-Legged*: les organes de contact décrivent un mouvement global de va-et-vient

3.6.4.2 Deuxième critère: continuité du contact

Il définit deux groupes:

- *(C)ontinuous-Footed*: Les organes de contact ne décollent pas durant la locomotion
- *(D)iscrete-Footed*: Les organes de contact décollent durant la locomotion

3.6.4.3 Troisième critère: géométrie des zones de contact

Il définit deux groupes:

- *(L)ittle-Footed*: Les organes de contact possèdent une zone de contact ponctuelle avec l'environnement. Un minimum de trois organes de contact de ce type doivent être fonctionnels en même temps pour assurer la stabilité statique.
- *(B)ig-Footed*: Chaque organe de contact possède une zone de contact surfacique. Un seul organe de contact fonctionnel de ce type peut suffire à garantir la stabilité statique

3.7 Conclusion

Cette section a pu mettre en évidence certains points communs entre les différents types de mécanismes de locomotion:

- Ils dépendent tous de l'environnement pour se mouvoir
- Ils sont tous composés d'organes de transmission de forces et d'organes de contact avec l'environnement
- Seuls les mécanismes de locomotion actifs ont des organes transformateurs d'énergie

La grande diversité des mécanismes de locomotion nous a permis d'établir une classification basée sur:

- la stratégie utilisée pour créer le mouvement (locomotion active ou passive)
- la structure physique de l'environnement (solide, liquide, gazeux)
- la stratégie utilisée pour maintenir le contact avec l'environnement (accrochage, adhésion, friction, attraction gravitationnelle)
- la cadence du mouvement de locomotion (quasi-statique, dynamique)
- l'évolution temporelle des organes de contact et des zones de contact

Dans le cadre de ce travail, nous avons focalisé notre étude sur les mécanismes de locomotion:

- actifs
- se déplaçant à la surface d'un milieu solide
- en utilisant un contact non-adhésif par attraction gravitationnelle et friction
- se déplaçant de façon quasi-statique
- de type RCL (*Roll-Legged, Continuous-Footed, Little-Footed*)

4

Etude des mécanismes de locomotion statiquement stables de type *RCL*

Dans le cadre de ce travail, nous avons focalisé nos efforts dans l'étude des mécanismes de locomotion tout-terrain qui maintiennent l'équilibre statique ou quasi-statique tout en se déplaçant. Nous nous sommes tout particulièrement intéressés aux mécanismes de type *RCL* (Section 4.4.6) c'est à dire:

- *(R)oll-Legged*: les organes de contact décrivent un mouvement global rotatif
- *(C)ontinuous-Footed*: Les organes de contact ne décollent pas durant la locomotion
- *(L)ittle-Footed*: Les organes de contact possèdent une zone de contact ponctuelle avec l'environnement.

Le but de ce chapitre est de décrire les hypothèses et de fournir les outils mathématiques permettant de modéliser la locomotion statiquement stable des mécanismes de type *RCL*.

4.1 Hypothèses

Dans ce qui suit, nous modéliserons les mécanismes de locomotion et l'environnement par un ensemble de corps solides indéformables interconnectés par un ensemble de liaisons mécaniques non idéales (Section 3.6.1). A un instant donné, chaque liaison mécanique entre deux corps solides indéformables sera modélisée par:

- un ensemble de m mouvements relatifs libres (degrés de liberté ou mobilité)
- un torseur de $2m$ forces généralisées actives qui s'opposent aux mouvements libres (torseur des forces de résistance au mouvement)
- un torseur de $2m$ forces généralisées actives qui entraînent les mouvements libres (torseur des forces de motorisation)
- un ensemble de b mouvements relatifs bloqués (degrés de liaison)
- un torseur de $2b$ forces généralisées actives ou passives transmises par la liaison (torseur des forces de liaison)

Il existe une relation fondamentale entre le nombre de degrés de liberté et le nombre de degrés de liaison [Bamberger81]:

$$m+b=6 \text{ pour les mécanismes 3D} \quad (4.1)$$

$$m+b=3 \text{ pour les mécanismes 2D} \quad (4.2)$$

4.2 Les liaisons dans les mécanismes de locomotion de type RCL

On distingue deux familles de liaisons dans ce type de mécanisme de locomotion:

- les liaisons entre un organe de contact et l'environnement qui seront modélisées par des «liaisons par contact non-adhésif et par friction» (Section 4.2.1)
- les liaisons entre les différents organes du mécanisme qui seront modélisées par des «liaisons bilatérales par obstacle» (Section 4.2.2)

4.2.1 Modélisation de la liaison par contact non-adhésif et par friction

En 3D, ce type de liaison se caractérise par les propriétés géométriques suivantes:

- deux surfaces tangentes qui délimitent les solides en contact
- un point de contact
- un plan tangent commun aux deux surfaces appelé plan de contact
- une droite normale au plan tangent commun passant par le point de contact

En 2D, ce type de liaison se caractérise par les propriétés géométriques suivantes:

- deux courbes tangentes qui délimitent les solides en contact
- un point de contact
- une tangente commune aux deux courbes ou droite de contact
- une droite normale à la tangente commune passant par le point de contact

Ces liaisons ne sont pas persistantes car le nombre de degrés de liberté peut varier au cours du temps en fonction des forces présentes dans le mécanisme. On parlera alors de «mobilité instantanée de liaison» pour désigner l'état actuel de la liaison.

En 3D, on distingue 3 états possibles (figure 4.1):

- Liaison roulante non glissante à 3DDL: le mouvement relatif libre se compose du roulement sans glissement (2DDL) et du pivotement autour de la droite normale au plan tangent (1DDL). Le torseur des forces de liaison se compose de 4 forces bilatérales contenues dans le plan de contact et de 2 forces unilatérales normales au plan de contact (toujours opposées à l'interpénétration des solides en contact). Le torseur des forces de résistance au mouvement se compose de 4 couples de résistance au roulement et de 2 couples de résistance au pivotement.
- Liaison mixte roulante et glissante à 4DDL: le mouvement relatif libre se compose du roulement sans glissement (1DDL) dans une direction, du roulement avec glissement (2DDL) dans la direction orthogonale et du pivotement autour de la droite normale au plan tangent (1DDL). Le torseur des forces de liaison se compose de 2 forces bilatérales contenues dans le plan de contact et de 2 forces unilatérales normales au plan de contact (toujours opposées à l'interpénétration des solides en contact). Le torseur des forces de résistance au mouvement se compose de 4 couples de résistance au roulement, de 2 forces de résistance au glissement contenues dans le plan de contact et de 2 couples de résistance au pivotement.
- Liaison mixte roulante et glissante à 5DDL: le mouvement relatif libre se compose du roulement avec glissement (4DDL) dans les deux directions et du pivotement autour de la droite normale au plan tangent (1DDL). Le torseur des forces de liaison se compose de 2 forces unilatérales normales au plan de contact (toujours opposées à l'interpénétration des solides en contact). Le torseur des forces de résistance au mouvement se compose de 4 couples de résistance au roulement, de 4 forces de résistance au glissement contenues dans le plan de contact et de 2 couples de résistance au pivotement.

En 2D, on distingue 2 états possibles:

- Liaison roulante non glissante à 1DDL: le mouvement relatif libre se compose du roulement sans glissement (1DDL). Le torseur des forces de liaison se compose de 2 forces bilatérales colinéaires avec la droite de contact et de 2 forces unilatérales normales à la droite de contact (toujours opposées à l'interpénétration des solides en contact). Le torseur des forces de résistance au mouvement se compose de 2 couples de résistance au roulement.

- Liaison mixte roulante et glissante à 2DDL: le mouvement relatif libre se compose du roulement avec glissement (2DDL). Le torseur des forces de liaison se compose de 2 forces unilatérales normales à la droite de contact (toujours opposées à l'interpénétration des solides en contact). Le torseur des forces de résistance au mouvement se compose de 2 couples de résistance au roulement, de 2 forces de résistance au glissement colinéaires avec la droite de contact.

Dans tous ces modèles de liaison, on fera l'hypothèse que les torseurs de motorisation des mouvement relatifs libres sont nuls.

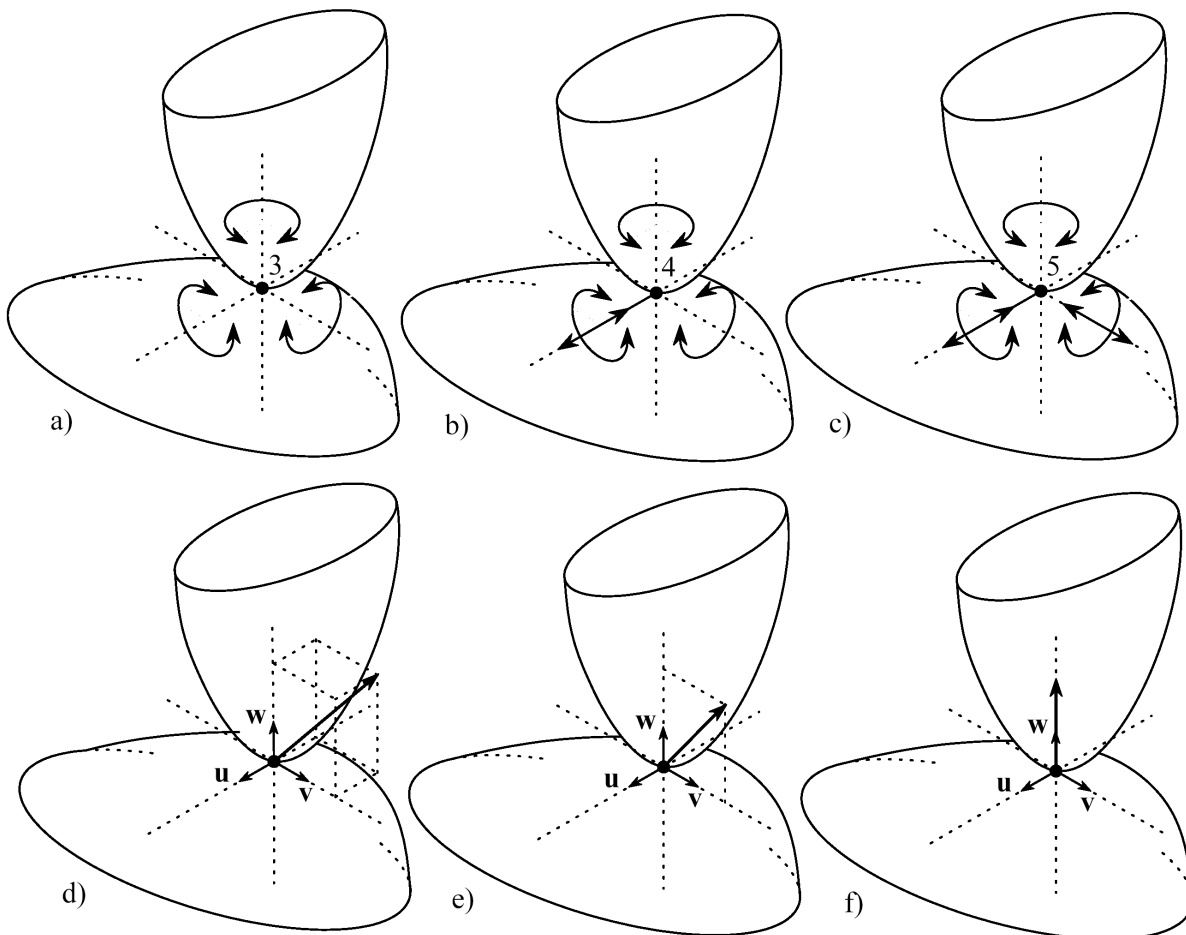


Figure 4.1: Représentation des degrés de mobilité et des forces de liaison des trois différents états possibles de la liaison 3D par contact non-adhésif et par friction, (a et d) liaison roulante non-glissante à 3DDL, (b et e) liaison mixte roulante et glissante à 4DDL, (c et f) liaison mixte roulante et glissante à 5 DDL

Il est possible d'exprimer les contraintes de liaison sur la force de contact \mathbf{F}_C . Dans le cas d'une liaison «mixte roulante et glissante à 4DDL», la force de contact doit être perpendiculaire à la direction de glissement tangentiel. Il y' a une contrainte de liaison donnée par:

$$\vec{\mathbf{F}}^C \cdot \vec{\mathbf{u}} = 0 \quad (4.3)$$

avec:

\mathbf{u} : vecteur colinéaire à la direction de glissement tangentiel

Dans le cas d'une liaison «mixte roulante et glissante à 5DDL», la force de contact doit être perpendiculaire au plan de contact. Il y a deux contraintes de liaison donnée par:

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{F}}^C \cdot \vec{\mathbf{u}} = 0 \\ \vec{\mathbf{F}}^C \cdot \vec{\mathbf{v}} = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

avec:

\mathbf{u} : vecteur quelconque du plan de contact

\mathbf{v} : vecteur quelconque du plan de contact non colinéaire à \mathbf{u}

Dans le cas d'une liaison roulante non glissante à 3DDL, il n'y a pas de contraintes sur la direction de la force de contact.

4.2.2 Modélisation de la liaison bilatérale par obstacle

Ce type de liaison est caractérisé par:

- la persistance temporelle des degrés de liberté et des degrés de liaison
- un torseur de forces généralisées bilatérales de résistances au mouvement
- un torseur de forces généralisées bilatérales de liaison
- un torseur de forces généralisées bilatérales de motorisation

[Hunt78] donne une liste complète ainsi qu'une description des différentes liaisons 3D bilatérales par obstacle. Parmi les plus utilisées, on citera:

- le pivot (1 DDL)
- le cardan (2DDL)
- le rotule (3DDL)

4.2.3 Représentation graphique de l'architecture topologique d'un mécanisme de locomotion type RCL

Le squelette d'un mécanisme de locomotion est composé d'un certain nombre d'organes de transmission et d'un certain nombre d'organes de contact qui vont permettre le passage des forces à travers les liaisons qui les connectent. La figure 4.2 montre une représentation graphique de l'architecture topologique d'un mécanisme de locomotion type RCL.

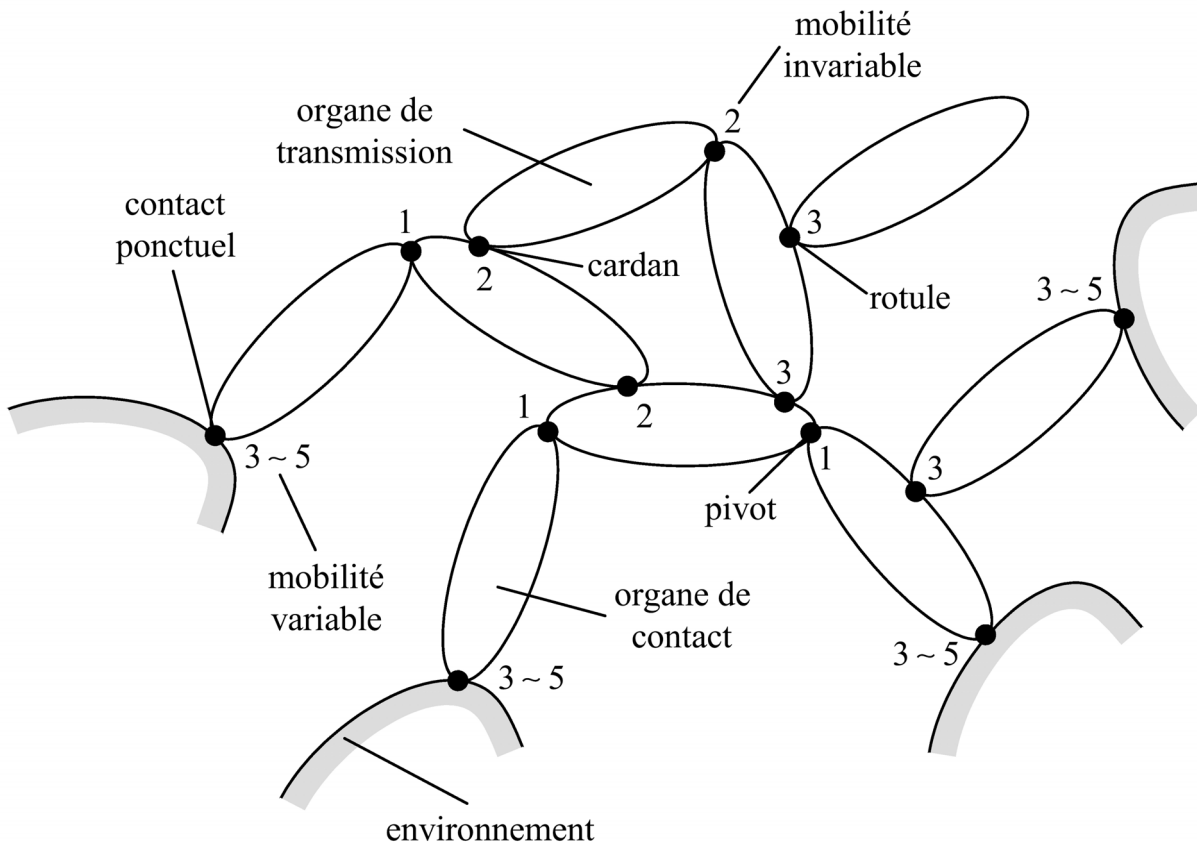


Figure 4.2: Représentation graphique de l'architecture topologique d'un mécanisme de locomotion 3D. Les ellipses représentent des organes de contact ou de transmission. Les points représentent les liaisons mécaniques.

4.3 Mobilité d'un mécanisme de locomotion de type RCL

La mobilité représente le nombre de mouvements élémentaires indépendants qu'un mécanisme est capable de produire. Dans le cas d'un mécanisme de locomotion, l'existence de liaisons à mobilité variable nous conduit à introduire la notion de «mobilité instantanée du mécanisme de locomotion». Celle-ci peut se calculer à partir d'une distribution donnée des mobilités instantanées de liaison.

En première approximation, la mobilité ne dépend que de l'architecture topologique du mécanisme considéré. La méthode de Grübler peut être utilisée pour la calculer (Section 4.3.1). Cependant, le résultat fourni par cette méthode n'est pas toujours fiable à cent pour cent. De plus, cette méthode ne dit rien sur la distribution au sein du mécanisme des différents groupes de mouvements indépendants.

Il existe une méthode sûre mais beaucoup plus compliquée pour calculer la mobilité (Section 4.3.2). Cette méthode permet également de décrire la distribution des différents groupes de mouvements indépendants au sein du mécanisme.

Intuitivement, la mobilité instantanée du mécanisme de locomotion ainsi calculée, pourra toujours se décomposer en 3 groupes de mouvements indépendants qui sont:

- La mobilité externe du mouvement groupé des points de contact par rapport à l'environnement. Celle-ci peut varier entre 0 et 3.
- La mobilité interne des points de contact entre eux. Pour un mécanisme à n points de contact, celle-ci peut varier entre 0 et $2n-2$.
- La mobilité interne du mécanisme de locomotion regroupant tous les mouvements pouvant s'effectuer sans bouger la position des points de contact par rapport à l'environnement. Celle-ci peut varier de 0 à l'infini.

4.3.1 Méthode de Grübler

La méthode de Grübler [Hunt78] permet de calculer la mobilité en utilisant la représentation graphique topologique de l'architecture du mécanisme (figure 4.2) et les formules suivantes:

$$M^{tot} = \sum_{i=1}^k m_i - 6 \cdot l \quad \text{pour un mécanisme 3D} \quad (4.5)$$

$$M^{tot} = \sum_{i=1}^k m_i - 3 \cdot l \quad \text{pour un mécanisme 2D} \quad (4.6)$$

avec:

M^{tot} : mobilité du mécanisme

m_i : mobilité de la $i^{\text{ème}}$ liaison

k : nombre total de liaisons

l : nombre total de boucles dans la représentation graphique

Cette méthode a l'avantage d'être simple car elle ne dépend pas des caractéristiques géométriques du mécanisme. Cette technique présente malheureusement quelques défauts:

- Elle ne permet pas de calculer le gain de mobilité dû à certaines configurations géométriques singulières (figure 4.3 (b) et (d)).
- Elle ne renseigne pas sur la distribution des groupes de mouvements indépendants à l'intérieur du mécanisme.
- La détermination des boucles est parfois difficile

4.3.2 Méthode par calcul du rang de la matrice des contraintes cinématiques

Cette méthode sera exposée plus en détail dans le chapitre consacré à la modélisation des mécanismes roulants 2D (Section 6.2.2).

Pour résumer, les contraintes cinématiques d'un mécanisme peuvent s'écrire sous forme matricielle:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (4.7)$$

avec:

$\mathbf{v} [v \times 1]$: vecteur d'état des vitesses généralisées du mécanisme

$\mathbf{G} [e \times v]$: matrice des contraintes cinématiques du mécanisme

La mobilité totale du mécanisme est alors donnée par:

$$M^{tot} = v - \text{rank}(\mathbf{G}) \quad (4.8)$$

avec:

v : dimension du vecteur d'état des vitesses généralisées du mécanisme

$\text{rank}()$: fonction qui donne le rang d'une matrice

Deux cas de figure peuvent se présenter.

1. $M^{tot} > 0$: le mécanisme est mobile

La solution générale de (4.7) peut s'exprimer en utilisant les propriétés de l'espace nul:

$$\mathbf{v} = \text{null}(\mathbf{G}) \cdot \mathbf{p}_v \quad (4.9)$$

avec:

$\mathbf{p}_v [M^{tot} \times 1]$: vecteur contenant les paramètres libres de la solution générale

$\text{null}()$: fonction qui donne l'espace nul d'une matrice

Chaque colonne de la matrice $\text{null}(\mathbf{G})$ représente la base d'un mouvement de groupe élémentaire du mécanisme. Le vecteur libre \mathbf{p}_v permet de moduler chaque mouvement de groupe élémentaire de façon indépendante.

2. $M^{tot} = 0$: le mécanisme est bloqué

La seule solution de (4.7) est la solution nulle:

$$\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (4.10)$$

En résumé, cette méthode tient compte de la géométrie des organes du mécanisme ainsi que de la position instantanée qu'ils occupent dans l'espace. Contrai-

rement à la méthode de Grübler, elle permet de calculer la mobilité instantanée de n'importe quel mécanisme de façon sûre et précise. Cette méthode permet également de décrire la distribution des groupes de mouvements indépendants du mécanisme.

4.3.3 Quelques exemples 2D de calcul de mobilité

Les exemples 2D ci-dessous vont nous permettre d'illustrer les deux méthodes de calcul de la mobilité.

Dans le premier exemple (figure 4.3 (a) et (b)), la méthode de Grübler donne:

$$M_1^{tot} = (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) - 3 \cdot 2 = 0 \quad (4.11)$$

La méthode par calcul du rang de la matrice des contraintes cinématiques donne:

$$\mathbf{v}[7 \times 1] = [\mathbf{v}_A^T \quad \mathbf{v}_C^T \quad \mathbf{v}_E^T \quad \boldsymbol{\omega}_{ACE}]^T \quad (4.12)$$

pour le vecteur d'état des vitesses et:

$$\begin{cases} \overrightarrow{BA} \cdot \mathbf{v}_A = 0 \\ \overrightarrow{DC} \cdot \mathbf{v}_C = 0 \\ \overrightarrow{FE} \cdot \mathbf{v}_E = 0 \\ \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_C = \boldsymbol{\omega}_{ACE} \times \overrightarrow{CA} \\ \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_E = \boldsymbol{\omega}_{ACE} \times \overrightarrow{EA} \end{cases} \quad (4.13)$$

pour les 7 équations de contraintes cinématiques d'où l'on peut facilement tirer \mathbf{G} . On peut démontrer que:

$$\text{rank}(\mathbf{G}) = 6 \quad \text{si } X \equiv Y \equiv Z \quad (4.14)$$

$$\text{rank}(\mathbf{G}) = 7 \quad \text{dans le cas contraire} \quad (4.15)$$

d'où:

$$M^{tot} = 7 - 7 = 0 \quad \text{pour l'exemple (a)} \quad (4.16)$$

$$M^{tot} = 7 - 6 = 1 \quad \text{pour l'exemple (b)} \quad (4.17)$$

On constate que la méthode de Grübler ne donne pas la bonne mobilité dans le cas de l'exemple de la figure 4.3 (b). On constate que ce gain de mobilité est local.

Dans le deuxième exemple (figure 4.3 (c) et (d)), la méthode de Grübler donne:

$$M_1^{tot} = (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) - 3 \cdot 2 = 0 \quad (4.18)$$

La deuxième méthode donne:

$$\mathbf{v}[12 \times 1] = [\mathbf{v}_A^T \quad \mathbf{v}_B^T \quad \mathbf{v}_D^T \quad \mathbf{v}_E^T \quad \boldsymbol{\omega}_{AD} \quad \boldsymbol{\omega}_{BE} \quad \boldsymbol{\omega}_{ABC} \quad \boldsymbol{\omega}_{DEF}]^T \quad (4.19)$$

pour le vecteur d'état des vitesses et:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{CA} \cdot \mathbf{v}_A = \mathbf{0} \\ \overline{CB} \cdot \mathbf{v}_B = \mathbf{0} \\ \overline{FD} \cdot \mathbf{v}_D = \mathbf{0} \\ \overline{FE} \cdot \mathbf{v}_E = \mathbf{0} \\ \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_D = \boldsymbol{\omega}_{AD} \times \overline{DA} \\ \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_E = \boldsymbol{\omega}_{BE} \times \overline{EB} \\ \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B = \boldsymbol{\omega}_{ABC} \times \overline{BA} \\ \mathbf{v}_D - \mathbf{v}_E = \boldsymbol{\omega}_{DEF} \times \overline{ED} \end{array} \right. \quad (4.20)$$

pour les 12 équations de contraintes cinématiques d'où l'on peut facilement tirer \mathbf{G} . On peut démontrer que:

$$\text{rank}(\mathbf{G}) = 12 \text{ pour l'exemple (c)} \quad (4.21)$$

$$\text{rank}(\mathbf{G}) = 11 \text{ pour l'exemple (d)} \quad (4.22)$$

d'où:

$$M^{tot} = 12 - 12 = 0 \text{ pour l'exemple (c)} \quad (4.23)$$

$$M^{tot} = 12 - 11 = 1 \text{ pour l'exemple (d)} \quad (4.24)$$

On constate que la méthode de Grübler ne donne pas la bonne mobilité dans le cas de l'exemple de la figure 4.3 (d). On constate que le gain de mobilité persiste pour toutes les positions du mécanisme. On dit que ce type de mécanisme est hyperguidé.

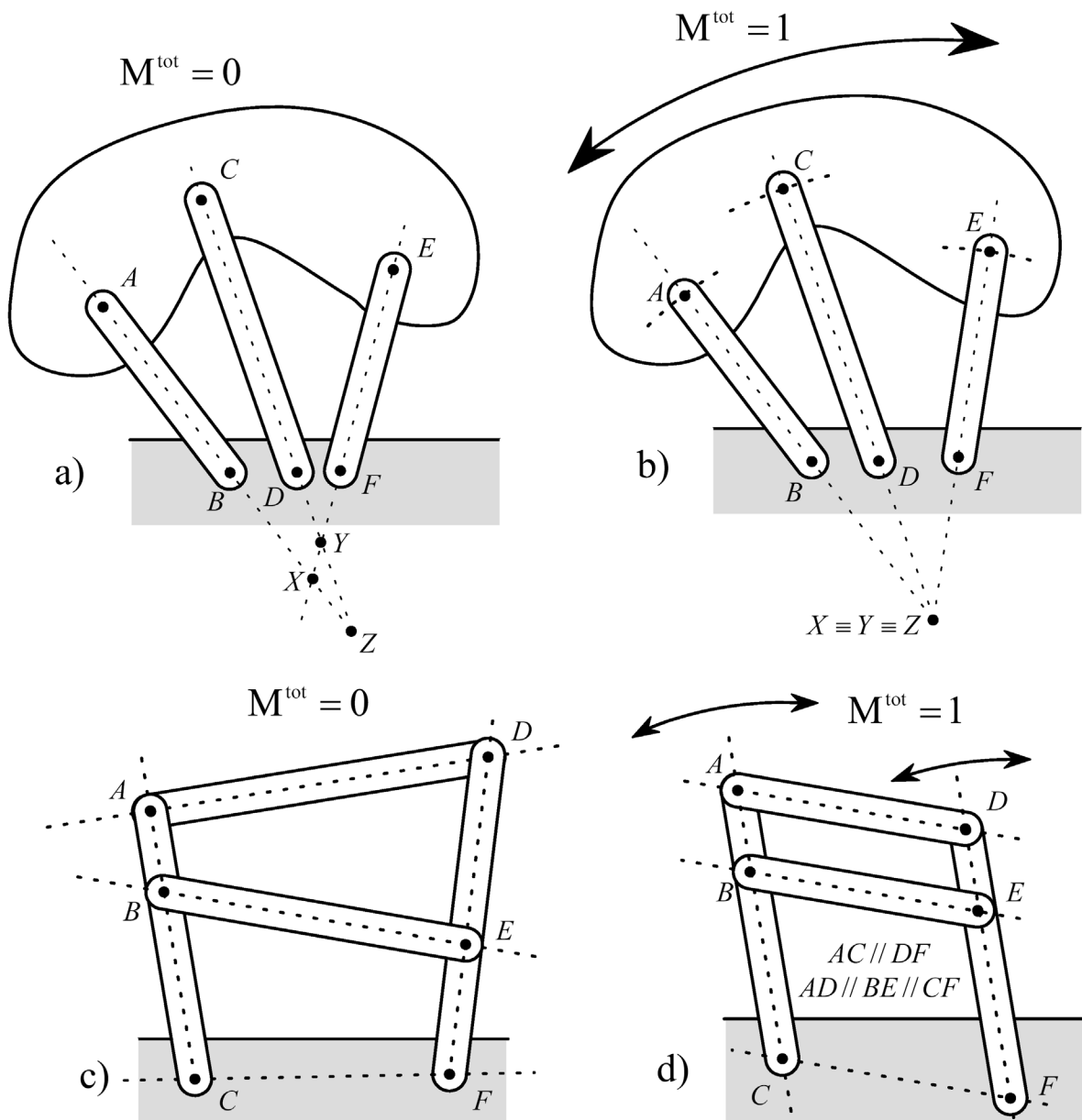


Figure 4.3: Exemples de mécanismes bi-dimensionnels (a) et (c): mobilité nulle (b): mobilité locale de 1 due aux singularités géométriques (d): mobilité globale de 1 due aux singularités géométriques

4.3.4 Gamme de mouvements instantanés d'un mécanisme de locomotion de type RCL

Pour chaque combinaison de mobilités instantanées de liaison au niveau des n organes de contact d'un mécanisme de locomotion donné, il est possible de calculer la mobilité correspondante de tout le mécanisme de locomotion et les groupes de mouvements qui y sont associés. Chaque organe de contact peut se trouver dans

l'un des 3 états de mobilité instantanée. Le nombre de combinaisons possibles est donc donné par:

$$C = 3^n \quad (4.25)$$

On peut associer un modèle cinématique différent pour chaque combinaison. L'établissement d'un modèle dynamique complet nécessite la connaissance préalable du modèle cinématique des accélérations (Section 6.3.2). Si l'on fait l'hypothèse que le mouvement est quasi-statique, le modèle cinématique des vitesses sert uniquement à déterminer le torseur des forces de résistance au mouvement en utilisant par exemple les lois phénoménologiques de Coulomb. On utilisera alors un modèle quasi-statique pour déterminer, si il existe, le torseur de motorisation équilibrant le torseur des forces gravitationnelles et de résistance au mouvement (Section 4.4.4). Nous verrons par la suite que certains mouvements qui sont possibles d'un point de vue cinématique ne sont pas réalisables en pratique à cause des contraintes physiques:

- liées à la nature du contact non-adhésif par attraction gravitationnelle et friction (Section 4.4.3).
- dues aux limites technologiques des organes de motorisation (Section 4.4.5).

4.4 Stabilité des mécanismes de locomotion de type RCL

Rappelons que:

- Dans un équilibre statique, toutes les parties du mécanisme de locomotion sont immobiles par rapport à l'environnement. Dans ce cas, le torseur des forces de liaison par contact et le torseur des forces gravitationnelles ont les mêmes éléments de réduction.
- Dans un équilibre quasi-statique, le mécanisme de locomotion n'est pas immobile. Les forces engendrées par les effets inertiels sont négligées mais pas les forces de résistance au mouvement. Dans ce cas, le torseur des forces de liaison par contact et le torseur formé par les forces gravitationnelles et les forces de résistance au mouvement ont les mêmes éléments de réduction.

4.4.1 Critère qualitatif de stabilité pour un mécanisme de locomotion de type RCL

Lorsque les forces de résistance au mouvement sont nulles ou négligeables, il est possible de déterminer qualitativement si un mécanisme de locomotion type RCL soumis à la force de pesanteur et soutenu par n forces de contact non adhésives est dans un équilibre stable. Considérons le polygone convexe formé par une partie des points de contact et englobant tous les points de contact. Considérons

ensuite une demi-droite parallèle au champ de gravitation passant par le centre de masse du mécanisme de locomotion et dirigée dans le sens du champ gravitationnel. Trois cas de figure peuvent se présenter (figure 4.4):

- La demi-droite passe à l'extérieur du polygone. Dans ce cas, le mécanisme ne peut pas maintenir l'équilibre statique et pivotera autour du côté du polygone passant le plus près de la droite.
- La demi-droite coupe l'un des côtés du polygone. L'équilibre est à la limite de la stabilité et la moindre perturbation externe suffirait à faire pivoter le système autour du côté coupé par la droite.
- La demi-droite passe à l'intérieur du polygone. Dans ce cas, le mécanisme de locomotion est dans un état d'équilibre stable à condition que les coefficients de frottement entre les organes de contact et le terrain soient suffisamment grands. Il est possible de calculer quantitativement une marge de stabilité en utilisant la méthode exposée dans [Papadopoulos96].

Par conséquent, tout les mécanismes de locomotion ayant moins de trois points de contact ponctuels avec le sol ne pourront jamais atteindre l'état d'équilibre statique.

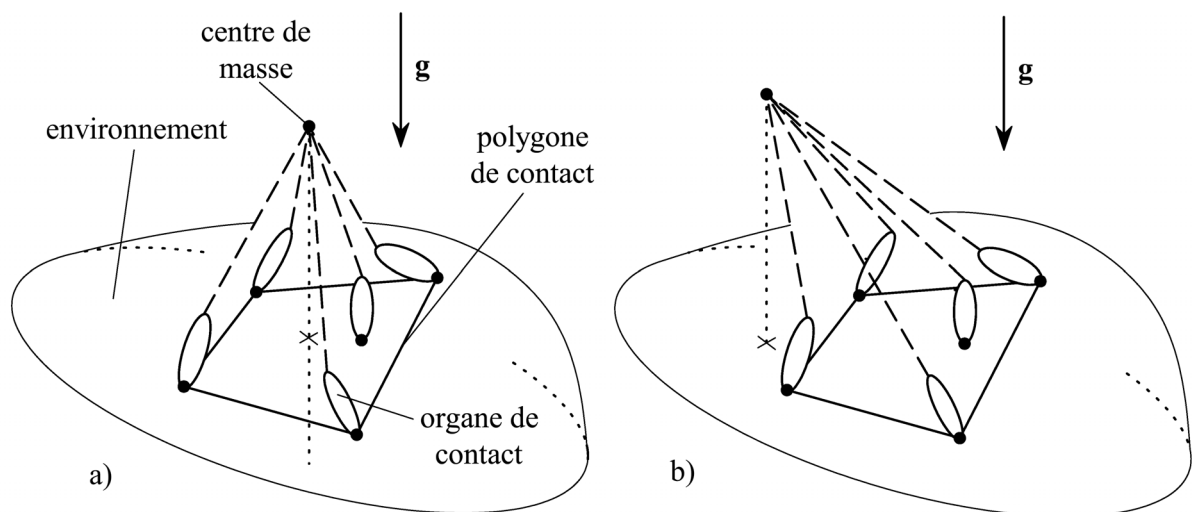


Figure 4.4: Détermination de la stabilité par voie graphique a) système en équilibre statique stable b) système en déséquilibre

4.4.2 Distribution des forces de contact conduisant à un équilibre stable

Considérons un mécanisme de locomotion avec n organes de contact ponctuels qui touchent tous la surface solide de l'environnement. Le mouvement instantané du mécanisme et la mobilité instantanée des liaisons des organes de contact sont supposés connus. Le système est en équilibre statique ou quasi-statique si le torseur de toutes les forces extérieures est équivalent à zéro. En d'autres termes, cela

revient à dire que le torseur des forces de liaison par contact exercées par le sol $\mathbf{f}^c [3n \times 1]$ doit être équivalent au torseur des forces gravitationnelles et des forces de résistance au mouvement. En réduisant ce dernier par rapport au centre de masse global de tout le mécanisme de locomotion, on a:

$$\mathbf{S}^c \cdot \mathbf{f}^c = [\mathbf{R}^T \quad \mathbf{M}^T]^T \quad (4.26)$$

avec:

$\mathbf{S}^c [6 \times 3n]$: Matrice des coefficients de \mathbf{f}^c pour les 6 équations de Newton-Euler formulant la condition d'équilibre statique ou quasi-statique par rapport au centre de masse

$\mathbf{R} [3 \times 1]$: Force résultante du torseur des forces gravitationnelles et des forces de résistance au mouvement.

$\mathbf{M} [3 \times 1]$: Couple résultant par rapport au centre de masse du torseur des forces gravitationnelles et des forces de résistance au mouvement.

Si les liaisons ne sont pas toutes du type «roulante non glissante à 3DDL», il est possible de regrouper sous forme matricielle l'ensemble des contraintes de liaison sur les forces de contact données par (4.3) et (4.4). On a:

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{f}^c = \mathbf{0} \quad (4.27)$$

avec:

$\mathbf{L} [c \times 3n]$: matrice des contraintes de liaison sur les forces de contact

c : nombre total de contraintes de liaison sur les forces de contact

Ce système est toujours sous-déterminé car:

$$c < 3n \quad (4.28)$$

Il est possible d'exprimer la solution générale de (4.27):

$$\mathbf{f}^c = \text{null}(\mathbf{L}) \cdot \mathbf{p}^c \quad (4.29)$$

$\mathbf{p}^c [(3n - c) \times 1]$: vecteur de paramétrisation du torseur des forces de contact

Après substitution de (4.29) dans (4.30):

$$\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L}) \cdot \mathbf{p}^c = [\mathbf{R}^T \quad \mathbf{M}^T]^T \quad (4.30)$$

Si le torseur des forces gravitationnelles et des forces de résistance au mouvement ainsi que la position des n points de contact et l'orientation des liaisons mixtes roulante et glissante à 4DDL sont connus par rapport à un référentiel lié à l'environnement, alors il existe trois cas de figure pour la distribution des forces de contact (figure 4.5):

1. Ancrage hyperstatique ayant une infinité de distributions possibles si:

$$\text{rank}([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L})]) = \text{rank}\left([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L}) \quad ; \quad [\mathbf{R}^T \quad \mathbf{M}^T]^T]\right) < (3n - c) \quad (4.31)$$

En exploitant les propriétés matricielles du pseudo-inverse et de l'espace nul, il est possible d'exprimer la solution générale sous forme paramétrique [Kumar90]:

$$\mathbf{p}^c = \text{pinv}([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L})]) \cdot [\mathbf{R}^T \quad \mathbf{M}^T]^T + \text{null}([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L})]) \cdot \mathbf{p}_s \quad (4.32)$$

avec:

\mathbf{p}_s $[(3n - c - \text{rank}(\mathbf{S}^c - \text{null}(\mathbf{L}))) \times 1]$: vecteur contenant les paramètres libres de la solution générale

$\text{pinv}()$: fonction qui donne le pseudo-inverse d'une matrice

$\text{null}()$: fonction qui donne l'espace nul d'une matrice

$\text{rank}()$: fonction qui donne le rang d'une matrice

2. Ancrage isostatique ayant une seule distribution possible si:

$$\text{rank}([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L})]) = \text{rank}\left([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L}) \quad ; \quad [\mathbf{R}^T \quad \mathbf{M}^T]^T]\right) = (3n - c) \quad (4.33)$$

La solution unique est donnée par:

$$\mathbf{f}^c = \text{pinv}(\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L})) \cdot [\mathbf{R}^T \quad \mathbf{M}^T]^T \quad (4.34)$$

3. Ancrage hypostatique sans solution si:

$$\text{rank}([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L})]) < \text{rank}\left([\mathbf{S}^c \cdot \text{null}(\mathbf{L}) \quad ; \quad [\mathbf{R}^T \quad \mathbf{M}^T]^T]\right) \quad (4.35)$$

Dans ce cas, il n'y a pas de distribution possible permettant un état d'équilibre statique ou quasi-statique (dérapage non-contrôlé de tous les organes de contact).

L'exemple du «trépied rigide» permet de se rendre compte de l'influence du choix du type de liaison entre les organes de contact et le terrain (figure 4.5).

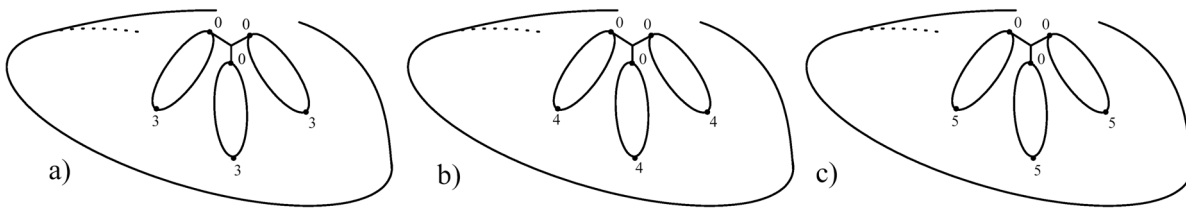


Figure 4.5: exemple: modélisation de l'équilibre statique d'un trépied rigide en 3D conduisant à un ancrage (a) hyperstatique (b) isostatique (c) hypostatique

Afin de valider (4.32), nous avons réalisé une interface permettant de visualiser la distribution de toutes ces forces pour le cas particulier bi-dimensionnel et pour un système formé exclusivement de liaisons roulantes non glissantes à 1DDL. Pour l'implémentation, le logiciel de modélisation *Sysquake* [Dimmler00] a été choisi car il permet la réalisation de graphiques interactifs. L'interface réalisée est composée de deux parties (figure 4.6):

- La fenêtre de visualisation des forces: Cette interface permet aussi de déplacer les points d'application des forces de liaison par contact ainsi que le point d'application de la résultante du torseur des forces gravitationnelles et des forces de résistance au mouvement.
- La fenêtre de paramétrisation: Cette interface permet de choisir l'angle et l'amplitude de la résultante du torseur des forces gravitationnelles et des forces de résistance au mouvement. Il est également possible d'ajouter un couple résultant à ce torseur. Cette interface permet également de «scanner» toutes les solutions en modifiant les paramètres d'équilibre.

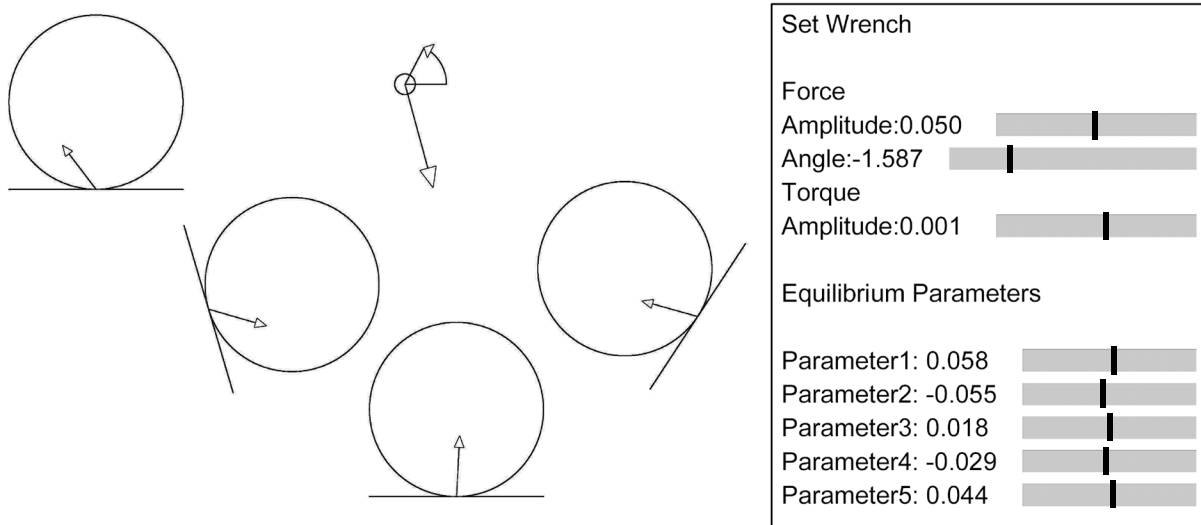


Figure 4.6: Simulation réalisée avec le logiciel *Sysquake* permettant de visualiser la distribution des 4 forces bi-dimensionnelles qui équilibrent un torseur donné par ses éléments de réduction (ancrage hyperstatique).

4.4.3 Validité physique d'une distribution de forces de liaison par contact

En réalité, les solutions théoriques de (4.26) ne sont pas toutes envisageables pratiquement. La nature du contact non-adhésif par attraction gravitationnelle et par friction contraint les forces des liaisons par contact à se situer à l'intérieur d'un demi-cône (figure 4.7.a) dont:

- Le sommet coïncide avec le point de contact.
- L'axe est défini par la droite normale au plan tangent commun passant par le point de contact.
- L'angle d'ouverture est donné par l'angle de frottement entre l'organe de contact et le terrain.
- Le demi-cône se situe à l'extérieur du solide qui représente l'environnement.

Lorsque la force de contact théorique se situe à l'extérieur du demi-cône de frottement, deux cas de figure peuvent se présenter (figure 4.7.b):

- l'organe de contact glisse tangentiellement ou dérape
- l'organe de contact décolle

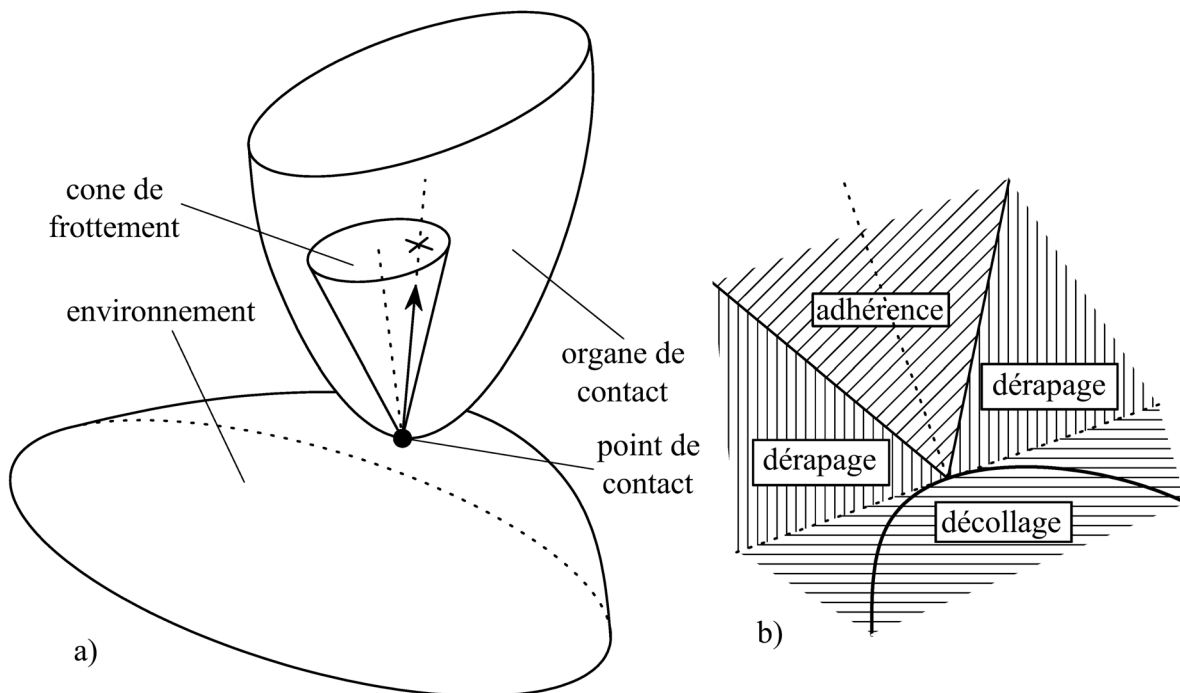


Figure 4.7: Représentation graphique d'un contact entre le mécanisme de locomotion et l'environnement (a) Le cône de frottement délimite la zone de validité pour avoir une force de liaison par contact entre l'environnement et l'organe de contact (b) vue en coupe du cône de frottement et représentation des trois zones caractérisant l'évolution cinématique du contact

4.4.4 Contrôlabilité du mouvement

Le but de cette section est de comprendre la relation qu'il existe entre le mouvement, l'architecture mécanique et la motorisation des mécanismes de locomotion de type RCL qui se déplacent en régime quasi-statique.

Considérons un mécanisme de locomotion possédant n organes de contact ponctuels, t organes de transmission, n liaisons externes et $(k-n)$ liaisons internes. Faisons l'hypothèse que ce mécanisme est dans un état de mouvement connu à partir d'une distribution connue des mobilités instantanées de liaison des organes de contact. Le torseur des forces de résistance au mouvement des liaisons internes et le torseur des forces de résistance au mouvement des liaisons externes peut alors être estimé en utilisant les lois phénoménologiques de Coulomb pour le frottement dynamique.

Considérons le vecteur \mathbf{f}^l formé par les forces généralisées transmises par les liaisons internes sans compter les forces internes de résistance au mouvement relatif, le vecteur \mathbf{f}^c formé par les forces de liaison par contact exercées par l'environnement et le vecteur \mathbf{f}^M formé par toutes les forces généralisées de motorisation.

Considérons un référentiel lié à l'environnement et muni d'un repère orthonormé. Pour chaque organe du mécanisme il est possible d'écrire les 6 équations de Newton-Euler. Pour chaque liaison interne du mécanisme il est possible d'écrire les 6 équations d'action-réaction. Pour chaque organe de contact, il est possible d'écrire les contraintes de liaison sur les forces de contact. Si l'on regroupe toutes ces équations sous forme matricielle, cela donne:

$$\mathbf{Q} \cdot \begin{bmatrix} (\mathbf{f}^I)^T & (\mathbf{f}^C)^T & (\mathbf{f}^M)^T \end{bmatrix}^T = \mathbf{f}^0 \quad (4.36)$$

avec:

$\mathbf{Q}[(6t + 6k + c) \times (12k - 9n)]$: Matrice d'équilibre quasi-statique

c : nombre total de contraintes de liaison sur les forces de contact

$\mathbf{f}^0[(6t + 6k + c) \times 1]$: vecteur regroupant les forces gravitationnelles et les forces de résistance au mouvement internes/externes

Il existe trois cas de figure pour la solution générale du problème:

1. Système ayant une infinité de solutions possibles si:

$$\text{rank}(\mathbf{Q}) = \text{rank}(\begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{f}^0 \end{bmatrix}) < 12k - 9n \quad (4.37)$$

En exploitant les propriétés matricielles du pseudo-inverse et de l'espace nul, il est possible d'exprimer la solution générale sous forme paramétrique:

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{f}^I)^T & (\mathbf{f}^C)^T & (\mathbf{f}^M)^T \end{bmatrix}^T = \text{pinv}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{f}^0 + \text{null}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{p}_o \quad (4.38)$$

avec:

$\mathbf{p}_o[(12k - 9n - \text{rank}(\mathbf{Q})) \times 1]$: vecteur contenant les paramètres libres de la solution générale

Dans ce cas, il existe une infinité de façons de motoriser le mécanisme pour contrôler le mouvement considéré. Parmi toutes ces solutions, on gardera celles dont le torseur des forces de liaison par contact \mathbf{f}^C correspond à une distribution valide d'un point de vue physique.

Il est possible de détecter les hyperstatismes de la structure en observant les colonnes de la matrice $\text{null}(\mathbf{Q})$. En effet, chaque colonne dont les éléments correspondants à \mathbf{f}^M sont tous nuls met en valeur un degré d'hyperstatisme du mécanisme. En d'autres termes, les forces associées aux éléments non nuls de cette même colonne resteront indéterminées quelle que soit le torseur de motorisation. On dit que ces forces sont incontrôlables par le mécanisme. Les mécanismes hyperguidés (Section 4.3.3) présentent toujours des hyperstatismes de structure.

2. Système ayant une seule solution possible si:

$$\text{rank}(\mathbf{Q}) = \text{rank}\left(\left[\mathbf{Q} \quad \vdots \quad \mathbf{f}^0\right]\right) = 12k - 9n \quad (4.39)$$

La solution unique est donnée par:

$$\left[\left(\mathbf{f}^I\right)^T \quad \left(\mathbf{f}^C\right)^T \quad \left(\mathbf{f}^M\right)^T\right]^T = \text{pinv}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{f}^0 \quad (4.40)$$

Si le torseur des forces de liaison par contact \mathbf{f}^C correspond à une distribution valide d'un point de vue physique (Section 4.4.3), il n'existe qu'une seule façon de motoriser le mécanisme pour contrôler le mouvement considéré. Dans le cas contraire, le mouvement n'est pas contrôlable.

3. Système sans solution si:

$$\text{rank}(\mathbf{Q}) < \text{rank}\left(\left[\mathbf{Q} \quad \vdots \quad \mathbf{f}^0\right]\right) \quad (4.41)$$

Dans ce cas, il n'y a pas de solution de motorisation du mécanisme permettant le mouvement quasi-statique désiré. En d'autres termes, le mouvement désiré est théoriquement possible d'un point de vue cinématique mais n'est pas contrôlable par le mécanisme. On peut regrouper dans cette catégorie les mouvements dont tous les organes de contact dérapent dans la même direction instantanée.

4.4.5 Validité du torseur de motorisation

La motorisation des degrés de liberté qui ne sont pas bloqués par les liaisons internes des organes du mécanisme de locomotion se fait grâce aux organes de transformation d'énergie (Section 3.4.2). Pour chaque degré de liberté, il y'a trois possibilités:

1. La motorisation est contrôlable avec des moteurs ou des freins actifs. La technologie utilisée limite cependant les amplitudes maximales des couples qui pourront être fournis.
2. La motorisation n'est pas contrôlable car les organes transducteurs sont des éléments élastiques ou des éléments dissipateurs passifs. Les couples transmis dépendent à tout instant de l'état de position pour un élément élastique et de l'état de vitesse pour un élément dissipateur.

3. Il n'y a pas de motorisation.

Le système d'équations (4.36) peut être reformulé et réduit:

- en remplaçant les variables de \mathbf{f}^M qui correspondent à des actionneurs passifs par les valeurs déterminées en fonction de l'état du mécanisme grâce aux différents modèles d'actionneurs associés
- en remplaçant les variables de \mathbf{f}^M qui correspondent à une absence de motorisation par 0

Pour la solution, trois cas de figure peuvent alors se présenter:

- Le système a une infinité de solutions. Le mouvement considéré est surmotorisé. On pourra alors procéder à une optimisation en tenant compte des contraintes physiques pour les forces de contact et en tenant compte des contraintes liées aux limites technologiques des moteurs.
- Le système a exactement une solution. Celle-ci devra être validée par rapport aux contraintes physiques avant d'être acceptée.
- Le système n'a pas de solution. Le mouvement désiré est sous motorisé. Celui-ci n'est pas contrôlable par le mécanisme de locomotion.

Nous allons maintenant donner un exemple de mécanisme de locomotion surmotorisé. Il s'agit d'un modèle simplifié du robot «Octopus» 2D (Section 7.5). Une représentation graphique de l'architecture du mécanisme (figure 4.8) nous permet de calculer la mobilité grâce à la méthode de Grübler:

$$M_1^{tot} = (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) - 3 \cdot 3 = 2 \quad (4.42)$$

Cette mobilité correspond aux mouvements de groupe suivants:

- La mobilité interne de I donnée par la rotation du bras
- La mobilité externe de I donnée par le pivotement groupé des organes de contact autour de leurs points de contact respectifs et accompagné des mouvements de tous les organes de transmission.

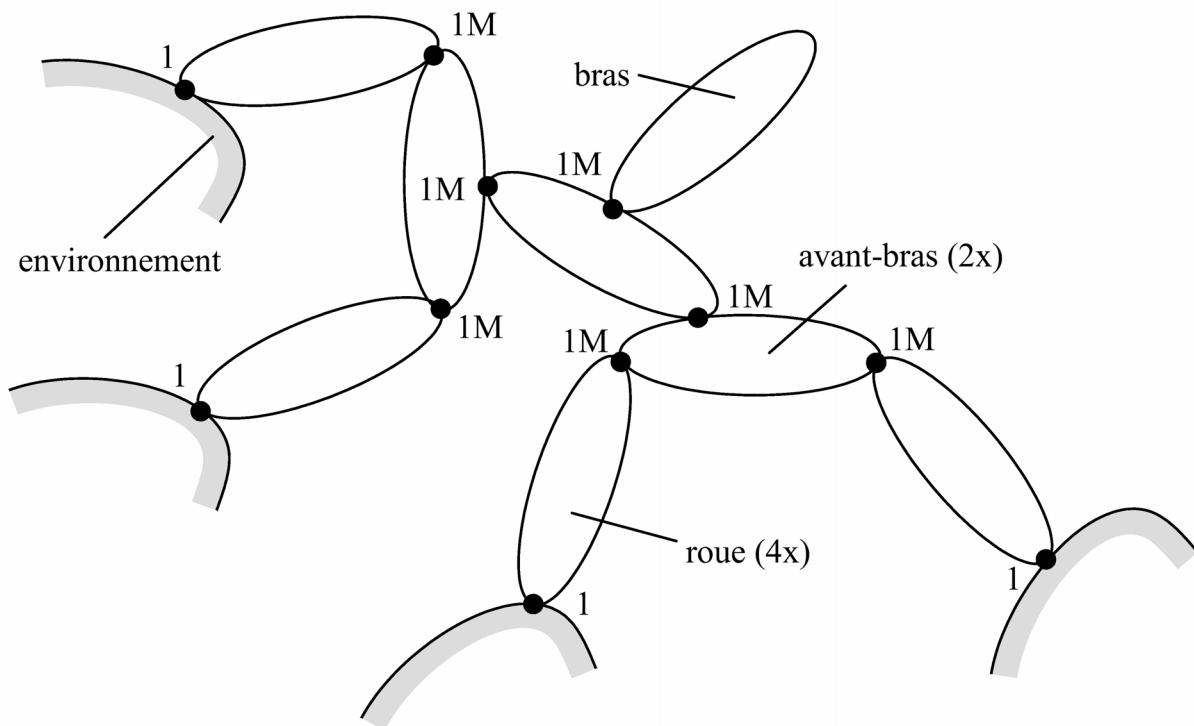


Figure 4.8: Représentation graphique de l'architecture mécanique simplifiée du robot «Octopus» 2D. Le mécanisme à parallélogramme des deux bras du robot réel a été remplacé par un organe de transmission qui connecte les deux avant-bras et le bras du modèle représenté sur cette figure. La mobilité est indiquée pour chaque liaison. Un «M» indique la présence d'un degré de liberté motorisé.

Afin de mettre en valeur la contrôlabilité de la distribution des forces de contact dans le cas d'un équilibre statique sans mouvement, nous avons réalisé une simulation graphique interactive avec Sysquake. L'interface réalisée est composée de deux parties (figure 4.9):

- La fenêtre de visualisation des forces de liaison par contact: Cette interface permet également de changer la posture du mécanisme ainsi que la position des points de contact sur les roues.
- La fenêtre de paramétrisation: Cette interface permet d'agir sur les couples de motorisation afin de pouvoir visualiser les différents états d'équilibre statique.

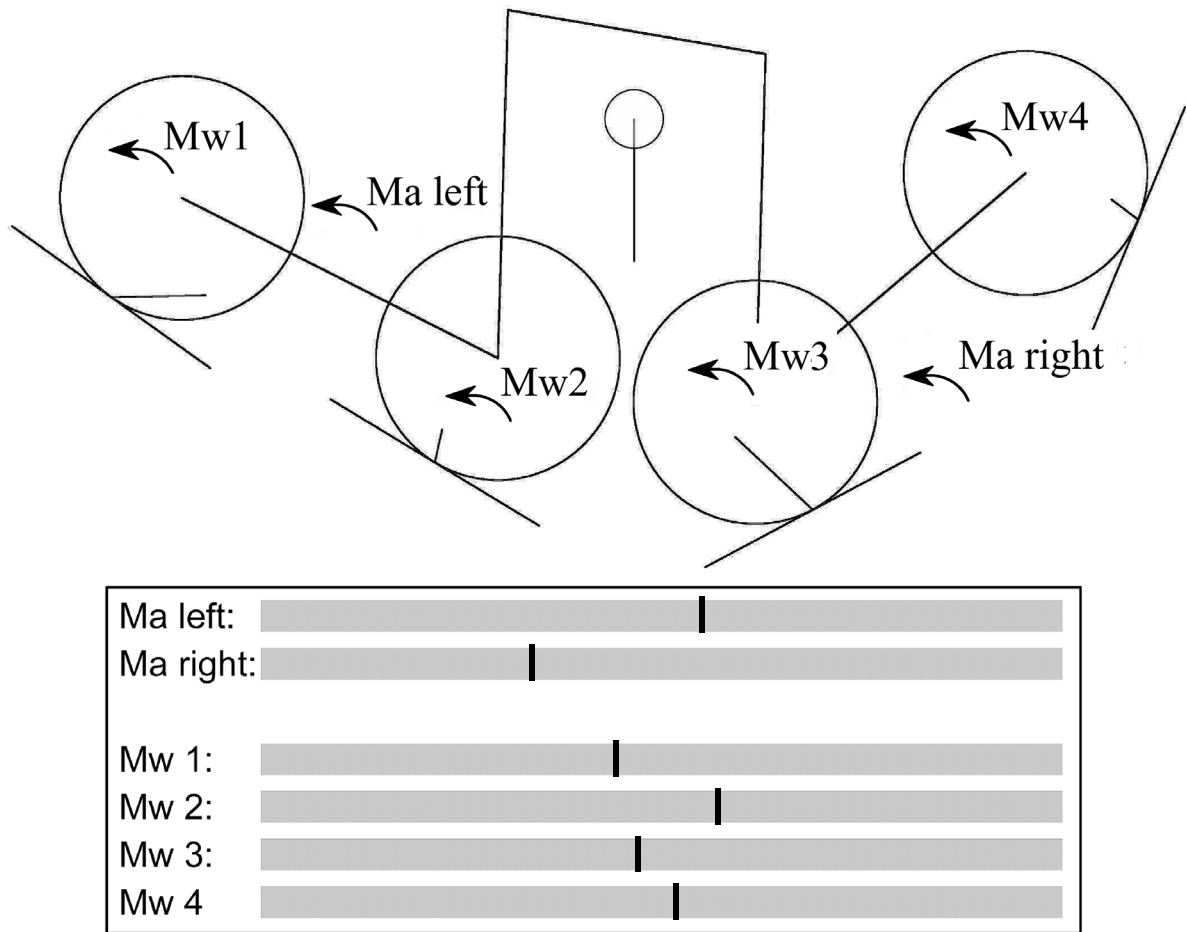


Figure 4.9: Simulation réalisée avec le logiciel *Sysquake* permettant de visualiser la distribution des 4 forces bi-dimensionnelles qui équilibrent le poids du mécanisme de locomotion «Octopus» 2D. Les potentiomètres permettent de changer certains des couples de motorisation afin de changer l'état d'équilibre statique du mécanisme. Par souci de clarté, les forces internes ne sont pas représentées.

4.4.6 Optimisation des forces de liaison par contact

Le but de cette section est d'exposer le critère d'optimisation permettant de choisir le torseur de motorisation dans le cas d'un mouvement effectué avec un mécanisme de locomotion sur-motorisé. Nous avons vu que la validité physique d'une distribution de forces de liaison par contact non adhésif et par friction dépendait de l'angle de frottement défini par la nature du couple tribologique en interaction. D'un point de vue mathématique, la condition de non glissement peut s'écrire:

$$\frac{\|\vec{T}\|}{\|\vec{N}\|} \leq \mu_0 \quad (4.43)$$

avec:

\vec{T} : force tangentielle de liaison obtenue par projection de la force de liaison sur le plan de contact

\vec{N} : force normale de liaison obtenue par projection de la force de liaison sur la droite normale au plan de contact

μ_0 : coefficient de frottement statique dépendant du couple tribologique

Dans la plupart des cas pratiques, le coefficient de frottement est mal connu. Il est toutefois possible de réduire les risques de glissement en minimisant le rapport entre la force tangentielle et la force normale. L'optimisation pourra donc se faire en considérant ce critère pour chaque organe de contact [Iagnemma00].

A titre d'exemple, considérons un mécanisme de locomotion à deux roues motorisées en 2D. Vu qu'il n'y a qu'un seul degré de liberté, il s'agit d'un mécanisme sur-motorisé. Pour chaque état d'équilibre statique et pour la i^{eme} roue, il est possible de définir:

$$\mu_i = \frac{\vec{T}_i \cdot \vec{t}_i}{\vec{N}_i \cdot \vec{n}_i} \quad , i = 1..2 \quad (4.44)$$

avec:

\vec{n}_i : vecteur unitaire normal à la droite de contact dirigé contre la roue

\vec{t}_i : vecteur unitaire colinéaire à la droite de contact tel que $(\vec{n}_i; \vec{t}_i)$ forme une base directe

Une simulation réalisée avec Sysquake permet de trouver le torseur de motorisation optimum de façon graphique (figure 4.10). Celui-ci correspond à:

$$\mu_1 = \mu_2 \quad (4.45)$$

sous condition que les contraintes physiques de non-glissement (4.46) et de non-décollement (4.47) soient vérifiées:

$$\mu_i \leq \mu_0 \quad (4.46)$$

$$\vec{N}_i \cdot \vec{n}_i \geq 0 \quad (4.47)$$

Ce critère correspond à une minimisation du risque de glissement. On peut l'appliquer même si l'on ne connaît pas les coefficients de frottement statique μ_0 à condition de connaître la position des points de contact.

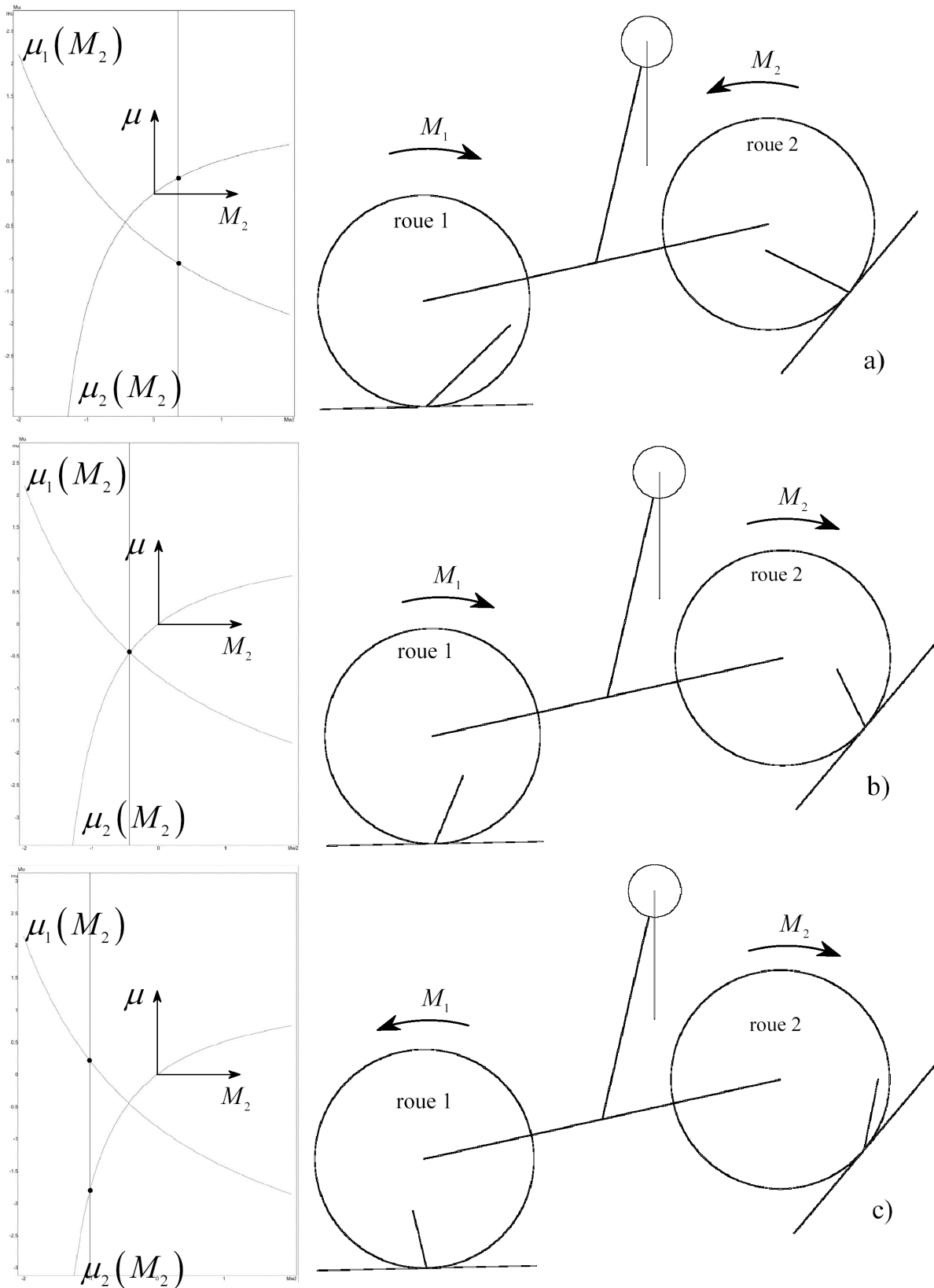


Figure 4.10: Parmi ces trois états d'équilibre statique, l'état représenté en b) est celui qui présente le moins de risque de dérapage d'une des roues.

4.4.7 Conclusion

Un mécanisme de locomotion de type RCL avec n organes de contact qui se déplace de façon quasi-statique doit être en mesure de contrôler les forces normales et tangentielles de liaison avec le terrain s'il veut pouvoir avancer tout en maintenant un équilibre stable. Pour une disposition donnée des points de contact, il existe une infinité de torseurs théoriques de forces de liaisons par contact. Cet ensemble peut être décrit par un espace vectoriel à $3n$ dimensions. Connaissant la posture du mécanisme de locomotion et le mouvement instantané des organes de contact, on peut définir un sous-espace formé par les distributions capables d'équilibrer le torseur de forces appliquées (forces gravitationnelles, forces de résistance au mouvement) (Section 4.4.2). Cependant, ces distributions ne sont pas toutes contrôlables par le mécanisme et sa motorisation (Sections 4.4.4 et 4.4.5). Deux sous-espaces imbriqués au précédant peuvent alors être définis. Avant de pouvoir être validée, une distribution doit encore satisfaire les contraintes physiques de non-glissement et de non décollement (Section 4.4.3). En général, les limites des contraintes de non-glissement sont mal connues car les caractéristiques du terrain sont difficiles à mesurer. Dans ce cas, les mécanismes sur-motorisés possèdent un avantage car ils pourront choisir une distribution qui minimisera les risques de glissement des organes de contact (Section 4.4.6). On peut représenter tous ces sous-espaces vectoriels dans un diagramme de Venn (figure 4.11).

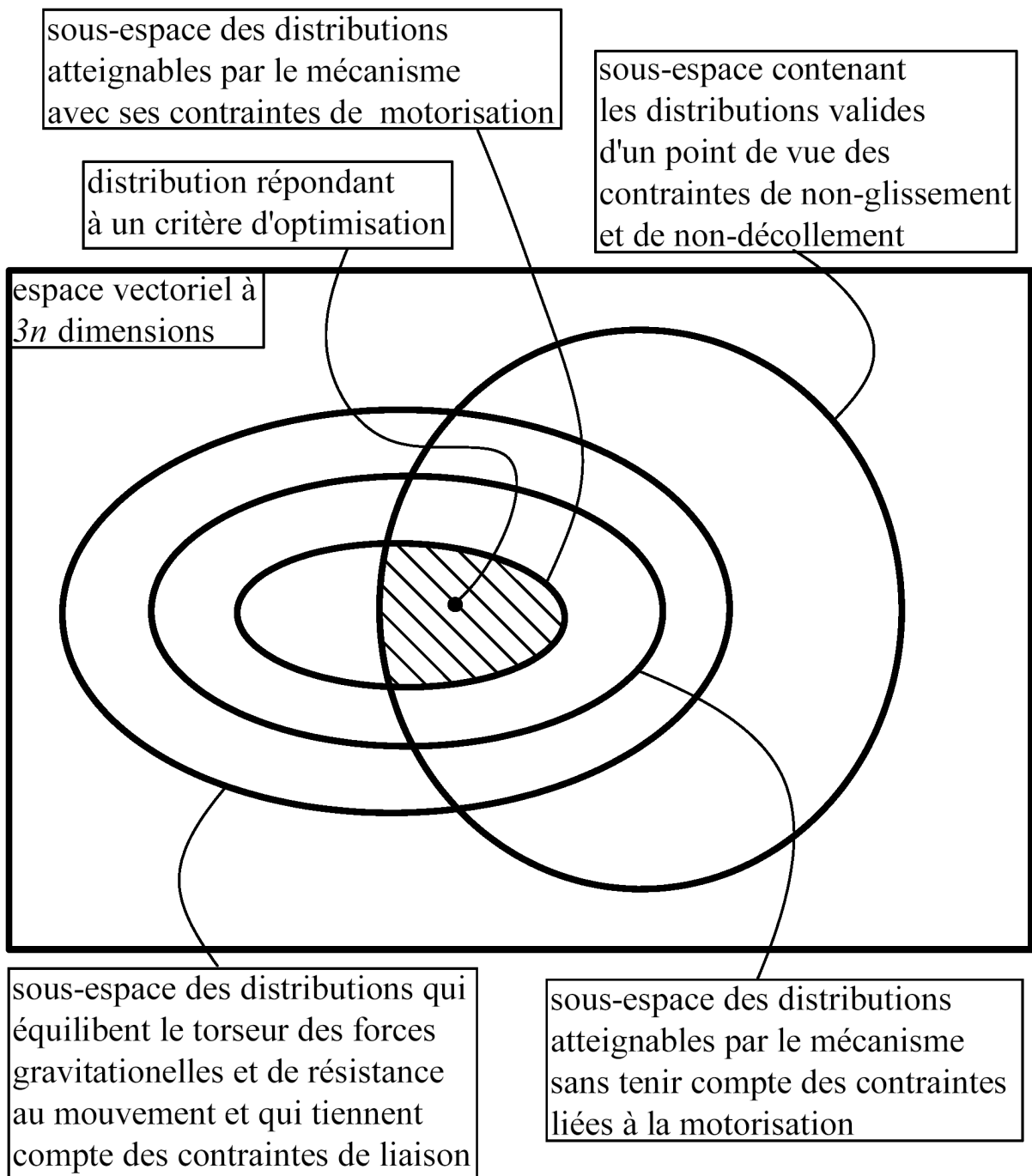


Figure 4.11: Sous-espaces des différentes distributions des forces de liaison par contact d'un mécanisme de locomotion en mouvement quasi-statique. La zone hachurée correspond aux distributions valides d'un point de vue physique et pouvant être atteintes par le mécanisme de locomotion.

5

Mécanismes de locomotion tout-terrain roulants

Dans ce chapitre, nous étudierons plus en détail les caractéristiques spécifiques aux mécanismes de locomotion tout-terrain roulants. Nous décrirons les différentes classes de mécanismes qui composent ce type de véhicules (les mécanismes de braquage, les mécanismes de franchissement, les mécanisme permettant la variation de l'empattement des roues). Pour terminer, nous fournirons un catalogue de véhicules constituant en quelque sorte l'état de l'art du domaine. Nous compléterons la liste avec les prototypes réalisés dans le cadre de ce travail afin de faciliter la comparaison.

5.1 Caractérisation morphologique des organes de contact

Dans le cas de mécanismes de locomotion de type *RCL*, les organes de contact sont des corps solides que l'on peut caractériser par:

- La géométrie de la *surface globale de contact* avec l'environnement définie par le lieu géométrique des points de contact potentiels avec l'environnement
- Les propriétés mécaniques de la surface globale de contact
- Le type de liaison mécanique avec le reste du mécanisme de locomotion

Il existe une infinité de combinaisons possibles. Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à deux classes d'organes de contact que l'on rencontre dans la plupart des mécanismes de locomotion de type *RCL*.

5.1.1 Les roues

Ce sont des corps solides de révolution connectés au reste du mécanisme par une liaison pivot à 1DDL dont l'axe se confond avec l'axe de révolution du corps. Une roue se caractérise par la géométrie de son profil de révolution (figure 5.1). Le matériau et le relief de la surface de contact est optimisé pour adhérer au sol. Ce type d'organe de contact favorise une liaison à 3 degrés de liberté avec le sol. Dans ce qui va suivre, nous utiliserons le modèle de roue torique car c'est celui dont la zone de contact a le plus de chance d'être ponctuelle. On distingue:

- Les roues passives qui ne sont pas motorisées
- Les roues actives qui sont motorisées

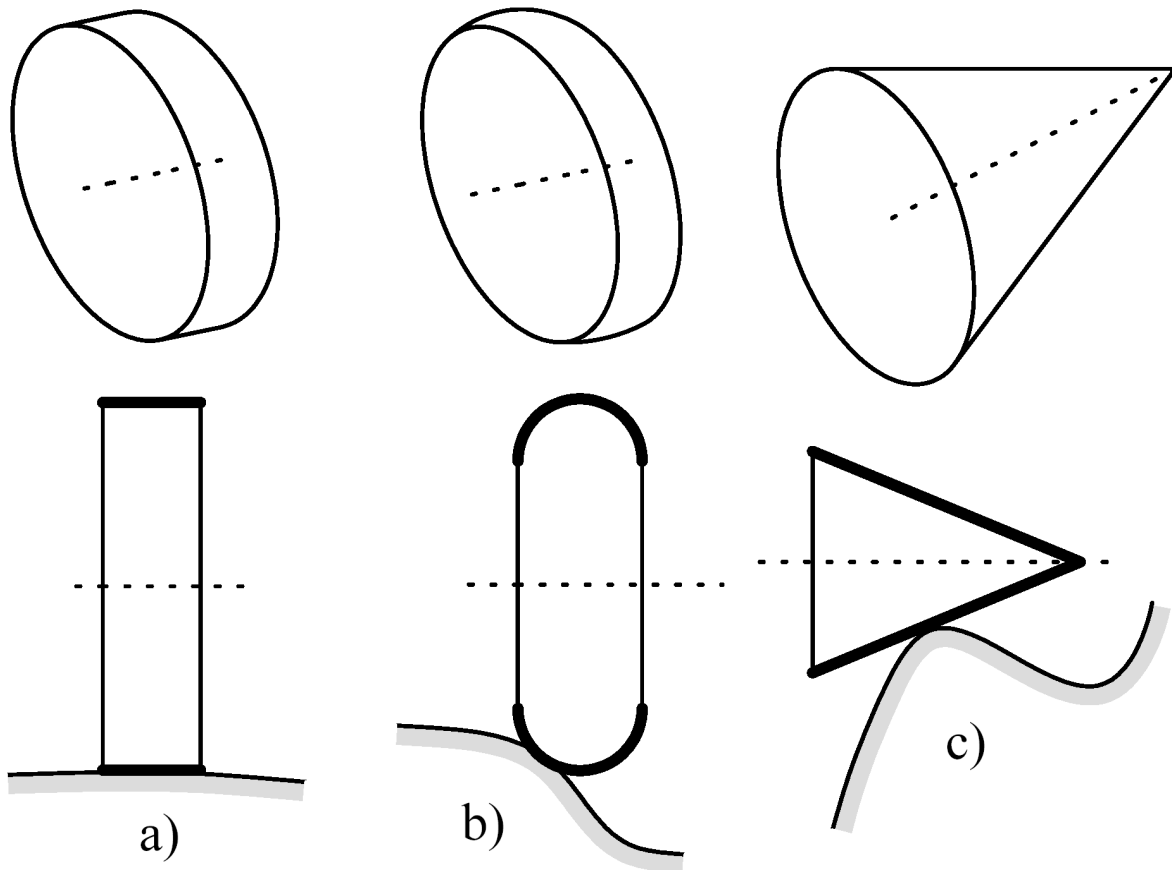


Figure 5.1: Différents types de profils de roues (a) roue cylindrique (b) roue torique (c) roue cônica

Le mouvement instantané préférentiel d'une roue par rapport au terrain est le roulement autour d'un axe contenu dans le plan de contact et qui coupe l'axe de révolution de la roue. Si l'axe de la roue est parallèle au plan de contact, c'est le roulement autour de l'axe parallèle à l'axe de révolution de la roue qui sera préférentiel (figure 5.2.a). Lorsque le plan de contact reste toujours orienté de la même manière le long de la trajectoire du point de contact (terrain plat), le roulement est

continu. Cette configuration est particulièrement avantageuse d'un point de vue énergétique car les seules forces de résistance au mouvement engendrées par la roue sont sa résistance au roulement et éventuellement son poids.

Afin de changer la direction du mouvement préférentiel, la roue peut pivoter autour d'un axe perpendiculaire au plan de contact. Pour ce faire, elle doit être munie d'un mécanisme de braquage motorisé (figure 5.2.c). D'un point de vue énergétique, il faut vaincre les forces de résistance au pivotement avant de pouvoir bénéficier de la nouvelle direction de roulement préférentielle.

La roue peut également avoir un mouvement de pivotement latéral lorsque celle-ci est montée sur un mécanisme de suspension latéral spécialement conçu pour limiter les efforts et les glissements latéraux (figure 5.2.b).

Une roue qui n'est pas munie d'un mécanisme de braquage peut avoir un mouvement de dérapage latéral induit par le reste du mécanisme désireux de se déplacer dans une direction non préférentielle de la roue. Dans ce cas, la résistance au mouvement est beaucoup plus forte que la résistance aux roulements et on aura intérêt à alléger le plus possible la charge supportée par la roue pour diminuer l'énergie nécessaire pour effectuer cette manoeuvre.

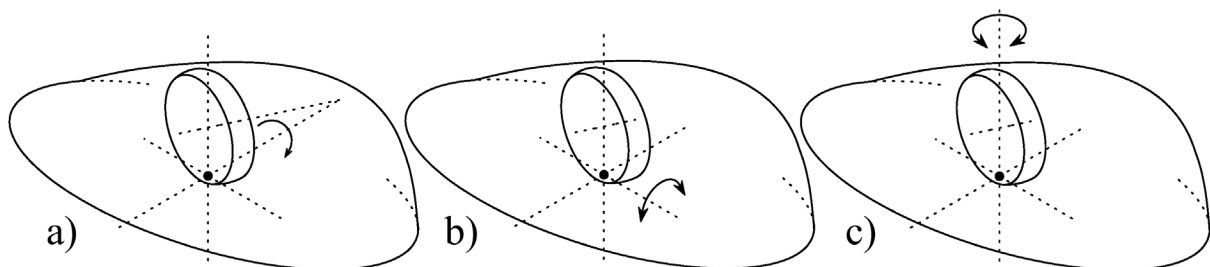


Figure 5.2: Mouvements préférentiels d'une roue (a) roulement (b) pivotement latéral (c) pivotement normal

5.1.2 Les patins

Ce sont des surfaces convexes fixées rigidement au reste du mécanisme et optimisées pour glisser sur le terrain avec le moins de frottement possible. Ce type d'organe de contact favorise une liaison à 5 degrés de libertés avec le sol.

5.2 Caractérisation des mécanismes de locomotion roulants

Un mécanisme de locomotion tout terrain de type *RCL* est dit *roulant* lorsqu'il y'a toujours au moins une roue, parmi ses organes de contact, qui contribue activement à la locomotion.

Nous allons maintenant passer en revue les deux classes de mécanismes qui composent l'architecture mécanique des véhicules tout-terrain roulants qui se déplacent en régime quasi-statique.

5.2.1 Les mécanismes de braquage

Leur fonction est d'orienter les roues afin d'engendrer une nouvelle direction de mouvement préférentielle, contrôlable et offrant peu de résistance au mouvement à tout le véhicule. Deux stratégies sont possibles :

- le braquage différentiel qui s'effectue lorsque deux groupes de roues, qui sont toutes orientées de la même manière, se mettent à tourner dans deux directions opposées. L'orientation des roues change en même temps que l'orientation du reste du véhicule. Ce mouvement s'accompagne presque toujours d'un dérapage latéral de certaines roues. D'un point de vue mécanique, cette stratégie ne nécessite pas de mécanisme individuel de braquage pour chaque roue.
- le braquage synchronisé qui s'effectue lorsque toutes les roues, munies d'un mécanisme de braquage individuel ou groupé, s'orientent indépendamment du reste du véhicule [Apostolopoulos01]. Cette stratégie est beaucoup plus intéressante d'un point de vue énergétique mais elle complique l'architecture mécanique des véhicules roulants.

5.2.2 Les mécanismes de franchissement

Leur fonction est d'aider le véhicule à franchir les obstacles. On distingue trois stratégies de franchissement :

- On utilise la traction des roues en comptant sur leur adhérence avec le sol (figure 5.3.a). La distribution de la traction peut être optimisée si l'on connaît les points de contact (Section 4.4.6).
- On contrôle la position du centre de masse en déplaçant une charge mobile qui fait partie du mécanisme de locomotion (figure 5.3.b). De cette manière, on peut agir sur la répartition de la charge normale sur les différentes roues.
- On peut créer une distribution de la charge sur les roues qui va favoriser le franchissement en introduisant des mécanismes articulés qui connectent les supports des roues (mécanisme de suspension). Si ces articulations sont motorisées activement, on a affaire à une suspension active (figure 5.3.c). Si ces articulations sont motorisées passivement ou ne sont pas motorisées, on a affaire à une suspension passive. Si le mécanisme de locomotion possède une direction préférentielle de mouvement engendrée par une orientation identique de toutes ses roues, alors on distingue les mécanismes de suspension longitudinaux et les mécanismes de suspension latéraux.

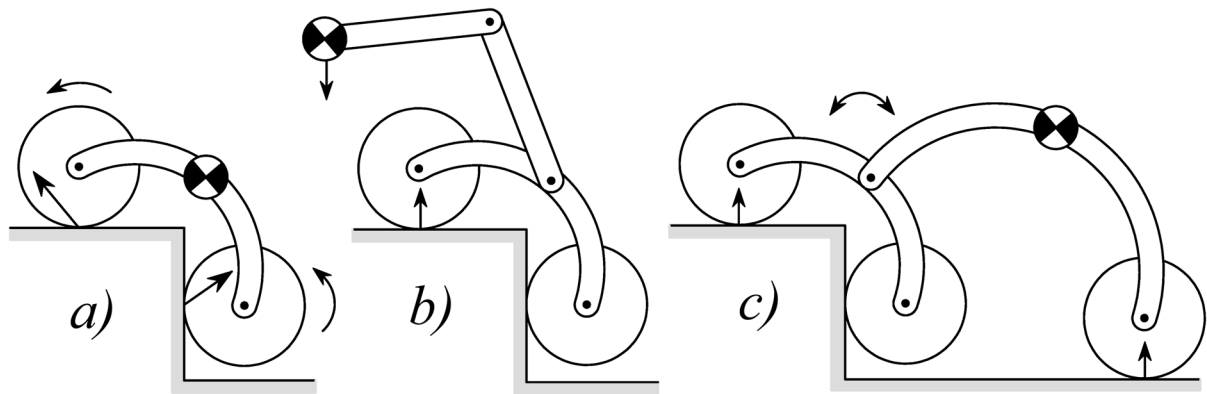


Figure 5.3: Les stratégies de franchissement (a) utilisation de la traction des roues et de l'adhérence du sol (b) contrôle de la position du centre de masse et basculement (c) suspension longitudinale active permettant le contrôle de la distribution des forces normales

La plupart des mécanismes de locomotion tout terrain roulants combinent plusieurs de ces stratégies de franchissement.

5.2.3 Les mécanismes permettant la variation de l'empattement des roues

Ils permettent d'accroître la stabilité du véhicule grâce à une reconfiguration active du polygone de contact (Section 4.4.1) [Iagnemma01] [Grand02]. Par exemple, ils permettent au véhicule de maintenir une assiette horizontale lorsque le terrain est en devers par rapport aux roues.

5.3 Catalogue de mécanismes de locomotion tout-terrain roulants

Dans ce qui suit, nous proposons un catalogue des véhicules existants. Les trois premières planches constituent l'état de l'art dans le domaine des mécanismes de locomotion tout-terrain roulants. La dernière planche représente les prototypes réalisés dans le cadre de ce travail. Dans chaque cas, nous fournissons des indications concernant le mode de braquage, le type de suspensions ou la présence d'un mécanisme spécifique (différentiel central, masse excentrée, empattement variable). Une référence permettant d'obtenir plus d'informations est également fournie pour chaque véhicule. Finalement, un modèle en 2D de la suspension longitudinale est proposé pour chaque cas. Des outils mathématiques permettant de modéliser le mécanisme de franchissement longitudinal seront proposés au chapitre suivant.

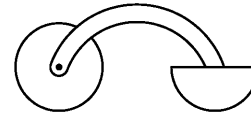
Nom: **PEMEX**

Réalisation: EPFL-Suisse

Référence: [Nicoud95]

braquage différentiel

pas de mécanisme de suspension



Nom: **NOMAD**

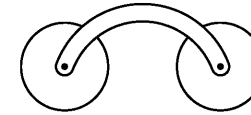
Réalisation: Carnegie Mellon-USA

Référence: [Apostolopoulos01]

braquage synchronisé

pas de suspension longitudinale

suspension latérale passive



Nom: **NANOROVER**

Réalisation: JPL-USA

Référence: [Baumgartner98]

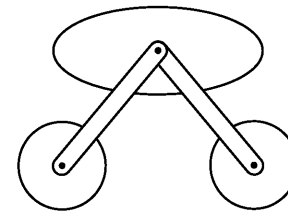
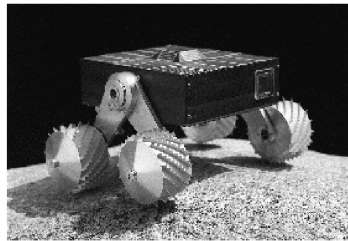
braquage différentiel

suspension longitudinale active

suspension latérale active

différentiel central

empattement variable



Nom: **HYBTOR**

Réalisation: IMSRI-Finlande

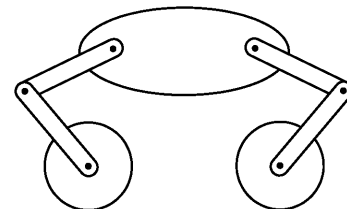
Référence: [Leppänen98]

braquage synchronisé

suspension longitudinale active

suspension latérale active

empattement variable



Nom: **HYLOS**

Réalisation: LRP-France

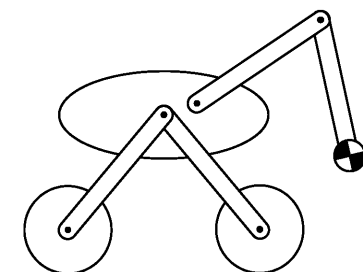
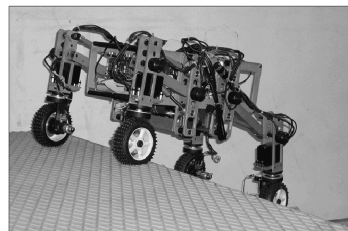
Référence: [Grand02]

braquage synchronisé

suspension longitudinale active

suspension latérale active

empattement variable



Nom: **Sample Return Rover**

Réalisation: JPL-USA

Référence: [Iagnemma01]

braquage synchronisé

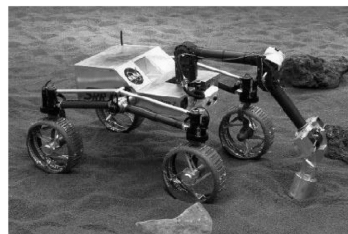
suspension longitudinale active

suspension latérale active

différentiel central

contrôle actif du centre de masse

empattement variable



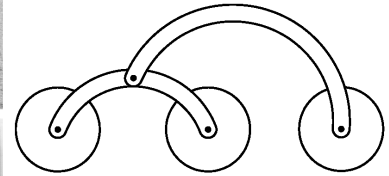
Nom: **MICRO 5**

Réalisation: Meiji Univ.-Japon

Référence: [Kubota99]

braquage synchronisé

suspension longitudinale passive

Nom: **SOJOURNER**

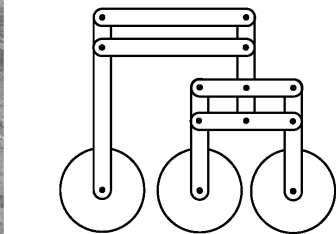
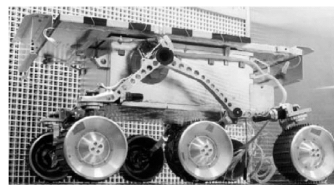
Réalisation: JPL-USA

Référence: [Stone96]

braquage synchronisé

suspension longitudinale passive

différentiel central

Nom: **NEXUS 6**

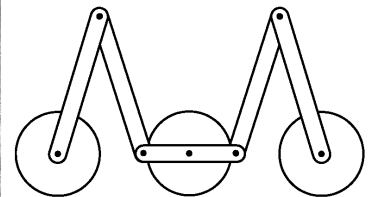
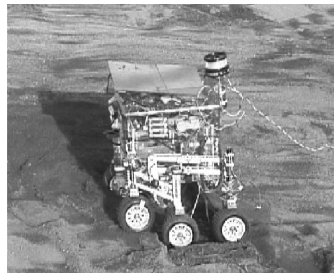
Réalisation: Tohoku Univ.-Japon

Référence: [Yoshida02]

braquage synchronisé

suspension longitudinale passive

différentiel central

Nom: **MARSOKHOD**

Réalisation: RoverCompany-Russie

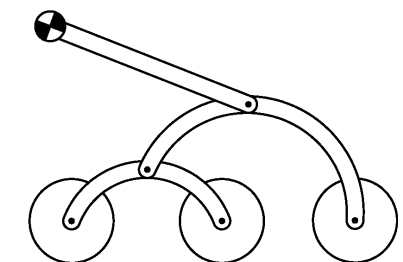
Référence: [Kemurdjian92]

braquage synchronisé

suspension longitudinale active

suspension latérale passive

empattement variable

Nom: **Personal Rover**

Réalisation: Carnegie Mellon-USA

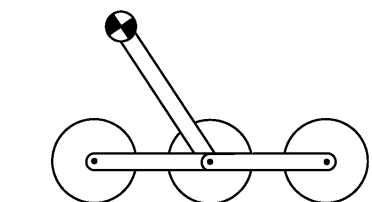
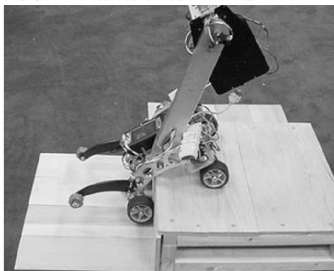
Référence: [Falcone03]

braquage synchronisé

suspension longitudinale active

différentiel central

contrôle actif du centre de masse

Nom: **MUSYASI LOCKY**

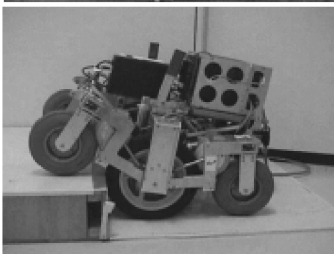
Réalisation: Tsukuba Univ.-Japon

Référence: [Koyanagi99]

braquage synchronisé

suspension longitudinale active

contrôle actif du centre de masse



Nom: **ROBOVOLC**

Réalisation: Catania Univ-Italie

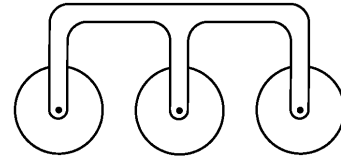
Référence: [Guccione01]

braquage différentiel

pas de suspension longitudinale

suspension latérale passive

contrôle actif du centre de masse



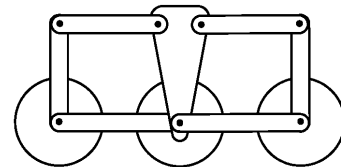
Nom: **HELIOS V**

Réalisation: TITech-Japon

Référence: [Uchida99]

braquage différentiel

suspension longitudinale active



Nom: **IROBOT-LE**

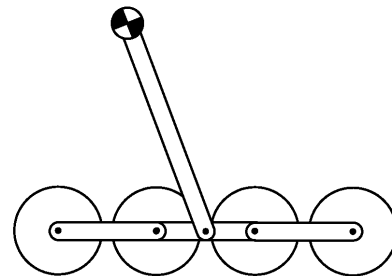
Réalisation: Irobot Corp-USA

Référence: www.irobot.com

braquage différentiel

suspension longitudinale active

contrôle actif du centre de masse



Nom: **Active Chord Mechanism**

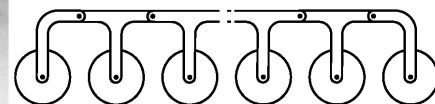
Réalisation: TITech-Japon

Référence: [Hirose98]

braquage synchronisé

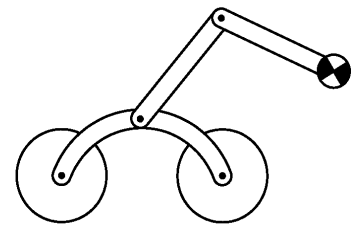
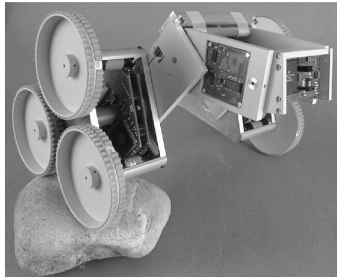
suspension longitudinale active

suspension latérale active

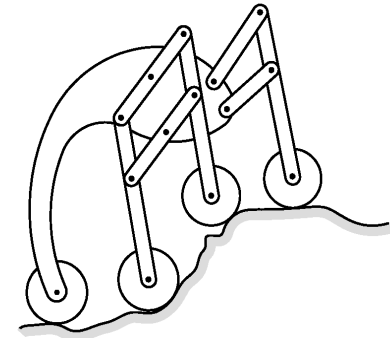


Nom: **SPACE CAT**

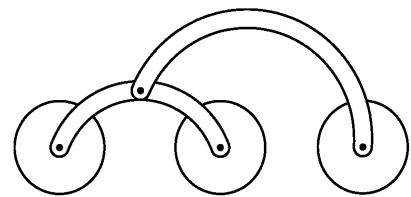
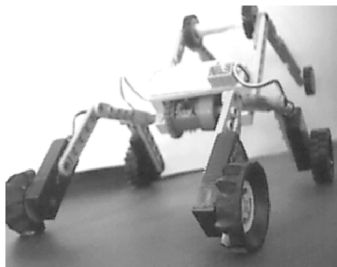
Réal.: Mecanex + EPFL-Suisse
 Référence: [Lauria98]
 braquage différentiel
 suspension longitudinale active
 contrôle actif du centre de masse

Nom: **SHRIMP**

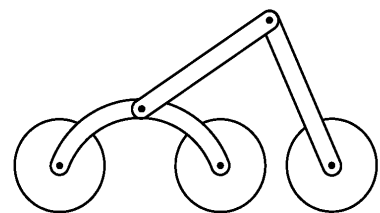
Réalisation: EPFL-Suisse
 Réf: [Siegwart02] [Lauria00]
 braquage différentiel
 braquage synchronisé
 suspension longitudinale passive

Nom: **INSECTE I**

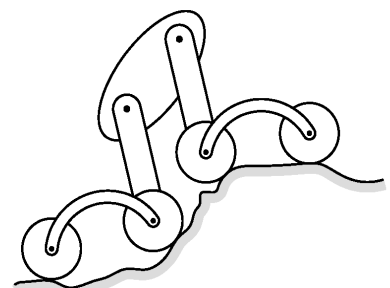
Réalisation: EPFL-Suisse
 Référence: [Greppin99]
 braquage différentiel
 suspension longitudinale active
 différentiel central

Nom: **INSECTE II**

Réalisation: EPFL-Suisse
 Référence: [Meisser00]
 braquage différentiel
 suspension longitudinale active
 différentiel central
 empattement variable

Nom: **OCTOPUS**

Réalisation: EPFL-Suisse
 Référence: [Lauria02]
 braquage différentiel
 suspension longitudinale active
 différentiel central
 contrôle actif du centre de masse



6

Modélisation des mécanismes roulants 2D

Le but de ce chapitre est de modéliser la locomotion des mécanismes roulants 2D sur des terrains non plats. Après avoir posé les hypothèses nécessaires, nous commencerons par établir le modèle cinématique. Ce dernier sera validé par une simulation avec le logiciel Sysquake dans le cas du bi-roue simple. Nous présenterons ensuite le modèle dynamique direct et le modèle dynamique inverse. Cela nous permettra ensuite d'introduire le modèle quasi-statique comme cas particulier. Ce dernier sera validé par une simulation avec le logiciel Sysquake dans le cas du bi-roue simple.

Il existe plusieurs façons de modéliser la dynamique d'un système multicorps [Goldstein02]. Parmi les plus connues, on peut citer:

- La méthode de Newton-Euler
- La méthode de Lagrange
- La méthode des travaux virtuels

Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons la méthode de Newton-Euler non récursive car elle permet une généralisation aisée de la formulation pour n'importe quel mécanisme. Une formulation récursive permettrait de diminuer le nombre d'opérations pour les applications en temps réel [Featherstone00]. Cependant, la généralisation de cette dernière est beaucoup plus difficile à établir lorsque le mécanisme contient des boucles car beaucoup moins systématique.

6.1 Hypothèses

La nature de l'environnement influence considérablement les performances d'un mécanisme de locomotion. L'attraction gravitationnelle et les forces inertielles causées par d'éventuelles accélérations de l'environnement par rapport à un

référentiel d'inertie sont les premiers paramètres à prendre en considération. Dans le cadre de ce travail, nous ferons l'hypothèse d'un environnement terrestre de type Galiléen.

L'état de surface et la consistance du terrain joue un rôle très important. Leur étude est entreprise dans le cadre de la mécanique des sols (terramechanics). Les modèles développés peuvent devenir extrêmement compliqués lorsqu'ils tiennent compte de la granulométrie, des déformations et des glissements du terrain [Yoshida03]. Afin de simplifier notre étude, le terrain sera modélisé comme un solide indéformable.

Dans ce qui va suivre, le terrain sera modélisé comme un solide indéformable et impénétrable lié à un référentiel d'inertie et muni d'un repère Oxy orthonormé. La courbe qui délimite la frontière du terrain est la seule zone de contact possible avec le véhicule.

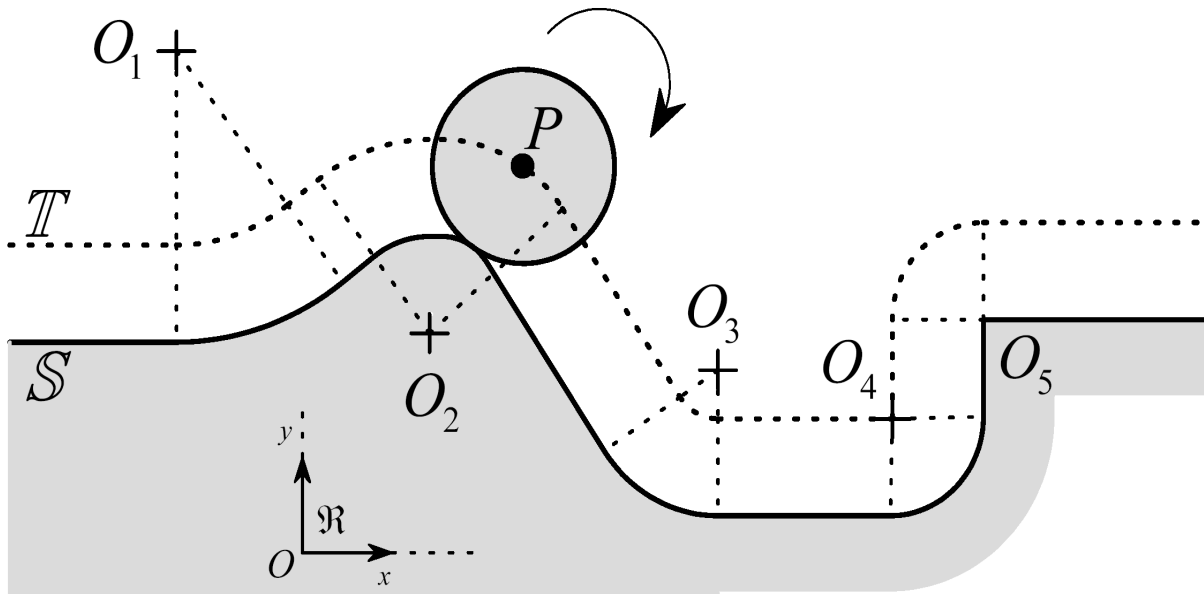


Figure 6.1: Trajectoire d'une roue en contact permanent avec le terrain

Les mécanismes roulants seront modélisés comme un ensemble de corps matériels indéformables interconnectés par des liaisons à 1DDL de type pivot. Les contacts avec le terrain seront de type ponctuel et ne pourront se faire que par l'intermédiaire des roues à raison d'un point de contact par roue. Les cas de la

figure 6.2 où une roue et le sol se touchent en plusieurs points sont géométriquement possibles mais leur étude ne sera pas entreprise dans le cadre de ce travail.

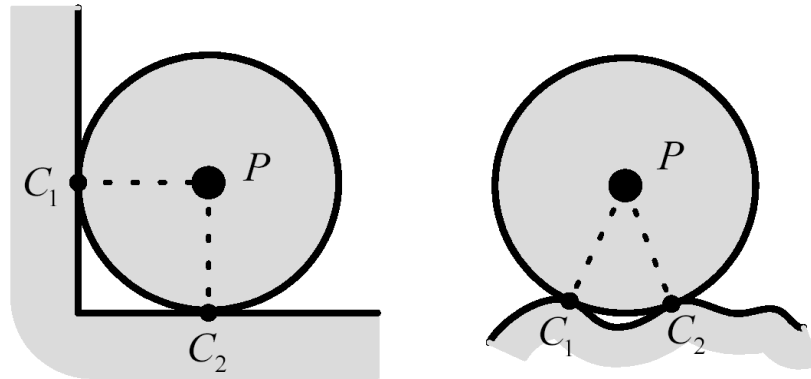


Figure 6.2: La roue et le terrain se touchent en plusieurs points de contact

Les roues seront connectées au reste du mécanisme par l'intermédiaire de pivots P situés en leur centre. La trajectoire \mathbb{T} du centre d'une roue de rayon r qui reste en contact permanent avec le terrain est entièrement définie par la courbe \mathbb{S} décrite par le sol. Selon le côté de la courbe \mathbb{S} où se trouve le centre de courbure, le sol peut être convexe comme pour les points (O_2, O_5) de la figure 6.1 ou concave comme pour les points (O_1, O_3, O_5) de la même figure. Pour chaque point de contact C , les centres de courbure O de \mathbb{T} et de \mathbb{S} sont confondus et il existe une relation qui lie les rayons de courbure ρ_t de \mathbb{T} et ρ_s de \mathbb{S} (figure 6.3).

$$\rho_t - \rho_s = r \quad \text{si } \mathbb{S} \text{ est convexe au point de contact} \quad (6.1)$$

$$\rho_s - \rho_t = r \quad \text{si } \mathbb{S} \text{ est concave au point de contact} \quad (6.2)$$

Le rayon de courbure concave minimum de \mathbb{S} qui garantit l'unicité du point de contact sans interpénétration de la roue et du terrain est égal au rayon de la roue. Dans ce cas, le rayon de courbure de \mathbb{T} est nul. Il n'y a pas de restriction pour le rayon de courbure convexe minimum de \mathbb{S} qui peut même être nul. Dans ce cas extrême, le rayon de courbure de \mathbb{T} est égal au rayon de la roue et le centre de courbure est confondu avec le point de contact. Entre ces deux extrêmes, il existe un cas particulier où le centre de courbure se situe à l'infini. Dans ce cas on dit que le sol est plat.

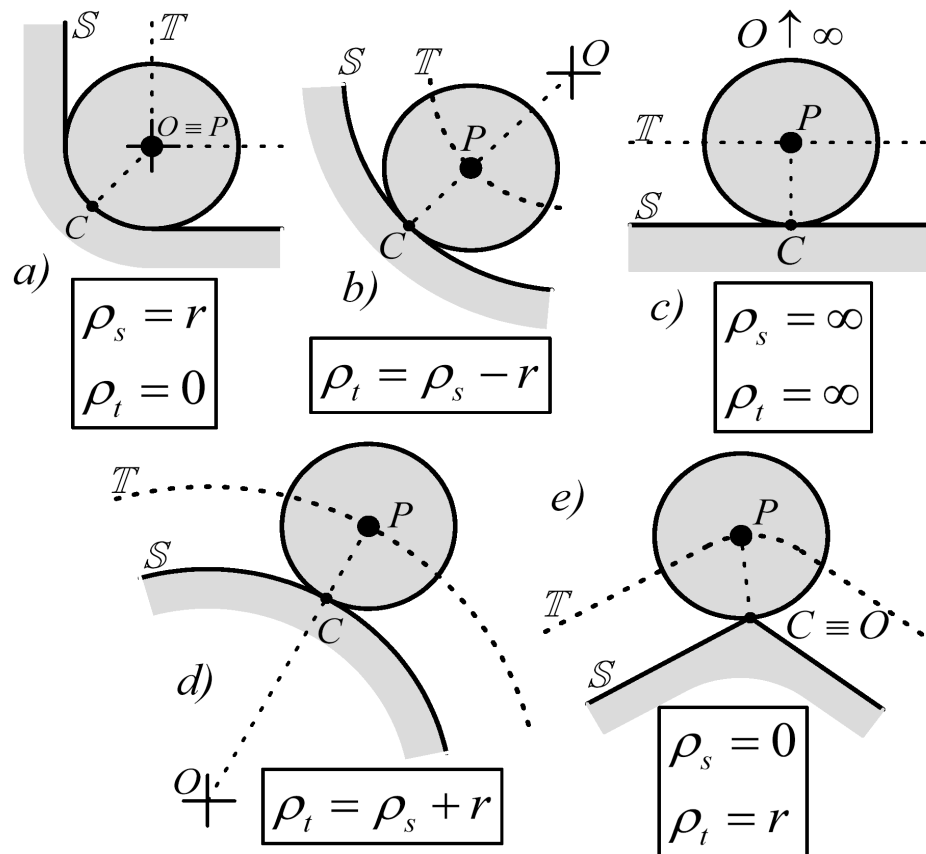


Figure 6.3: Les différents cas de figure du contact roue-sol. (a) Cas limite de concavité du terrain qui garantit l'unicité du point de contact sans interpénétration. (b) Terrain concave (c) Terrain plat (d) Terrain convexe (e) Cas limite de convexité du terrain. La roue pivote autour du point de cassure à courbure nulle.

6.2 Cinématique

6.2.1 Cinématique d'une roue

Nous allons maintenant établir les équations qui régissent le mouvement du centre P d'une roue de rayon r qui roule sans glisser et sans décoller sur un terrain donné.

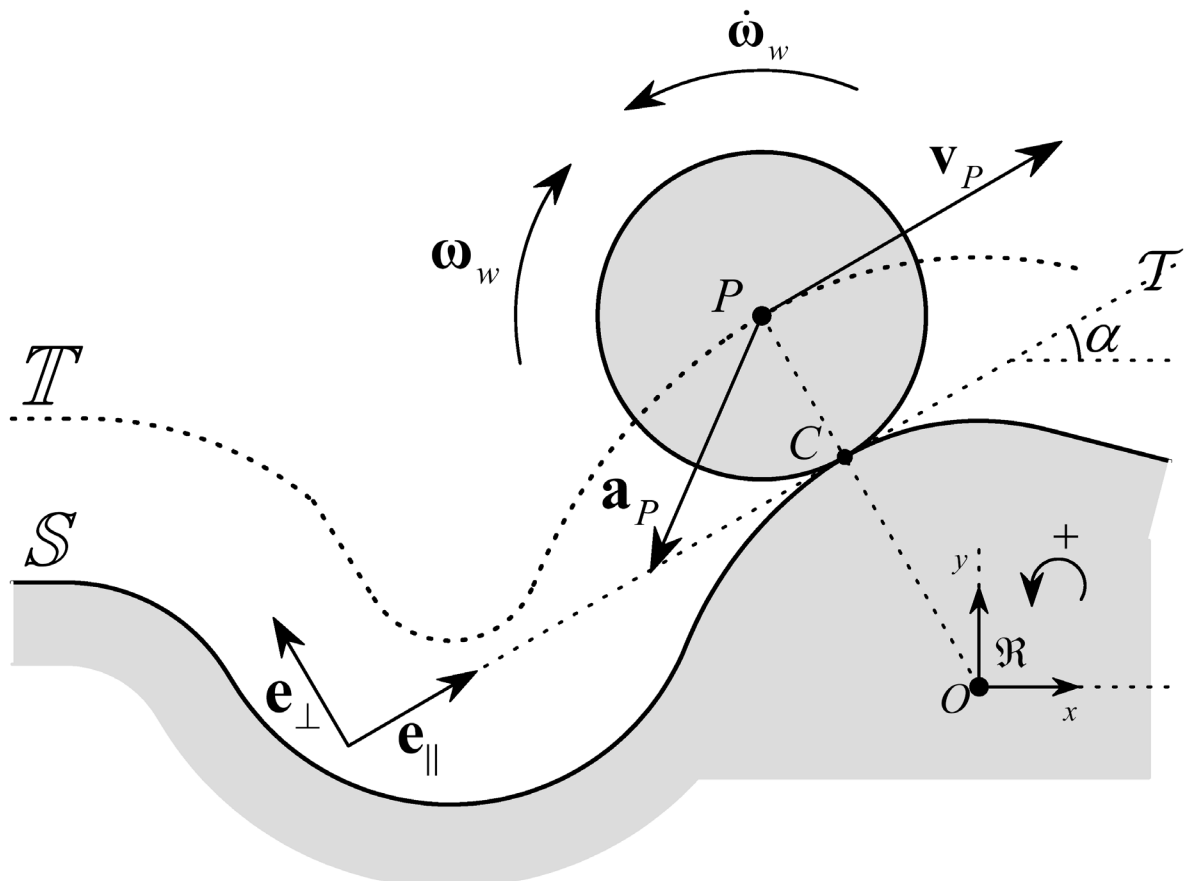


Figure 6.4: Représentation graphique des différentes vitesses, accélérations et trajectoire d'une roue qui reste en contact permanent avec un terrain donné

Pour chaque instant t , la roue et le sol se touchent en un point C . La tangente commune T de S et de la roue forme un angle α avec l'horizontale définie par Ox . Par définition, cet angle est appelé *angle de contact* de la liaison roulante. Associations à T une base orthonormée directe $(\mathbf{e}_{\parallel}, \mathbf{e}_{\perp})$ tel que:

$$\mathbf{e}_{\perp} = \frac{\overrightarrow{CP}}{\|\overrightarrow{CP}\|} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

$$\mathbf{e}_{\parallel} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

La contrainte cinématique de roulement sans glissement et sans décollement est décrite par (6.5) pour les vitesses et par (6.6) pour les accélérations:

$$\mathbf{v}_P = r\omega_w \cdot \mathbf{e}_{\parallel} \quad (6.5)$$

$$\mathbf{a}_P = r\dot{\omega}_w \cdot \mathbf{e}_{\parallel} - \frac{r^2 (\omega_w)^2}{(r + s\rho_s)} \cdot \mathbf{e}_{\perp} \quad (6.6)$$

avec:

- | | |
|--|--|
| \mathbf{v}_P : vitesse du centre de la roue | ω_w : vitesse angulaire de la roue |
| \mathbf{a}_P : accélération du centre de la roue | $\dot{\omega}_w$: accélération angulaire de la roue |
| r : rayon de la roue | ρ_s : rayon de courbure du sol en C |
| $s = l$: pour terrain convexe en C | $s = -l$: pour terrain concave en C |

6.2.2 Cinématique d'un mécanisme roulant 2D

Nous allons maintenant nous intéresser aux équations qui régissent le mouvement d'un mécanisme roulant bi-dimensionnel. Pour ce faire, considérons le véhicule de la figure 6.5. Celui-ci est formé de $w=3$ roues, $b=6$ autres corps rigides et $p=9$ pivots. Si l'on contraint toutes les roues à suivre la courbe S décrite par le sol, ce mécanisme possède 3 degrés de liberté dont 2 sont internes au mécanisme (Section 4.3). Afin de pouvoir décrire la morphologie de ce mécanisme, commençons par numéroter les pivots en partant de ceux qui connectent les roues. Faisons de même pour les corps rigides qui ne sont pas des roues. Dans ce qui va suivre, le centre de masse du i^{eme} corps rigide autre qu'une roue sera dénoté par G_i . Le j^{eme} pivot sera dénoté par P_j . Les pivots, les points de contact, les centres de courbure, les rayons de courbure au sol et les angles de contact de la k^{eme} roue seront dénotés par $P_k, C_k, O_k, s_k\rho_k$ et α_k respectivement avec $s_k=1$ ou -1 si le sol est convexe ou concave en C_k .

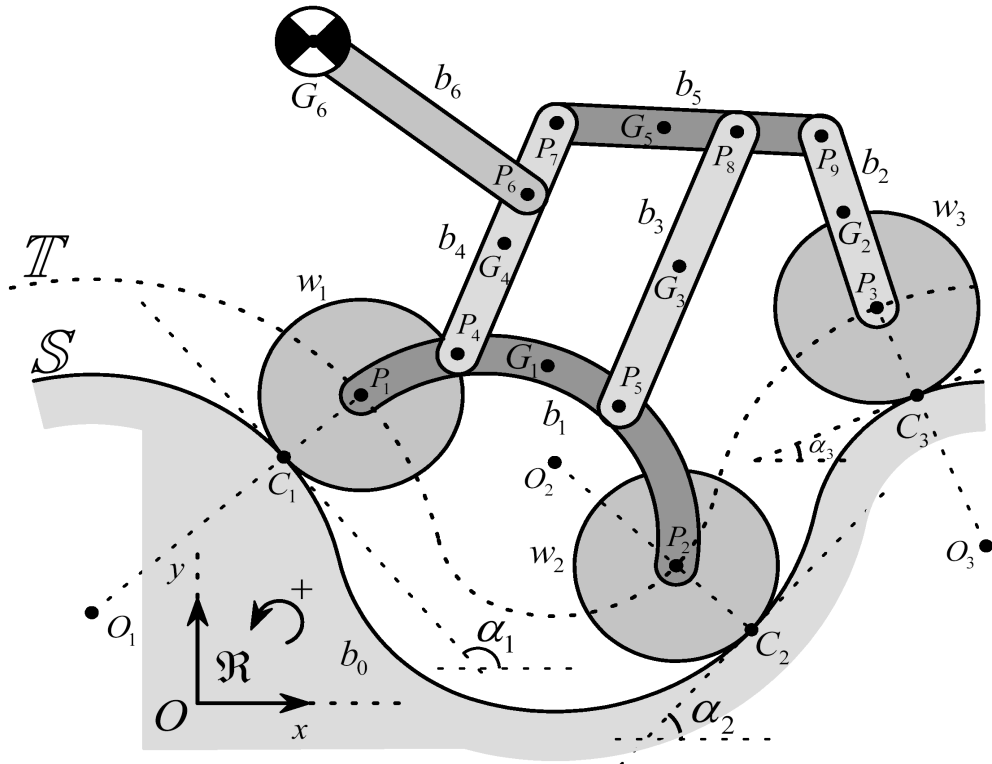


Figure 6.5: Représentation graphique de la morphologie d'un mécanisme roulant 2D

Dans l'exemple de la figure 6.5, la structure morphologique du mécanisme est entièrement définie par les relations suivantes:

$$\left. \begin{array}{l} w = 3 \\ b = 6 \\ p = 9 \\ p(w_1) = \{P_1\} \\ p(w_2) = \{P_2\} \\ p(w_3) = \{P_3\} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} p(b_1) = \{P_1; P_2; P_4; P_5\} \\ p(b_2) = \{P_3; P_9\} \\ p(b_3) = \{P_5; P_8\} \\ p(b_4) = \{P_4; P_6; P_7\} \\ p(b_5) = \{P_7; P_8; P_9\} \\ p(b_6) = \{P_6\} \end{array} \right\} \quad (6.7)$$

Avec $p(b_i/w_k) = \{\cup \text{pivots connectés}\}$ où (b_i/w_k) désigne le $i^{\text{ème}}$ corps où la $k^{\text{ème}}$ roue.

Nous pouvons maintenant poser les équations en commençant par celles qui contraignent les roues et le terrain. Pour chaque roue, nous avons:

$$\mathbf{v}_{P_k} = r\omega_{w_k} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_k \\ \sin \alpha_k \end{pmatrix}, \quad k = 1 \dots w \quad (6.8)$$

$$\mathbf{a}_{P_k} = r\dot{\omega}_{w_k} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_k \\ \sin \alpha_k \end{pmatrix} - \frac{r^2 (\omega_{w_k})^2}{(r + s_k \rho_k)} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \alpha_k \\ \cos \alpha_k \end{pmatrix}, \quad k = 1 \dots w \quad (6.9)$$

Chaque corps qui compose le véhicule est considéré comme un solide indéformable. A chaque instant, son mouvement peut donc être entièrement décrit par la vitesse \mathbf{v}_G et l'accélération \mathbf{a}_G de son centre de masse G ainsi que par sa vitesse angulaire ω et son accélération angulaire $\dot{\omega}$. Tout se passe comme si l'ensemble des points matériels qui composent le corps étaient en train de tourner autour d'un centre instantané de rotation R (figure 6.6). L'ensemble des pivots qui connectent le corps au reste du mécanisme n'échappent pas à cette règle.

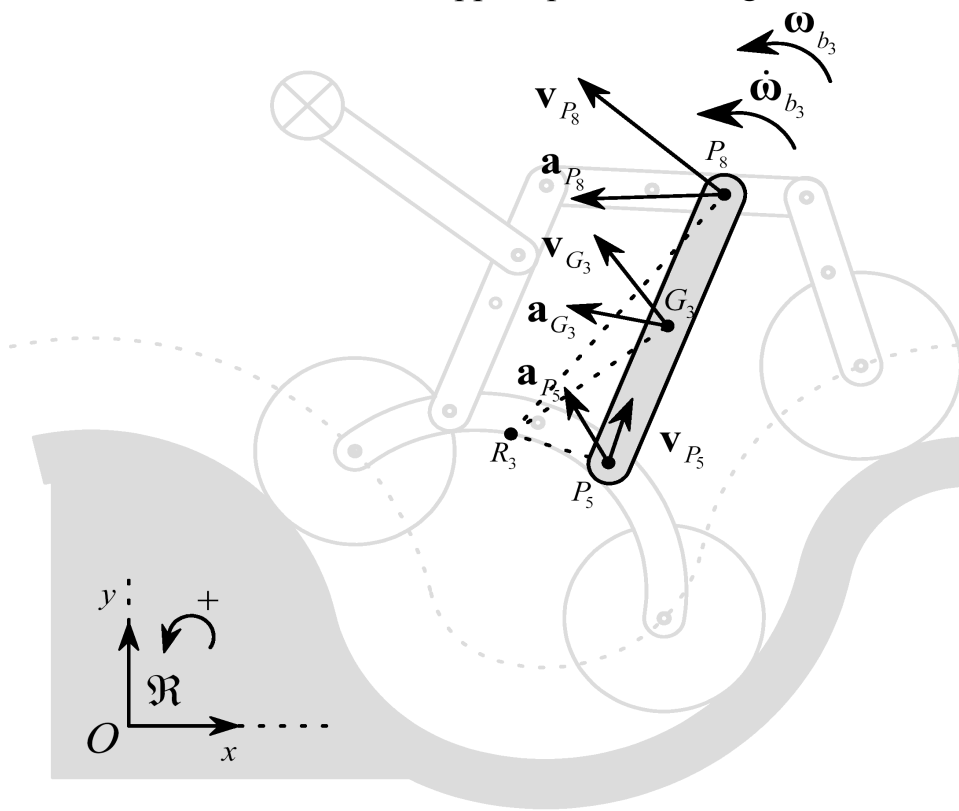


Figure 6.6: Représentation graphique des différentes vitesses, accélérations et centre instantané de rotation pour l'un des corps du mécanisme

Le j^{eme} pivot du i^{eme} corps nous donne les équations de contrainte suivantes [Beer84]:

$$\mathbf{v}_{G_i} - \mathbf{v}_{P_j} = \boldsymbol{\omega}_{b_i} \times \overrightarrow{P_j G_i}, \quad i = 1 \dots b \wedge P_j \in p(b_i) \quad (6.10)$$

$$\mathbf{a}_{G_i} - \mathbf{a}_{P_j} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{b_i} \times \overrightarrow{P_j G_i} - (\omega_{b_i})^2 \cdot \overrightarrow{P_j G_i}, \quad i = 1 \dots b \wedge P_j \in p(b_i) \quad (6.11)$$

Si l'on comptabilise le nombre d'équations pour (6.8) et (6.10), on obtient un total de:

$$e = 4p \quad (6.12)$$

Nous obtenons le même résultat si l'on comptabilise le nombre d'équations pour (6.9) et (6.11). Nous allons maintenant écrire l'ensemble de ces $2e$ équations sous une forme matricielle. Pour ce faire, définissons un vecteur d'état $\mathbf{v}[v \times 1]$ formé par l'ensemble des vitesses des pivots, l'ensemble des vitesses des centres de masse des corps rigides, l'ensemble des vitesses angulaires des roues et l'ensemble des vitesses angulaires des corps rigides:

$$\mathbf{v}_{v \times 1} = \left[\cdots \left(\mathbf{v}_{P_j} \right)^T \cdots \left(\mathbf{v}_{G_i} \right)^T \cdots \omega_{w_k} \cdots \omega_{b_i} \cdots \right]^T \quad (6.13)$$

De même, définissons un vecteur d'état $\mathbf{a}[v \times 1]$ formé par les accélérations des différents pivots et centres de masse ainsi que par les accélérations angulaires des différentes roues et corps rigides.

$$\mathbf{a}_{v \times 1} = \left[\cdots \left(\mathbf{a}_{P_j} \right)^T \cdots \left(\mathbf{a}_{G_i} \right)^T \cdots \dot{\omega}_{w_k} \cdots \dot{\omega}_{b_i} \cdots \right]^T \quad (6.14)$$

Le nombre de variables d'état v qui composent \mathbf{v} et \mathbf{a} est donné par:

$$v = w + 2p + 3b \quad (6.15)$$

Il est maintenant possible d'écrire (6.8) à (6.11) sous forme matricielle en introduisant la matrice $\mathbf{G}[e \times v]$ et le vecteur $\mathbf{c}[e \times 1]$:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (6.16)$$

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{c} \quad (6.17)$$

avec:

$$\mathbf{G} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{I}[2w \times 2w] & \mathbf{0}[2w \times 2(b+p-w)] & \mathbf{T}[2w \times w] & \mathbf{0}[2w \times b] \\ \hline \vdots & \diagdown & \diagdown & \vdots \\ \hline \mathbf{F}^{ij}[2 \times 2p] & \mathbf{G}^{ij}[2 \times 2b] & \mathbf{0}[2 \times w] & \mathbf{H}^{ij}[2 \times b] \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] \left. \vphantom{\begin{array}{c|c|c|c} \mathbf{I}[2w \times 2w] & \mathbf{0}[2w \times 2(b+p-w)] & \mathbf{T}[2w \times w] & \mathbf{0}[2w \times b] \\ \hline \vdots & \diagdown & \diagdown & \vdots \\ \hline \mathbf{F}^{ij}[2 \times 2p] & \mathbf{G}^{ij}[2 \times 2b] & \mathbf{0}[2 \times w] & \mathbf{H}^{ij}[2 \times b] \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array}} \right\} \begin{array}{l} i=1 \dots b \\ p_j \in p(b_i) \end{array} \quad (6.18)$$

$$\mathbf{c}_{ex1} = \left[\frac{r^2(\omega_{wheel_1})^2}{(r+s_1\rho_1)} \begin{bmatrix} \sin\alpha_1 \\ -\cos\alpha_1 \end{bmatrix}^T \quad \dots \quad \frac{r^2(\omega_{wheel_w})^2}{(r+s_w\rho_w)} \begin{bmatrix} \sin\alpha_w \\ -\cos\alpha_w \end{bmatrix}^T \quad \dots \quad \underbrace{-(\omega_{body_i})^2 \cdot [P_j G_i]^T}_{pivot_j \in body_i} \quad \dots \right]^T \quad (6.19)$$

où:

$$\mathbf{T}_{2w \times w} = \begin{bmatrix} -r \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 \\ \sin\alpha_1 \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{2 \times (w-2)} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times (w-2) \times 1} & \ddots & \mathbf{0}_{2 \times (w-2) \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times (w-2)} & -r \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha_w \\ \sin\alpha_w \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

$$\mathbf{F}_{2 \times 2p}^{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2(j-1)} & \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{2 \times 2(p-j)} \end{bmatrix}, \quad i=1 \dots b \wedge P_j \in body_i \quad (6.21)$$

$$\mathbf{G}_{2 \times 2b}^{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2(i-1)} & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{2 \times 2(b-i)} \end{bmatrix}, \quad i=1 \dots b \wedge P_j \in body_i \quad (6.22)$$

$$\mathbf{H}_{2 \times b}^{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times (i-1)} & \begin{bmatrix} -\left(\overline{P_j G_i}\right)_y \\ \left(\overline{P_j G_i}\right)_x \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{2 \times (b-i)} \end{bmatrix}, \quad i=1 \dots b \wedge P_j \in body_i \quad (6.23)$$

Il s'agit de deux systèmes d'équations sous déterminés dont la solution paramétrique générale est donnée par:

$$\mathbf{v}_{v \times 1} = \text{null}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot (\mathbf{p}_v)_{m \times 1} \quad (6.24)$$

$$\mathbf{a}_{v \times 1} = \text{pinv}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot \mathbf{c}_{ex1} + \text{null}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot (\mathbf{p}_a)_{m \times 1} \quad (6.25)$$

ou m représente la mobilité du mécanisme et vaut:

$$m = v - \text{rank}(\mathbf{G}_{exv}) \quad (6.26)$$

Dans la majorité des cas, les e lignes de \mathbf{G} sont indépendantes et l'on a:

$$\text{rank}(\mathbf{G}_{exv}) = e \quad (6.27)$$

$$m = w + 3b - 2p \quad (6.28)$$

L'espace des solutions correspond donc à la mobilité du mécanisme et le mouvement peut être paramétré à chaque instant par les vecteurs $(\mathbf{p}_v)_{m \times 1}$ et $(\mathbf{p}_a)_{m \times 1}$.

Pour les vitesses, le système d'équations étant homogène et sous déterminé, la solution est donnée par l'espace nul ou noyau de $\mathbf{G}_{e \times v}$. Celle-ci dépend des angles de contact des roues avec le terrain, de la posture générale du véhicule et de m paramètres arbitraires. On remarque qu'elle ne dépend pas des courbures de contact des roues avec le terrain. De plus, la solution $\mathbf{0}_{v \times 1}$ est toujours valide et correspond à l'immobilité complète du mécanisme.

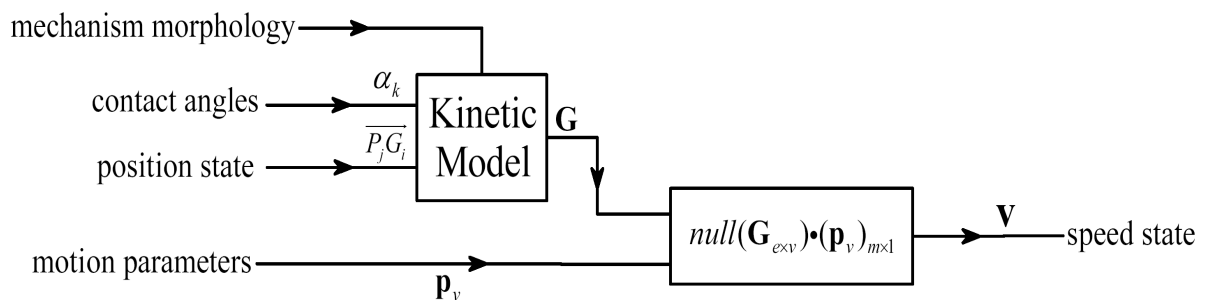


Figure 6.7: Diagramme montrant les paramètres nécessaires pour déterminer l'état de vitesse d'un véhicule roulant 2D

Pour les accélérations, on remarque que la solution générale s'exprime comme étant la somme de deux composantes:

- la solution particulière unique donnée par l'inverse de Penrose-Moore ou Pseudo Inverse. On peut démontrer que c'est la solution qui possède la norme minimale parmi l'ensemble des solutions du système indéterminé. Celle-ci dépend des angles et des courbures de contact des roues avec le terrain, de la posture générale du véhicule et de l'état de vitesse \mathbf{v} à un instant donné.
- la solution du système d'équations homogènes sous déterminé. On remarque qu'elle correspond au même espace de solutions que celui de l'état de vitesse \mathbf{v} . Elle dépend des angles de contact des roues avec le terrain, de la posture générale du véhicule et de m paramètres arbitraires. On remarque qu'elle ne dépend ni des courbures de contact des roues avec le terrain, ni de l'état de vitesse \mathbf{v} .

Il est intéressant de constater que la solution $\mathbf{0}_{v \times 1}$, lorsqu'elle existe pour l'état d'accélération, ne correspond pas forcément à l'immobilité du mécanisme.

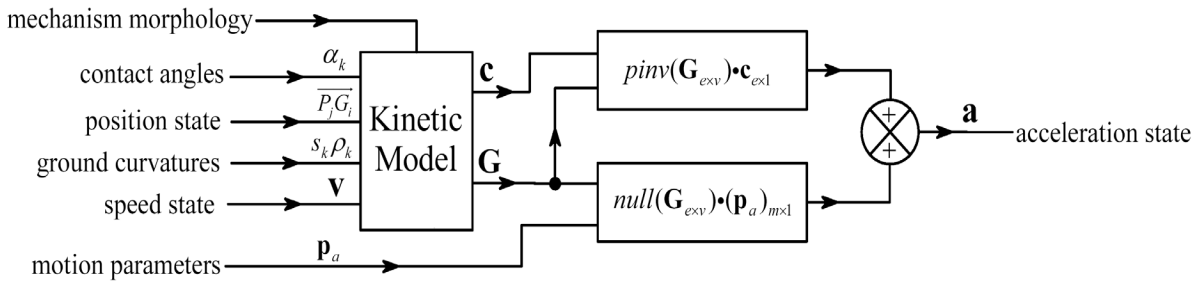


Figure 6.8: Diagramme montrant les paramètres nécessaires pour déterminer l'état d'accélération d'un véhicule roulant 2D

6.2.3 Exemple: cinématique du bi-roue simple

Nous allons maintenant nous intéresser aux équations de mouvement du bi-roue simple.

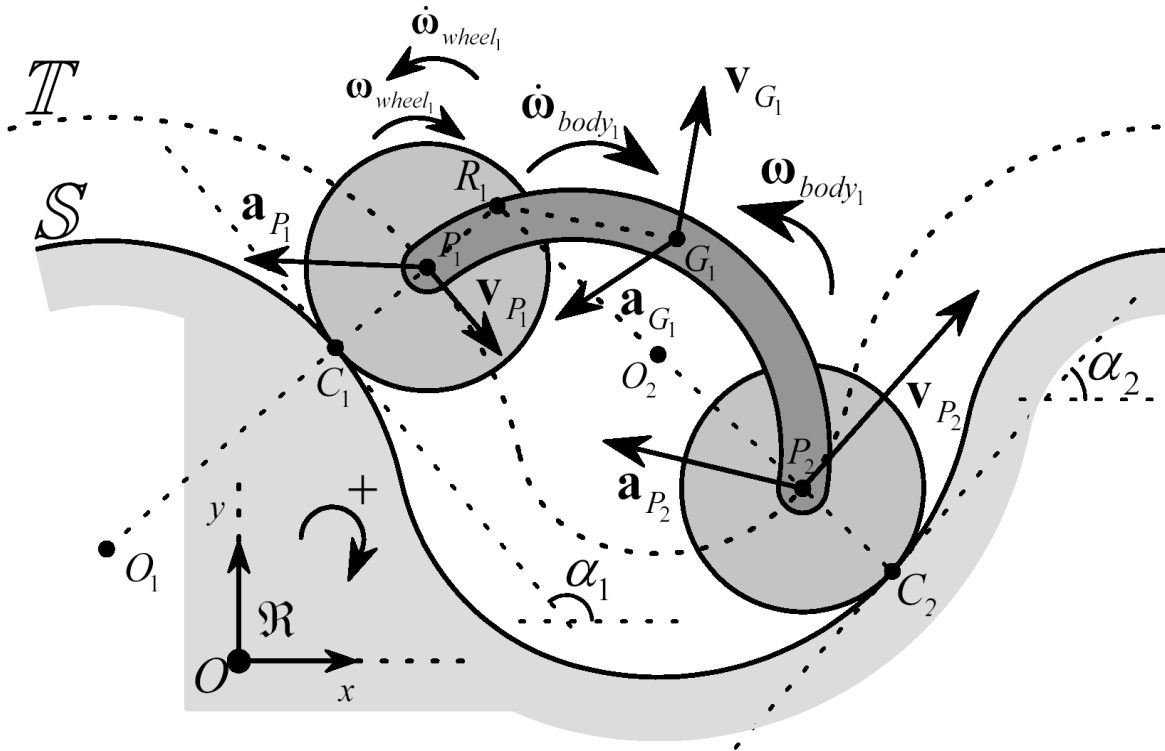


Figure 6.9: Représentation graphique des différentes vitesses et accélérations d'un bi-roue simple

La structure morphologique du mécanisme est entièrement définie par:

$$\left. \begin{array}{l} w = 2 \\ b = 1 \\ p = 2 \\ p(w_1) = \{P_1\} \\ p(w_2) = \{P_2\} \\ p(b_1) = \{P_1; P_2\} \end{array} \right\} \quad (6.29)$$

Chaque roue est contrainte de rouler sans glisser sur le terrain. Les équations (6.3) à (6.6) nous permettent d'écrire:

$$\mathbf{v}_{P_1} = r\omega_{wheel_1} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 \end{pmatrix} \quad (6.30)$$

$$\mathbf{v}_{P_2} = r\omega_{wheel_2} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 \end{pmatrix} \quad (6.31)$$

$$\mathbf{a}_{P_1} = r\dot{\omega}_{wheel_1} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 \end{pmatrix} - \frac{r^2 (\omega_{wheel_1})^2}{(r + s_1 \rho_1)} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_1 \end{pmatrix} \quad (6.32)$$

$$\mathbf{a}_{P_2} = r\dot{\omega}_{wheel_2} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 \end{pmatrix} - \frac{r^2 (\omega_{wheel_2})^2}{(r + s_2 \rho_2)} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \alpha_2 \\ \cos \alpha_2 \end{pmatrix} \quad (6.33)$$

Le corps qui lie les deux roues est modélisé comme un solide indéformable. Ceci nous donne les équations de contrainte suivantes:

$$\mathbf{v}_{G_1} - \mathbf{v}_{P_1} = \boldsymbol{\omega}_{body_1} \times \overrightarrow{P_1 G_1} \quad (6.34)$$

$$\mathbf{v}_{G_1} - \mathbf{v}_{P_2} = \boldsymbol{\omega}_{body_1} \times \overrightarrow{P_2 G_1} \quad (6.35)$$

$$\mathbf{a}_{G_1} - \mathbf{a}_{P_1} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{body_1} \times \overrightarrow{P_1 G_1} - (\omega_{body_1})^2 \cdot \overrightarrow{P_1 G_1} \quad (6.36)$$

$$\mathbf{a}_{G_1} - \mathbf{a}_{P_2} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{body_1} \times \overrightarrow{P_2 G_1} - (\omega_{body_1})^2 \cdot \overrightarrow{P_2 G_1} \quad (6.37)$$

En écrivant ces équations sous forme matricielle, on a pour les vitesses:

$$\mathbf{G}_{8 \times 9} \cdot \mathbf{v}_{9 \times 1} = \mathbf{0}_{8 \times 1} \quad (6.38)$$

avec:

$$\mathbf{G}_{8 \times 9} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r \cos \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r \sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -r \sin \alpha_2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -(\overline{P_1 G_1})_y \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (\overline{P_1 G_1})_x \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -(\overline{P_2 G_1})_y \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & (\overline{P_2 G_1})_x \end{pmatrix} \quad (6.39)$$

$$\mathbf{v}_{9 \times 1} = \left[(\mathbf{v}_{P_1})^T \quad (\mathbf{v}_{P_2})^T \quad (\mathbf{v}_{G_1})^T \quad \omega_{wheel_1} \quad \omega_{wheel_2} \quad \omega_{body_1} \right]^T \quad (6.40)$$

et pour les accélérations:

$$\mathbf{G}_{8 \times 9} \cdot \mathbf{a}_{9 \times 1} = \mathbf{c}_{8 \times 1} \quad (6.41)$$

avec

$$\mathbf{a}_{9 \times 1} = \left[(\mathbf{a}_{P_1})^T \quad (\mathbf{a}_{P_2})^T \quad (\mathbf{a}_{G_1})^T \quad \omega_{wheel_1} \quad \omega_{wheel_2} \quad \omega_{body_1} \right]^T \quad (6.42)$$

$$\mathbf{c}_{8 \times 1} = \left[\frac{r^2 (\omega_{wheel_1})^2}{(r + s_1 \rho_1)} \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 \\ -\cos \alpha_1 \end{bmatrix}^T \quad \frac{r^2 (\omega_{wheel_2})^2}{(r + s_2 \rho_2)} \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha_2 \\ -\cos \alpha_2 \end{bmatrix}^T \quad -(\omega_{body_1})^2 \cdot [\overline{P_1 G_1}]^T \quad -(\omega_{body_1})^2 \cdot [\overline{P_2 G_1}]^T \right]^T \quad (6.43)$$

Les solutions générales de ce système sous-déterminé sont données par:

$$\mathbf{v}_{9 \times 1} = \text{null}(\mathbf{G}_{8 \times 9}) \cdot (\mathbf{p}_v)_{1 \times 1} \quad (6.44)$$

$$\mathbf{a}_{9 \times 1} = \text{pinv}(\mathbf{G}_{8 \times 9}) \cdot \mathbf{c}_{8 \times 1} + \text{null}(\mathbf{G}_{8 \times 9}) \cdot (\mathbf{p}_a)_{1 \times 1} \quad (6.45)$$

Nous avons pu implémenter une simulation interactive de ce modèle en utilisant le logiciel Sysquake (figure 6.10).

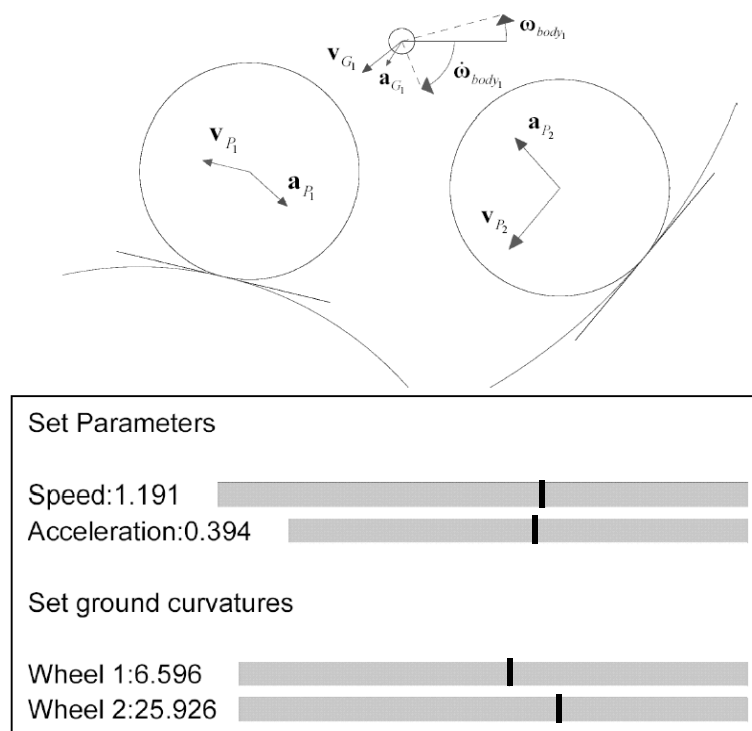


Figure 6.10: Simulation de la cinématique du biroué avec Sysquake. L'interface permet à l'utilisateur de modifier les points de contact, la posture et la position du centre de gravité G directement sur la figure. Des potentiomètres linéaires permettent de modifier les courbures du sol aux points de contact ainsi que les paramètres libres de vitesse et d'accélération. Les vitesses et les accélérations totales des centres des roues et de G sont mises à jour et représentées sur la figure en temps réel.

6.3 Dynamique

6.3.1 Dynamique d'une roue

Nous allons maintenant établir les équations qui régissent les causes du mouvement d'une roue dont le centre de masse se situe au centre de la roue et qui est contrainte de rouler sans glisser et sans décoller sur un terrain donné.

Commençons par énumérer l'ensemble des forces et des couples qui s'exercent sur la roue.

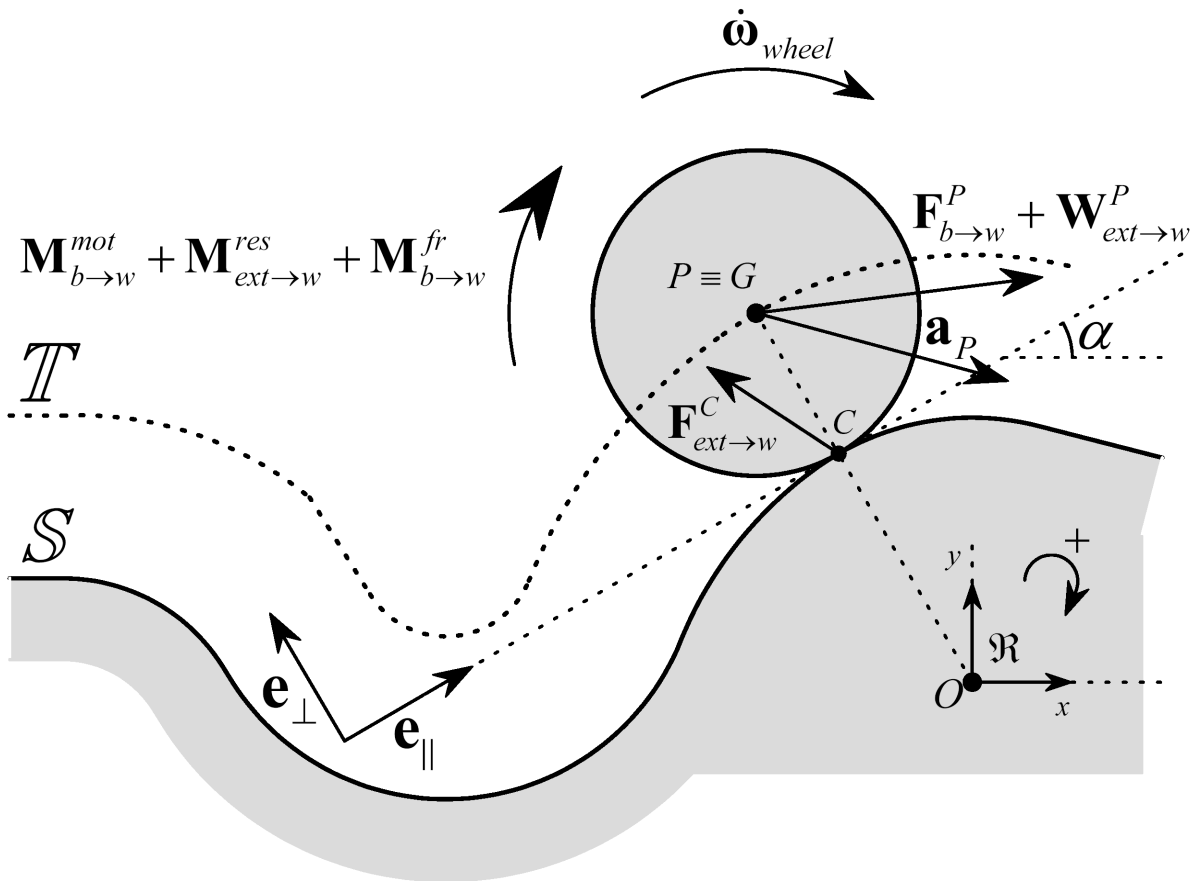


Figure 6.11: Représentation graphique des différentes forces, couples et accélération pour une roue qui reste en contact permanent avec un terrain donné.

point d'application	forces appliquées		forces de liaison	
$P \equiv G$	poids	$\mathbf{W}_{ext \rightarrow w}^P$	pivot	$\mathbf{F}_{b \rightarrow w}^P$
C			contact sol	$\mathbf{F}_{ext \rightarrow w}^C$
couples	motorisation	$\mathbf{M}_{b \rightarrow w}^{mot}$		
	résistance au roulement	$\mathbf{M}_{ext \rightarrow w}^{res}$		
	friction pivot	$\mathbf{M}_{b \rightarrow w}^{fr}$		

Table 6.1: Inventaire des différentes forces et couples agissant sur une roue

Les équations fondamentales de la dynamique appliquées à la roue nous donnent:

$$\mathbf{F}_{b \rightarrow w}^P + \mathbf{W}_{ext \rightarrow w}^P + \mathbf{F}_{ext \rightarrow w}^C = m_w \cdot \mathbf{a}_G = m_w \cdot \mathbf{a}_P \quad (6.46)$$

$$\mathbf{M}_{b \rightarrow w}^{mot} + \mathbf{M}_{ext \rightarrow w}^{res} + \mathbf{M}_{b \rightarrow w}^{fr} + \overrightarrow{PC} \times \mathbf{F}_{ext \rightarrow w}^C = I_w \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_{wheel} \quad (6.47)$$

avec:

\mathbf{a}_P : accélération du centre de la roue $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{wheel}$: accélération angulaire de la roue

m_w : masse de la roue

\mathbf{a}_G : accélération du centre de masse

I_w : moment d'inertie de la roue

6.3.2 Dynamique d'un mécanisme roulant 2D

Nous allons maintenant nous intéresser aux équations qui régissent les causes du mouvement d'un mécanisme roulant bi-dimensionnel. Pour ce faire, reprenons le véhicule de la figure 5.5.

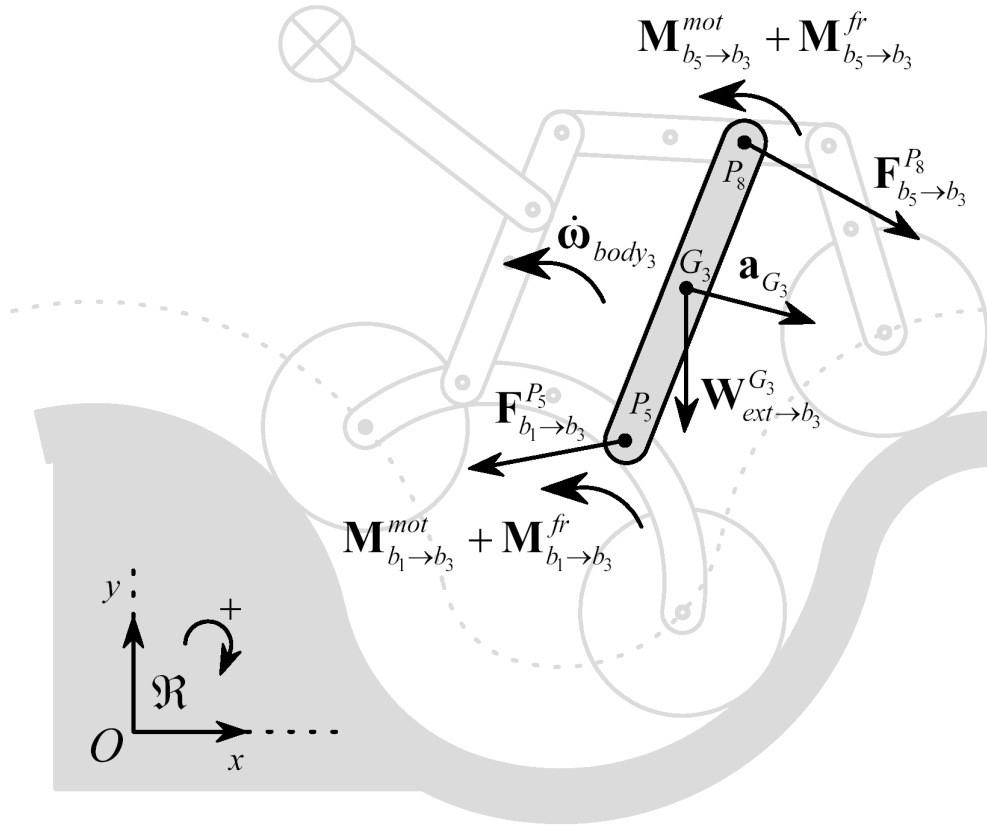


Figure 6.12: Représentation graphique des différentes forces, couples et accélérations pour l'un des corps du mécanisme

Pour une roue w_k connectée à un corps b_i , les lois fondamentales de la dynamique nous permettent d'écrire:

$$\mathbf{F}_{b_i \rightarrow w_k}^{P_k} + \mathbf{W}_{ext \rightarrow w_k}^{P_k} + \mathbf{F}_{ext \rightarrow w_k}^{C_k} = m_{w_k} \cdot \mathbf{a}_{P_k}, \quad k=1 \dots w \wedge P_k \in body_i \quad (6.48)$$

$$\mathbf{M}_{b_i \rightarrow w_k}^{mot} + \mathbf{M}_{ext \rightarrow w_k}^{res} + \mathbf{M}_{b_i \rightarrow w_k}^{fr} + \overline{P_k C_k} \times \mathbf{F}_{ext \rightarrow w_k}^{C_k} = I_{w_k} \cdot \dot{\omega}_{wheel_k}, \quad k=1 \dots w \wedge P_k \in body_i \quad (6.49)$$

Enumérons maintenant l'ensemble des forces et des couples qui s'exercent sur un corps b_i connecté à une roue w_h ou à un corps b_h .

point d'application	forces appliquées	forces de liaison
G_i	poids $\mathbf{W}_{ext \rightarrow b_i}^{G_i}$	
P_j		pivot $\mathbf{F}_{(w/b)_h \rightarrow b_i}^{P_j}$
couples	motorisation $\mathbf{M}_{(w/b)_h \rightarrow b_i}^{mot}$	
	friction pivot $\mathbf{M}_{(w/b)_h \rightarrow b_i}^{fr}$	

Table 6.2: Inventaire des différentes forces et couples agissant sur l'un des corps du mécanisme

Les lois fondamentales de la dynamique s'appliquent pour chaque corps du véhicule. On a:

$$\sum_{P_j=body_i(1)}^{body_i(n)} \mathbf{F}_{(w/b)_h \rightarrow b_i}^{P_j} + \mathbf{W}_{ext \rightarrow b_i}^{G_i} = m_{b_i} \cdot \mathbf{a}_{G_i} \quad , i=1..b \wedge (P_j = (wheel/body)_h \cap body_i) \quad (6.50)$$

$$\sum_{P_j=body_i(1)}^{body_i(n)} \left[(\mathbf{M}^{mot} + \mathbf{M}^{fr})_{(w/b)_h \rightarrow b_i} + \overline{G_i P_j} \times \mathbf{F}_{(w/b)_h \rightarrow b_i}^{P_j} \right] = I_{b_i} \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_{body_i} \quad , i=1..b \wedge (P_j = (wheel/body)_h \cap body_i) \quad (6.51)$$

De plus, la loi d'action-réaction s'applique pour chaque pivot. Cela nous donne:

$$\mathbf{F}_{(w/b)_h \rightarrow (w/b)_i}^{P_j} = -\mathbf{F}_{(w/b)_i \rightarrow (w/b)_h}^{P_j} \quad , j=1..p \wedge (P_j = (wheel/body)_h \cap (wheel/body)_i) \quad (6.52)$$

$$\mathbf{M}_{(w/b)_h \rightarrow (w/b)_i}^{mot} = -\mathbf{M}_{(w/b)_i \rightarrow (w/b)_h}^{mot} \quad , j=1..p \wedge (P_j = (wheel/body)_h \cap (wheel/body)_i) \quad (6.53)$$

avec:

\mathbf{a}_{G_i} : accélération du centre de masse du corps i

$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{body_i}$: accélération angulaire du corps i

m_{b_i} : masse du corps i

I_{b_i} : moment d'inertie du corps i

Si l'on comptabilise les équations (6.48) à (6.53), on obtient:

- 3w équations pour (6.48) et (6.49)

- $3b$ équation pour (6.50) et (6.51)
- $3p$ équation pour (6.52) et (6.53)

Définissons trois vecteurs d'état formés par toutes les forces de liaison des pivots pour chaque corps (6.54), par toutes les forces de contact au sol pour chaque roue (6.55) et par tous les couples de motorisation des pivots pour chaque corps (6.56).

$$\mathbf{f}_{(4p \times 1)}^P = \left[\dots \left(\mathbf{F}_{(w/b)_h \rightarrow (w/b)_i}^P \right)^T \dots \right]^T \quad (6.54)$$

$$\mathbf{f}_{(2w \times 1)}^C = \left[\dots \left(\mathbf{F}_{ext \rightarrow w_k}^C \right)^T \dots \right]^T \quad (6.55)$$

$$\mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot} = \left[\dots \left(\mathbf{M}_{(w/b)_h \rightarrow (w/b)_i}^{mot} \right) \dots \right]^T \quad (6.56)$$

Il est possible de remplacer les $2p$ variables dépendantes de $\mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot}$ par p variables indépendantes $(\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1}$. En écrivant (6.53) sous forme matricielle:

$$\mathbf{R}_{(p \times 2p)}^{mot} \cdot \mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot} = \mathbf{0}_{p \times 1} \quad (6.57)$$

et grâce aux propriétés de l'espace nul, on obtient:

$$\mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot} = \text{null}(\mathbf{R}_{(p \times 2p)}^{mot}) \cdot (\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1} \quad (6.58)$$

Il est possible d'écrire les f équations (6.48) à (6.52) sous forme matricielle:

$$\mathbf{D}_{f \times 4p}^P \cdot \mathbf{f}_{4p \times 1}^P + \mathbf{D}_{f \times 2w}^C \cdot \mathbf{f}_{2w \times 1}^C + \mathbf{D}_{f \times 2p}^{mot} \cdot \mathbf{m}_{2p \times 1}^{mot} + \mathbf{f}_{f \times 1}^0 = \mathbf{M}_{f \times v} \cdot \mathbf{a}_{v \times 1} \quad (6.59)$$

ou plus simplement:

$$\left[\mathbf{D}_{f \times 4p}^P \quad \mathbf{D}_{f \times 2w}^C \right] \cdot \left[\left(\mathbf{f}_{4p \times 1}^P \right)^T \quad \left(\mathbf{f}_{2w \times 1}^C \right)^T \right]^T = \mathbf{M}_{f \times v} \cdot \mathbf{a}_{v \times 1} - \mathbf{f}_{f \times 1}^0 - \mathbf{D}_{f \times 2p}^{mot} \cdot \mathbf{m}_{2p \times 1}^{mot} \quad (6.60)$$

avec

$$f = 3w + 3b + 2p \quad (6.61)$$

où:

$\mathbf{a}_{v \times 1}$: vecteur d'état de l'accélération du système multicorps défini par (6.14)

$\mathbf{M}_{f \times v}$: matrice des masses et des inerties du système multicorps

$\mathbf{f}_{f \times 1}^0$: vecteur d'efforts appliqués indépendants de l'état d'accélération

Les propriétés de l'espace nul nous permettent d'écrire:

$$\left(\text{null} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{f \times 4p}^P & \mathbf{D}_{f \times 2w}^C \end{bmatrix}^T \right)_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{f \times 4p}^P & \mathbf{D}_{f \times 2w}^C \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{(w+3b-2p) \times (4p+2w)} \quad (6.62)$$

Il devient alors possible d'exprimer l'état d'accélération en fonction des couples d'actuation:

$$\left(\text{null} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P & \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \end{bmatrix}^T \right)_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \left(\mathbf{M}_{f \times v} \cdot \mathbf{a}_{v \times 1} - \mathbf{f}_{f \times 1}^0 - \mathbf{D}_{(f \times 2p)}^{mot} \cdot \mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot} \right) = \mathbf{0}_{(w+3b-2p) \times 1} \quad (6.63)$$

Après substitution de $\mathbf{a}_{v \times 1}$ par (6.25) et de $\mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot}$ par (6.58), on obtient:

$$\mathbf{A}_{(w+3b-2p) \times m} \cdot (\mathbf{p}_a)_{m \times 1} + \mathbf{B}_{(w+3b-2p) \times p} \cdot (\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1} = \mathbf{C}_{(w+3b-2p) \times 1} \quad (6.64)$$

avec

$$\mathbf{A}_{(w+3b-2p) \times m} = \left(\text{null} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P & \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \end{bmatrix}^T \right)_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \mathbf{M}_{f \times v} \cdot \text{null}(\mathbf{G}_{exv}) \quad (6.65)$$

$$\mathbf{B}_{(w+3b-2p) \times p} = - \left(\text{null} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P & \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \end{bmatrix}^T \right)_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \mathbf{D}_{(f \times 2p)}^{mot} \cdot \text{null}(\mathbf{R}_{(p \times 2p)}^{mot}) \quad (6.66)$$

$$\mathbf{C}_{(w+3b-2p) \times 1} = \left(\text{null} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P & \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \end{bmatrix}^T \right)_{(w+3b-2p) \times f} \cdot (\mathbf{f}_{f \times 1}^0 - \mathbf{M}_{f \times v} \cdot \text{pinv}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot \mathbf{c}_{ex1}) \quad (6.67)$$

Il s'agit d'un système de $(w+3b-2p)$ équations indépendantes avec $(w+3b-p)$ variables. En d'autres termes, si le système n'est pas dégénéré, la connaissance de p variables suffit pour que le système soit complètement déterminé.

La formulation qui exprime l'état d'accélération $\mathbf{a}_{v \times 1}$ en fonction des couples d'actuation paramétrés par $(\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1}$ est appelé «modèle dynamique direct». A partir de (6.64), on a:

$$(\mathbf{p}_a)_{m \times 1} = \text{pinv}(\mathbf{A}) \cdot (\mathbf{C} - \mathbf{B} \cdot (\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1}) \quad (6.68)$$

et après substitution dans (6.25):

$$\mathbf{a}_{v \times 1} = \text{pinv}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot \mathbf{c}_{ex1} + \text{null}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot \text{pinv}(\mathbf{A}) \cdot (\mathbf{C} - \mathbf{B} \cdot (\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1}) \quad (6.69)$$

Il est intéressant de constater que la connaissance des p couples de motorisation détermine complètement le système.

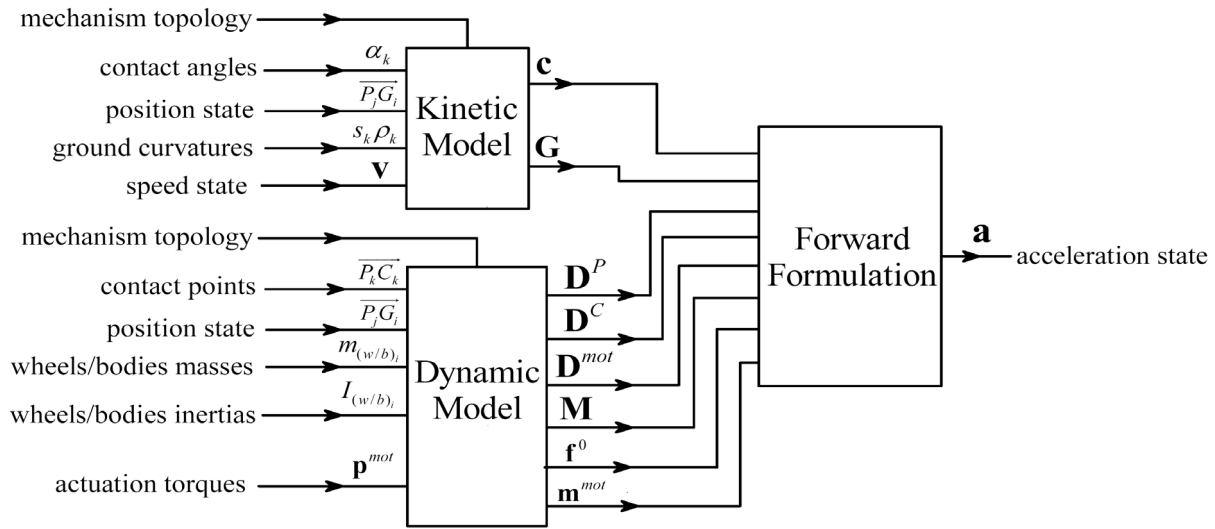


Figure 6.13: Diagramme montrant les paramètres d'entrée et de sortie du modèle dynamique direct d'un mécanisme roulant 2D

D'un autre côté, la formulation qui exprime les couples d'actuation $\mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot}$ nécessaires pour obtenir un état d'accélération donné par $(\mathbf{p}_a)_{m \times 1}$ est appelé «modèle dynamique inverse». A partir de (6.64), on a:

$$(\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1} = \text{pinv}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{C} - \mathbf{A} \cdot (\mathbf{p}_a)_{m \times 1}) + \text{null}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{p}_m)_{(p-m) \times 1} \quad (6.70)$$

et après substitution dans (6.58):

$$\mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot} = \text{null}(\mathbf{R}_{(p \times 2p)}^{mot}) \cdot (\text{pinv}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{C} - \mathbf{A} \cdot (\mathbf{p}_a)_{m \times 1}) + \text{null}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{p}_m)_{(p-m) \times 1}) \quad (6.71)$$

Il est intéressant de constater que dans ce dernier cas de figure, le système est sous déterminé. Il existe donc une infinité de solutions qui peuvent être paramétrées avec $(\mathbf{p}_m)_{(p-m) \times 1}$.

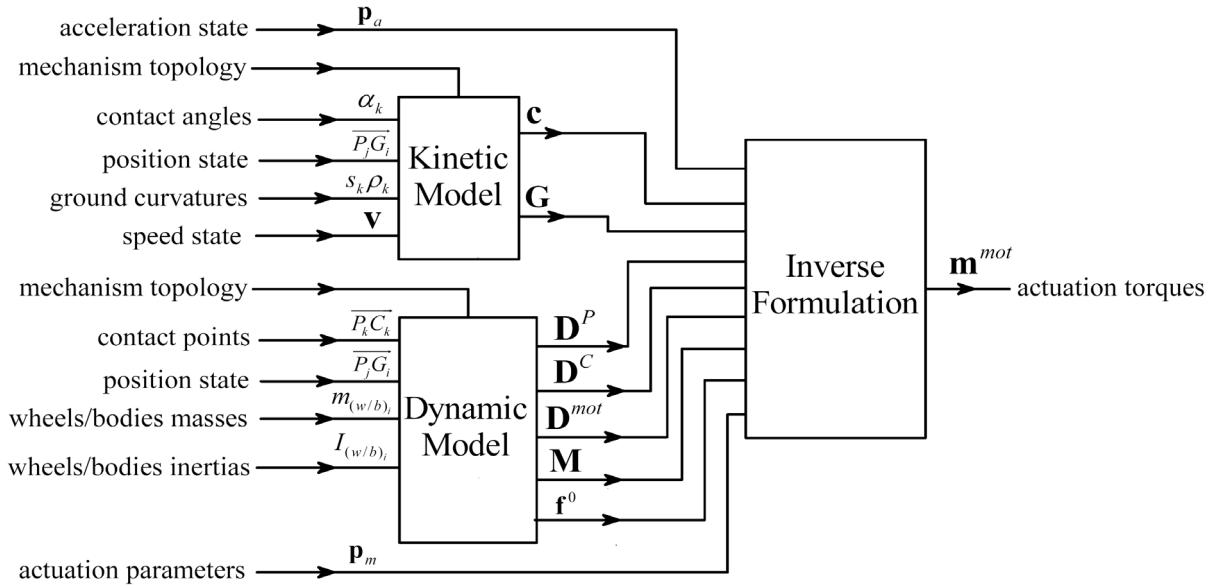


Figure 6.14: Diagramme montrant les paramètres d'entrée et de sortie du modèle dynamique inverse d'un mécanisme roulant 2D

Il est ensuite possible d'exprimer les forces de liaison en fonction des couples de motorisation et de l'état d'accélération. En d'autres termes, les forces de liaison et de contact se calculent de façon univoque en connaissant les couples moteurs et l'état d'accélération.

$$\left[\left(\mathbf{f}_{(4p \times 1)}^P \right)^T \quad \left(\mathbf{f}_{(2w \times 1)}^C \right)^T \right]^T = \text{pinv} \left[\mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P \quad \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \right] \cdot \left(\mathbf{M}_{f \times v} \cdot \mathbf{a}_{v \times 1} - \mathbf{f}_{f \times 1}^0 - \mathbf{D}_{(f \times 2p)}^{\text{mot}} \cdot \mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{\text{mot}} \right) \quad (6.72)$$

6.3.3 Modèle quasi statique d'un mécanisme roulant 2D

Dans le cas d'un mécanisme roulant 2D, on parle de régime quasi statique lorsque les composantes dynamiques des forces présentes dans le système sont négligeables par rapport aux composantes dues à la gravitation et à la motorisation. Dans l'équation (6.64), les composantes dynamiques sont les effets inertiels liés aux deux composantes de l'état d'accélération d'un système multicorps décrites par (6.25):

$$\left(\text{null} \left[\mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P \quad \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \right] \right)^T_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \mathbf{M}_{f \times v} \cdot \text{null}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot (\mathbf{p}_a)_{m \times 1} \quad (6.73)$$

et

$$\left(\text{null} \left[\mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P \quad \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \right] \right)^T_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \mathbf{M}_{f \times v} \cdot \text{pinv}(\mathbf{G}_{exv}) \cdot \mathbf{c}_{e \times 1} \quad (6.74)$$

Si l'on néglige ces deux composantes, l'équation d'équilibre (6.64) prend alors la forme simplifiée.

$$\mathbf{B}_{(w+3b-2p) \times p} \cdot (\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1} = \mathbf{C}_{(w+3b-2p) \times 1} \quad (6.75)$$

avec

$$\mathbf{B}_{(w+3b-2p) \times p} = -\left(\text{null} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P & \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \end{bmatrix}^T \right)_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \mathbf{D}_{(f \times 2p)}^{mot} \cdot \text{null}(\mathbf{R}_{(p \times 2p)}^{mot}) \quad (6.76)$$

$$\mathbf{C}_{(w+3b-2p) \times 1} = \left(\text{null} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P & \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \end{bmatrix}^T \right)_{(w+3b-2p) \times f} \cdot \mathbf{f}_{f \times 1}^0 \quad (6.77)$$

On a alors:

$$(\mathbf{p}^{mot})_{p \times 1} = \text{pinv}(\mathbf{B}) \cdot \mathbf{C} + \text{null}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{p}_m)_{(p-m) \times 1} \quad (6.78)$$

et après substitution dans (6.58):

$$\mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot} = \text{null}(\mathbf{R}_{(p \times 2p)}^{mot}) \cdot (\text{pinv}(\mathbf{B}) \cdot \mathbf{C} + \text{null}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{p}_m)_{(p-m) \times 1}) \quad (6.79)$$

Le modèle quasi statique ne fait donc plus intervenir le modèle cinématique. Les seuls paramètres qui influencent l'équilibre sont les points de contact, la posture générale du véhicule, les masses et $(p-m)$ paramètres arbitraires.

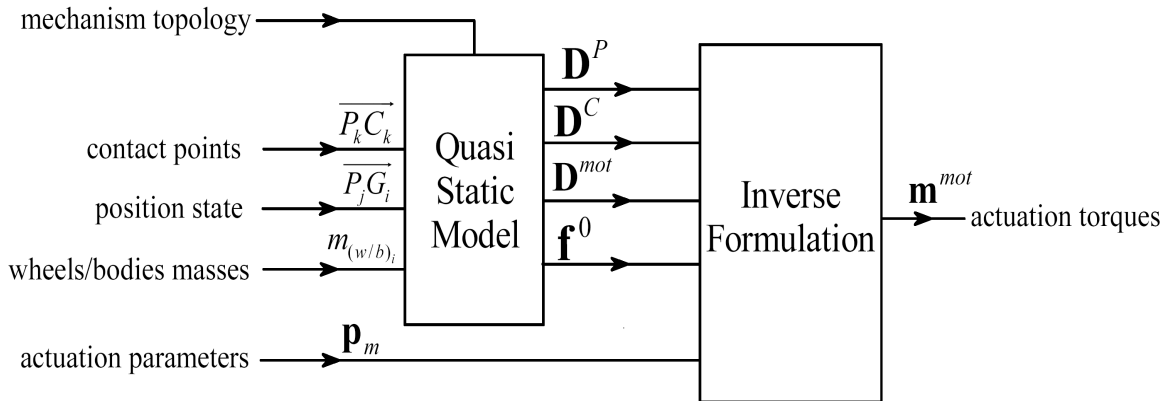


Figure 6.15: Diagramme montrant les paramètres d'entrée et de sortie du modèle quasi-statique d'un mécanisme roulant 2D

On peut déduire les forces de liaison et de contact à partir des couples de motorisation.

$$\left[(\mathbf{f}_{(4p \times 1)}^P)^T \quad (\mathbf{f}_{(2w \times 1)}^C)^T \right]^T = \text{pinv} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{(f \times 4p)}^P & \mathbf{D}_{(f \times 2w)}^C \end{bmatrix} \cdot \left(-\mathbf{f}_{f \times 1}^0 - \mathbf{D}_{(f \times 2p)}^{mot} \cdot \mathbf{m}_{(2p \times 1)}^{mot} \right) \quad (6.80)$$

6.3.4 Exemple: modèle quasi statique du bi-roue simple

Pour illustrer ce qui précède, nous allons établir le modèle quasi statique du bi-roue simple.

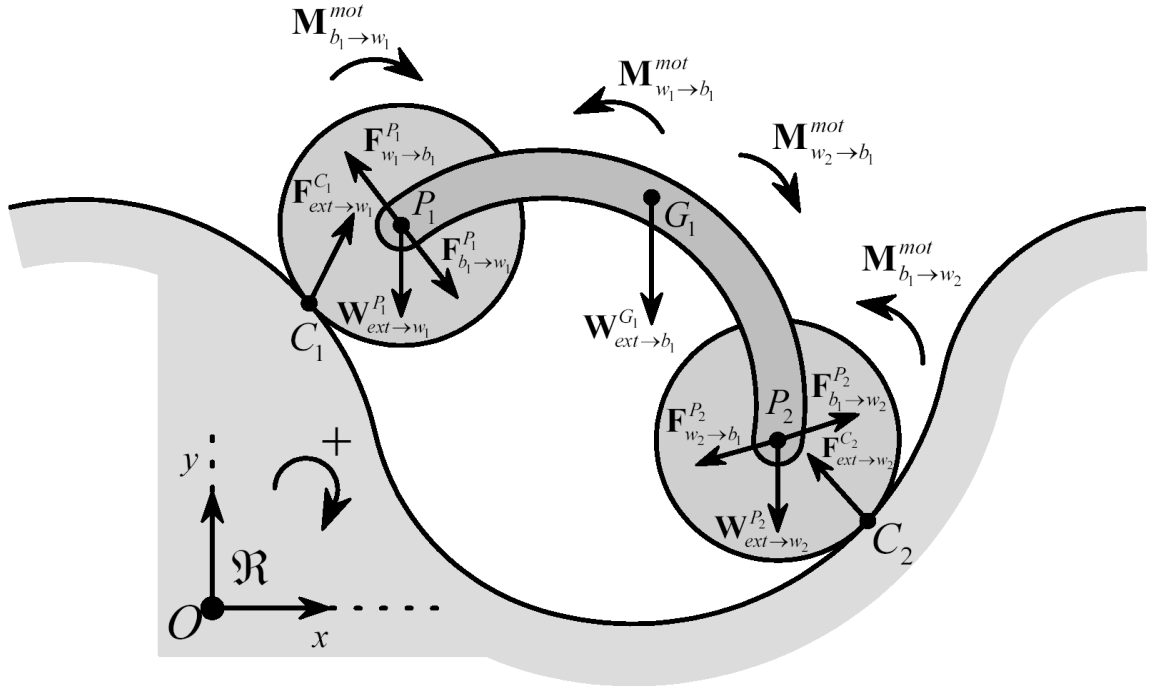


Figure 6.16: Représentation graphique des différentes forces internes et externes agissant sur le bi-roue simple

Pour ce qui va suivre, nous faisons l'hypothèse que les forces de frottement internes aux pivots ainsi que les résistances au roulement sont négligeables.

Pour les roues, les conditions d'équilibre statique nous permettent d'écrire pour la première roue:

$$\mathbf{F}_{b_1 \rightarrow w_1}^{P_1} + \mathbf{W}_{ext \rightarrow w_1}^{P_1} + \mathbf{F}_{ext \rightarrow w_1}^{C_1} = \mathbf{0} \quad (6.81)$$

$$\mathbf{M}_{b_1 \rightarrow w_1}^{mot} + \overline{P_1 C_1} \times \mathbf{F}_{ext \rightarrow w_1}^{C_1} = \mathbf{0} \quad (6.82)$$

et pour la deuxième roue:

$$\mathbf{F}_{b_1 \rightarrow w_2}^{P_2} + \mathbf{W}_{ext \rightarrow w_2}^{P_2} + \mathbf{F}_{ext \rightarrow w_2}^{C_2} = \mathbf{0} \quad (6.83)$$

$$\mathbf{M}_{b_1 \rightarrow w_2}^{mot} + \overline{P_2 C_2} \times \mathbf{F}_{ext \rightarrow w_2}^{C_2} = \mathbf{0} \quad (6.84)$$

De même, l'équilibre statique du corps donne:

$$\mathbf{F}_{w_1 \rightarrow b_1}^{P_1} + \mathbf{F}_{w_2 \rightarrow b_1}^{P_2} + \mathbf{W}_{ext \rightarrow b_1}^{G_1} = \mathbf{0} \quad (6.85)$$

$$\overline{G_1 P_1} \times \mathbf{F}_{w_1 \rightarrow b_1}^{P_1} + \overline{G_1 P_2} \times \mathbf{F}_{w_2 \rightarrow b_1}^{P_2} = \mathbf{0} \quad (6.86)$$

De plus, la loi d'action-réaction s'applique pour chaque pivot. Cela nous donne:

$$\mathbf{F}_{w_1 \rightarrow b_1}^{P_1} = -\mathbf{F}_{b_1 \rightarrow w_1}^{P_1} \quad (6.87)$$

$$\mathbf{F}_{w_2 \rightarrow b_1}^{P_2} = -\mathbf{F}_{b_1 \rightarrow w_2}^{P_2} \quad (6.88)$$

et

$$\mathbf{M}_{w_1 \rightarrow b_1}^{mot} = -\mathbf{M}_{b_1 \rightarrow w_1}^{mot} \quad (6.89)$$

$$\mathbf{M}_{w_2 \rightarrow b_1}^{mot} = -\mathbf{M}_{b_1 \rightarrow w_2}^{mot} \quad (6.90)$$

Si l'on comptabilise les équations (6.81) à (6.90), on obtient:

- 6 équations pour (6.81) à (6.84)
- 3 équation pour (6.85) et (6.86)
- 6 équation pour (6.87) à (6.90)

Définissons trois vecteurs d'état formés par toutes les forces de liaison des pivots pour chaque corps (6.91), par toutes les forces de contact au sol pour chaque roue (6.92) et par tous les couples de motorisation des pivots pour chaque corps (6.93).

$$\mathbf{f}_{8 \times 1}^P = \left[\left(\mathbf{F}_{w_1 \rightarrow b_1}^{P_1} \right)^T \quad \left(\mathbf{F}_{b_1 \rightarrow w_1}^{P_1} \right)^T \quad \left(\mathbf{F}_{w_2 \rightarrow b_1}^{P_2} \right)^T \quad \left(\mathbf{F}_{b_1 \rightarrow w_2}^{P_2} \right)^T \right]^T \quad (6.91)$$

$$\mathbf{f}_{4 \times 1}^C = \left[\left(\mathbf{F}_{ext \rightarrow w_1}^{C_1} \right)^T \quad \left(\mathbf{F}_{ext \rightarrow w_2}^{C_2} \right)^T \right]^T \quad (6.92)$$

$$\mathbf{m}_{4 \times 1}^{mot} = \left[\left(\mathbf{M}_{w_1 \rightarrow b_1}^{mot} \right) \quad \left(\mathbf{M}_{b_1 \rightarrow w_1}^{mot} \right) \quad \left(\mathbf{M}_{w_2 \rightarrow b_1}^{mot} \right) \quad \left(\mathbf{M}_{b_1 \rightarrow w_2}^{mot} \right) \right]^T \quad (6.93)$$

Il est possible de remplacer les 4 variables dépendantes de $\mathbf{m}_{4 \times 1}^{mot}$ par 2 variables indépendantes $(\mathbf{p}^{mot})_{2 \times 1}$. En écrivant (6.89) et (6.90) sous forme matricielle:

$$\mathbf{R}_{2 \times 4}^{mot} \cdot \mathbf{m}_{4 \times 1}^{mot} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (6.94)$$

avec

$$\mathbf{R}_{2 \times 4}^{mot} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.95)$$

et grâce aux propriétés de l'espace nul, on obtient:

$$\mathbf{f}_{13 \times 1}^0 = \left[\left(\mathbf{W}_{ext \rightarrow w_1}^{P_1} \right)^T \quad 0 \quad \left(\mathbf{W}_{ext \rightarrow w_2}^{P_2} \right)^T \quad 0 \quad \left(\mathbf{W}_{ext \rightarrow b_1}^{G_1} \right)^T \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T \quad (6.103)$$

Après substitution de $\mathbf{m}_{4 \times 1}^{mot}$ par (6.96), on obtient:

$$\mathbf{B}_{1 \times 2} \cdot (\mathbf{p}^{mot})_{2 \times 1} = \mathbf{C}_{1 \times 1} \quad (6.104)$$

avec:

$$\mathbf{B}_{1 \times 2} = - \left(\text{null} \left[\mathbf{D}_{(13 \times 8)}^P \quad \mathbf{D}_{(13 \times 4)}^C \right]^T \right)_{1 \times 13} \cdot \mathbf{D}_{(13 \times 4)}^{mot} \cdot \text{null}(\mathbf{R}_{(2 \times 4)}^{mot}) \quad (6.105)$$

$$\mathbf{C}_{1 \times 1} = \left(\text{null} \left[\mathbf{D}_{(13 \times 8)}^P \quad \mathbf{D}_{(13 \times 4)}^C \right]^T \right)_{1 \times 13} \cdot \mathbf{f}_{13 \times 1}^0 \quad (6.106)$$

On a alors:

$$(\mathbf{p}^{mot})_{2 \times 1} = \text{pinv}(\mathbf{B}) \cdot \mathbf{C} + \text{null}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{p}_m)_{1 \times 1} \quad (6.107)$$

et après substitution dans (6.96):

$$\mathbf{m}_{4 \times 1}^{mot} = \text{null}(\mathbf{R}_{(2 \times 4)}^{mot}) \cdot (\text{pinv}(\mathbf{B}) \cdot \mathbf{C} + \text{null}(\mathbf{B}) \cdot (\mathbf{p}_m)_{1 \times 1}) \quad (6.108)$$

Le système est donc sous-déterminé et l'espace des solutions pour les couples de motorisation garantissant un équilibre statique est une droite de l'espace à 4 dimensions.

On peut déduire les forces de liaison et de contact à partir des couples de motorisation.

$$\left[\left(\mathbf{f}_{8 \times 1}^P \right)^T \quad \left(\mathbf{f}_{4 \times 1}^C \right)^T \right]^T = \text{pinv} \left[\mathbf{D}_{(13 \times 8)}^P \quad \mathbf{D}_{(13 \times 4)}^C \right] \cdot \left(-\mathbf{f}_{13 \times 1}^0 - \mathbf{D}_{(13 \times 4)}^{mot} \cdot \mathbf{m}_{4 \times 1}^{mot} \right) \quad (6.109)$$

Nous avons pu implémenter une simulation interactive de ce modèle en utilisant le logiciel Sysquake (figure 6.17).

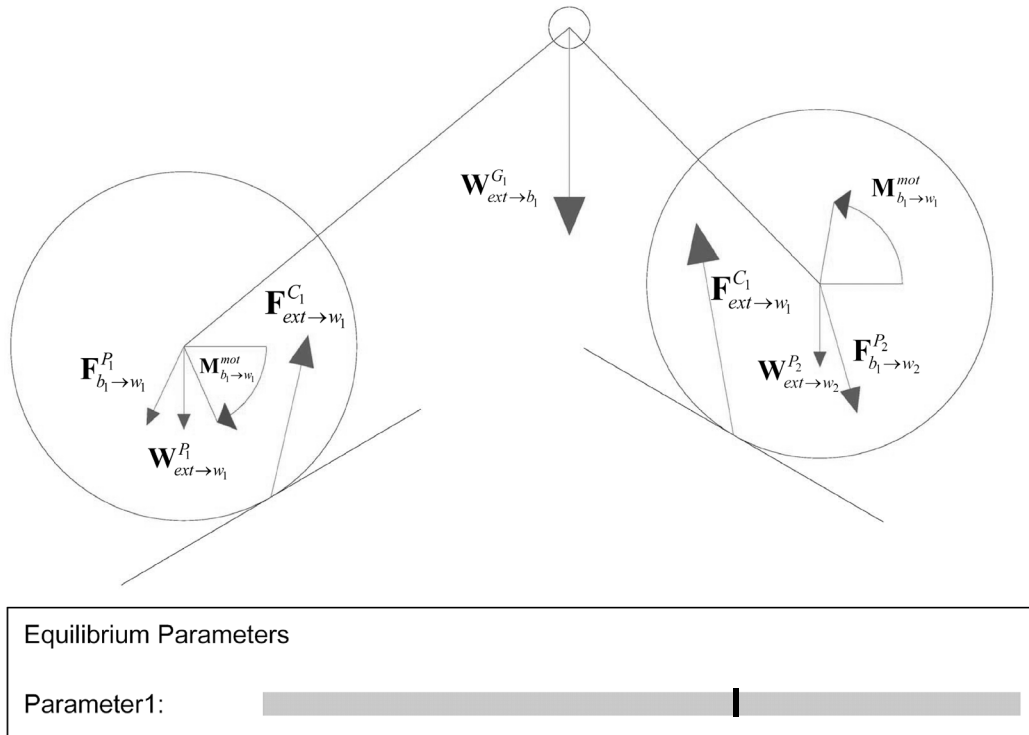


Figure 6.17: Simulation statique du biroué avec Sysquake. L'interface permet à l'utilisateur de modifier les points de contact, la posture et la position du centre de gravité G directement sur la figure. Un potentiomètre linéaire permet de modifier le paramètre libre qui déterminera la solution d'équilibre. Les forces et les couples qui agissent sur les roues sont mises à jour et représentées sur la figure en temps réel.

7

Résultats

Dans ce chapitre, nous allons présenter les prototypes réalisés ainsi que les résultats expérimentaux obtenus. Nous procéderons par ordre chronologique en commençant par décrire le projet qui a suscité l'envie de commencer cette thèse. Nous décrirons ensuite, les uns après les autres, les différents prototypes réalisés. Nous terminerons par la présentation d'un robot, dont la conception et la réalisation nous a occupé durant une grande partie du temps, et qui synthétise tout ce qui a été fait dans le cadre de ce travail.

7.1 Robot *Space Cat*

Dans le cadre d'un projet de recherche technologique (TRP) pour l'Agence Spatiale Européenne (ESA), une équipe formée de plusieurs entreprises et universités, dont l'EPFL faisait partie, fut mandatée en 1996 pour étudier, développer et valider de nouveaux concepts de robots mobiles pour l'exploration de la planète Mars. Le scénario de mission proposait l'utilisation d'un véhicule télé opéré depuis la terre transportant des instruments scientifiques pour l'analyse du terrain martien situé à proximité du site d'atterrissage (figure 7.1).

Voici une liste des principales spécifications du robot:

- dimensions (cm): 30x20x20
- masse: 2kg (robot) + 2kg (instruments embarqués)
- alimentation électrique par câble depuis le module d'atterrissage: 2 Watt
- hauteur maximale des obstacles surmontables: 10 cm
- possibilité de positionner précisément les instruments embarqués
- vitesse maximale: 5 m/h

Dans un premier temps, différents concepts de locomotion ont été imaginés et seulement deux furent retenus afin d'être validés expérimentalement. Il s'est avéré

que le concept proposé conjointement par l'EPFL et l'entreprise MECANEX fut retenu et un prototype réalisé. *Space Cat* est le nom qui a été donné au robot à cause de son agilité dans les terrains caillouteux. Deux groupes de trois roues motorisées sont montés en triangle sur deux supports pouvant pivoter l'un par rapport à l'autre. Cette configuration originale permet au robot de rouler lorsque le terrain est plat et de marcher en faisant pivoter les triangles lorsque le terrain devient irrégulier. Les instruments de mesure sont fixés sur un support rotatif ce qui permet un positionnement précis de ces derniers (figure 7.2).

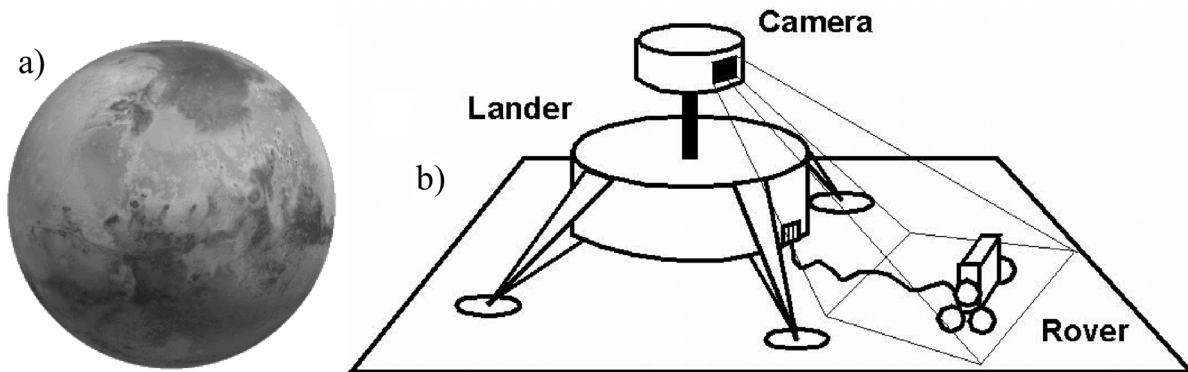


Figure 7.1: (a) L'exploration de la planète Mars par des missions habitées n'est pas envisageable avant 2030. (b) Les scénarios de mission actuels utilisent tous des robots pour explorer le terrain situé à proximité du site d'atterrissage.

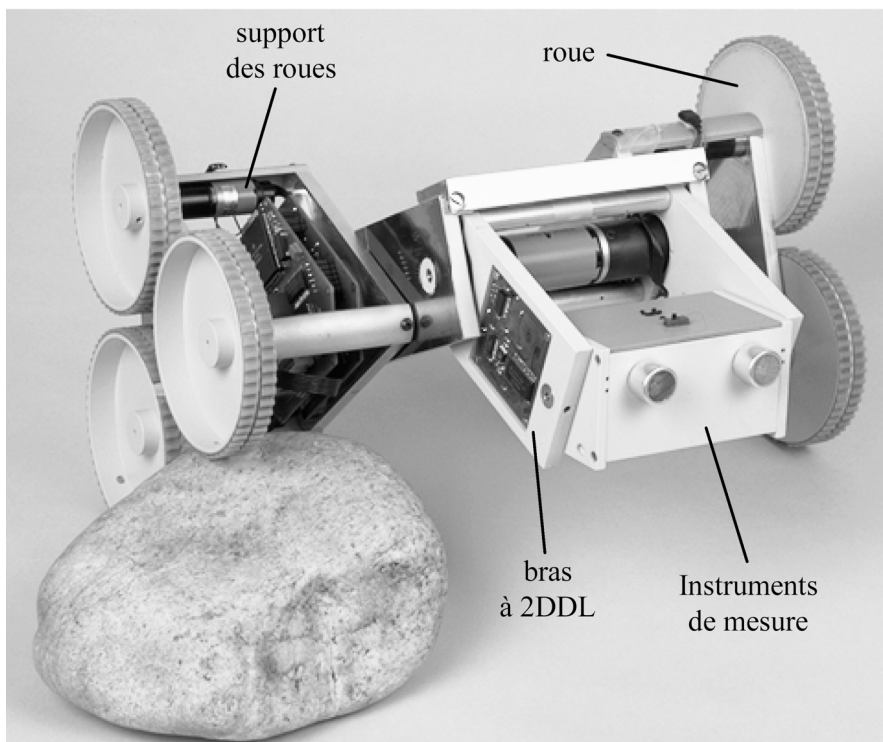


Figure 7.2: Robot *Space Cat* proposé par l'EPFL et MECANEX dans le cadre du projet ROSA (Robot for Space Applications) mandaté par l'Agence Spatiale Européenne (ESA)

La montée d'une marche se fait de façon active en déplaçant le centre de gravité vers l'avant et en faisant pivoter les supports de roues (figure 7.3 a). Pour la rotation, les roues n'étant pas orientables les unes par rapport aux autres, le dérapage latéral est inévitable. Cependant, il est possible de limiter la résistance au mouvement en choisissant de façon adéquate la disposition géométrique relative des points de contact ainsi que la position du centre de masse (figure 7.3 b).

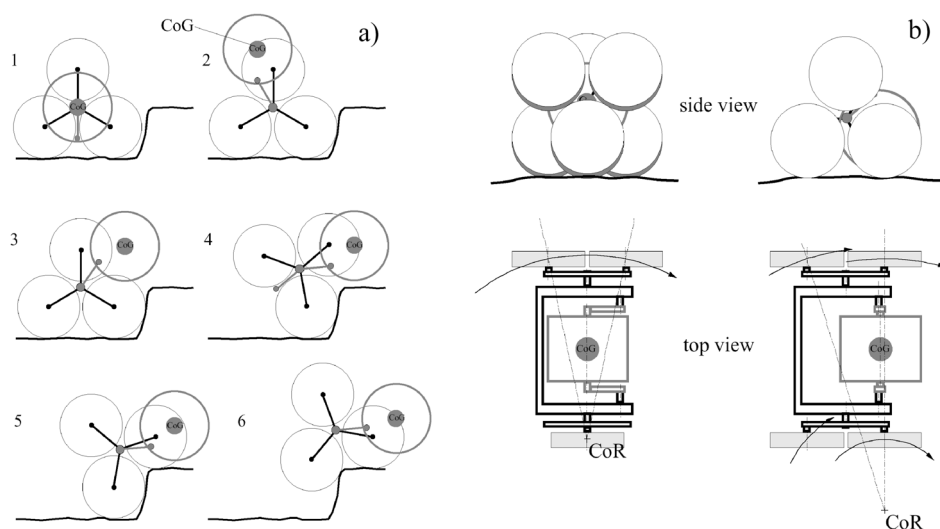


Figure 7.3: (a) franchissement d'une marche avec *Space Cat* (b) rotation du robot en mode différentiel par dérapage avec 3 ou 4 points de contact avec le sol

Des tests ont été effectués sur un terrain caillouteux afin de valider le concept théorique de franchissement actif (figure 7.4).

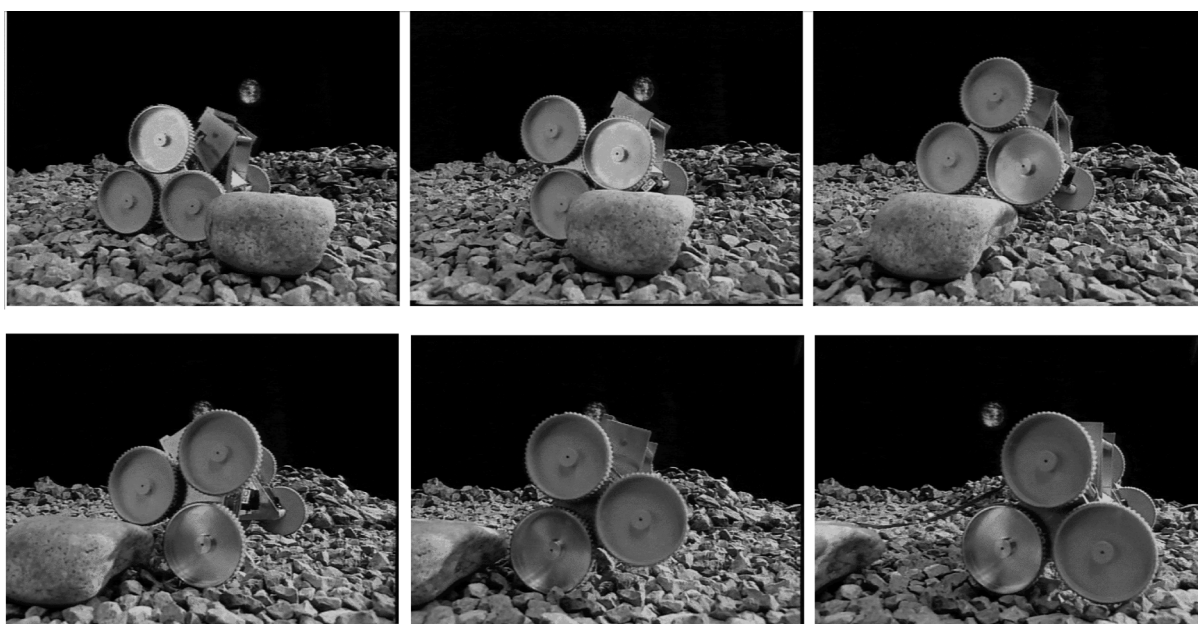


Figure 7.4: franchissement actif télécommandé d'un caillou avec le robot. Il est intéressant d'observer le va-et-vient du bras central qui permet le déplacement du centre de masse

La distance qui sépare la Terre de la planète Mars n'est pas négligeable même pour des signaux qui voyagent à la vitesse de la lumière. Il n'est pas possible de télécommander «à vue» depuis la terre un robot situé sur Mars en utilisant une caméra embarquée sur le module d'atterrissage. En effet, les délais de transmission sont de l'ordre de plusieurs minutes. Trois boucles de contrôle imbriquées sont nécessaires (figure 7.5):

- la boucle de contrôle locale qui contient des organes de perception et de décision embarqués sur le robot lui permettant de s'adapter aux irrégularités du terrain de façon autonome tout en essayant de diminuer les risques de blocage irréversibles
- la boucle de contrôle globale qui contient des organes de perception et de décision embarqués sur le module d'atterrissage permettant au robot de suivre une trajectoire donnée
- la boucle de contrôle globale depuis la terre ou des opérateurs humains choisissent la destination et la trajectoire à suivre

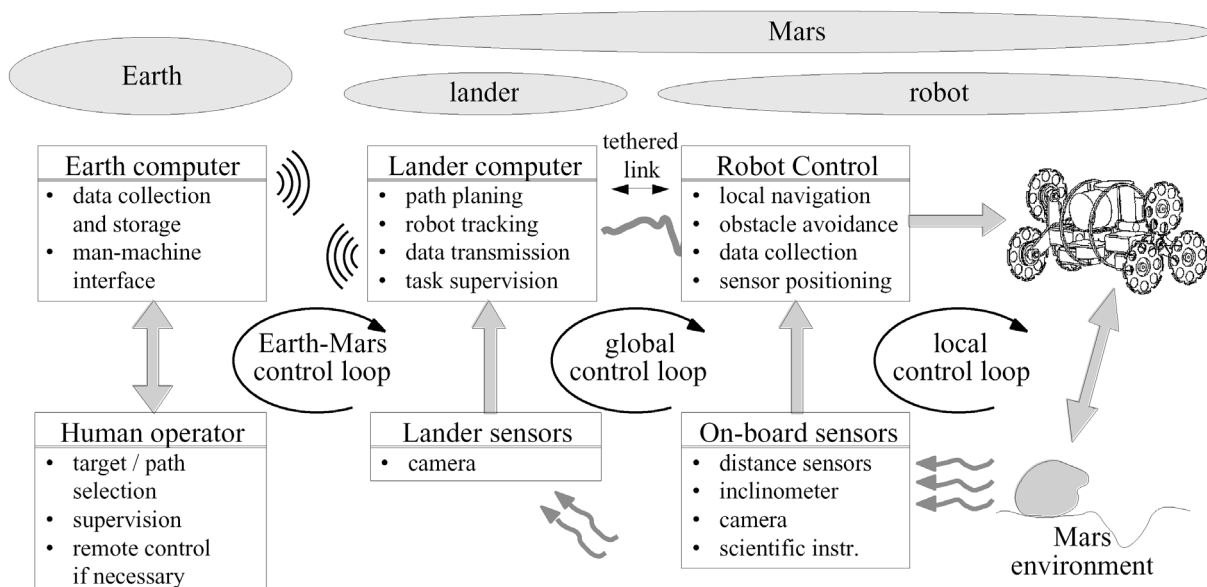


Figure 7.5: Les trois boucles de réglage d'un robot d'exploration martienne téléopéré depuis la terre

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé une interface permettant au robot d'être téléopéré à vue par un humain (figure 7.6). Nous avons également développé un système de commande automatique de la trajectoire du robot à travers une caméra vidéo [Conti98].

Ce projet a fait l'objet de deux publications écrites [Lauria98], [Siegwart98] et d'une publication vidéo [Lauria99]. Il existe également un rapport résumé de tout le projet ROSA [Bertrand99].

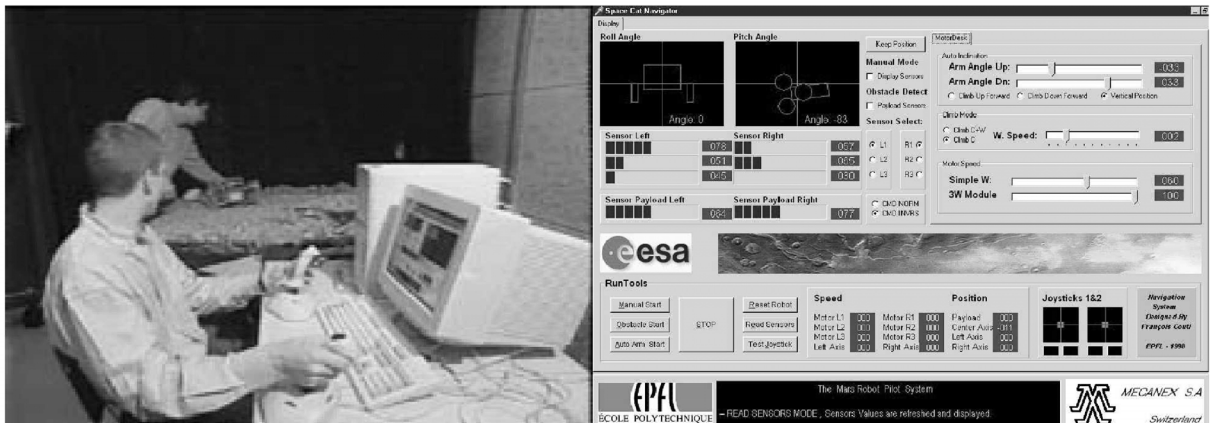


Figure 7.6: téléopération du robot grâce à l'interface développée et deux Joysticks



Figure 7.7: interface de commande automatique de la trajectoire de Space Cat à travers une caméra vidéo

Concernant les robots à suspension active, ce projet nous a permis de constater les points suivants:

- ils ont un grand potentiel de franchissement
- ils sont difficiles à téléopérer manuellement vu le grand nombre de degrés de liberté à contrôler
- pour chaque degré de liberté actif, il faut intégrer un moteur et sa commande dans le mécanisme de locomotion

Le franchissement automatique d'obstacles avec les mécanismes roulants à suspension active pourrait être possible à condition d'intégrer dans le mécanisme des organes de perception du terrain. C'est la poursuite de cet objectif qui a motivé la suite de notre travail dans ce domaine.

7.2 Roue Tactile pour robots mobiles tout-terrain

Plusieurs techniques permettent de mesurer la forme du terrain dans lequel se déplace un robot (figure 7.8). Chez l'homme, les deux sens qui permettent cette reconnaissance sont le toucher et la vue. De façon plus générale, on peut classer ces deux types de détection en deux groupes:

- la vision basée sur la détection des ondes lumineuses ou sonores
- le toucher basé sur la détection de la résistance au mouvement

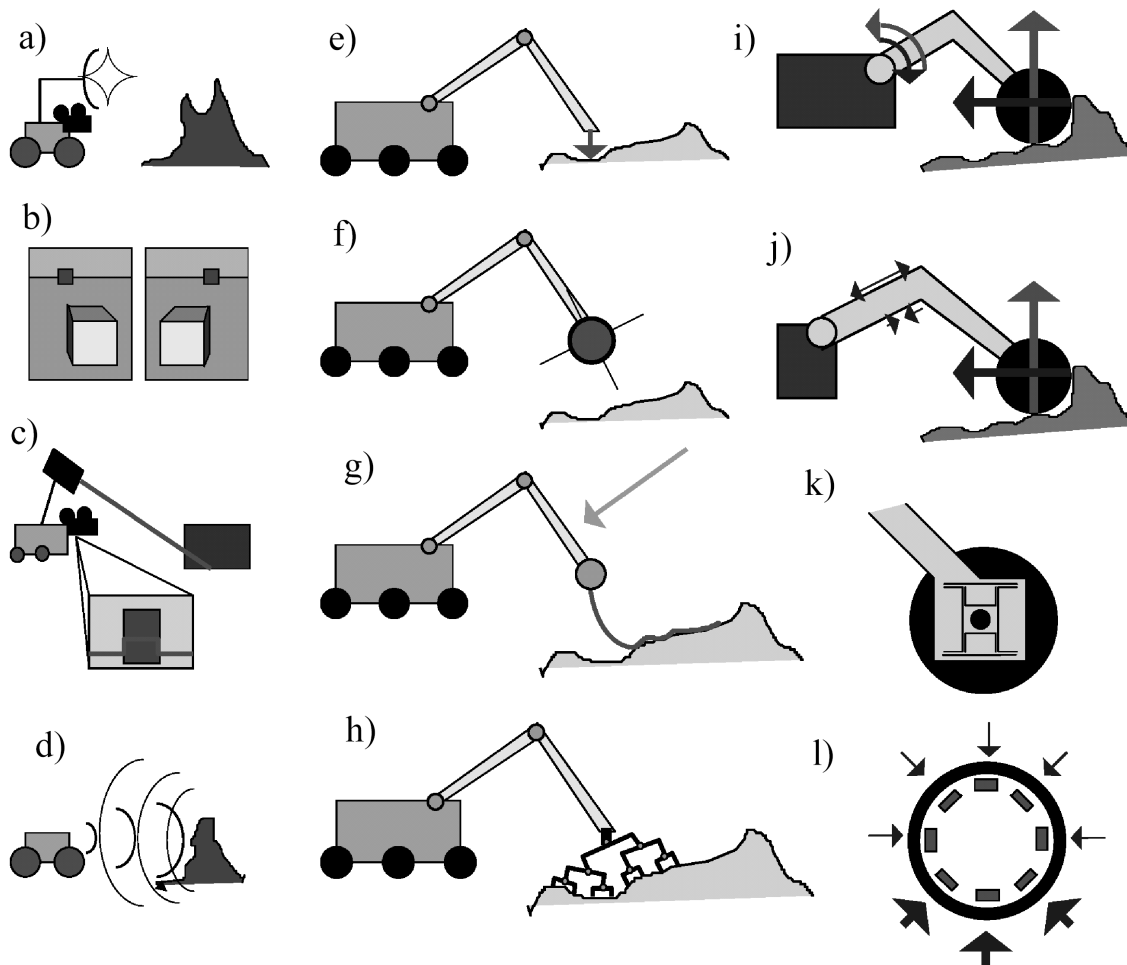


Figure 7.8: différents types de capteurs pour détecter le relief de l'environnement [Greppin99] (a) vision active par illumination diffuse (b) vision stéréoscopique (c) vision active par illumination laser (d) vision active par ultrasons (e) toucher actif avec une sonde rigide (f) toucher actif avec un rouleau de fils souples en rotation (g) toucher actif avec un peigne à fils souples (h) toucher actif avec un arbre inversé (i) capteur de couple sur une articulation rotative motorisée (j) détection de la flexion d'un organe de transmission attaché à la roue (k) capteur de force xy sur l'axe de la roue (l) roue tactile formée par plusieurs capteurs de force disposés à la périphérie

Nous avons vu qu'un mécanisme de locomotion interagit avec l'environnement à travers ses organes de contact (Section 3.4.1). Dans le cadre de ce travail, nous avons focalisé notre étude sur les mécanismes roulants. Nous avons démontré que la connaissance de la position des points de contact à la périphérie des roues était nécessaire afin d'établir le modèle cinématique, quasi-statique et dynamique du mécanisme de locomotion (Section 6). Ces modèles doivent ensuite nous permettre de contrôler la distribution du torseur des forces de liaison par contact avec le sol en agissant sur le torseur de motorisation du mécanisme (Section 4.4.4). Dans beaucoup de cas, la technologie utilisée pour l'implémentation des organes de motorisation ne permet pas de commander de façon précise les couples du torseur de motorisation. Les frottements internes dans les mécanismes de transmission et d'amplification de couple sont à l'origine de ce problème. Il convient alors de placer des capteurs de force le plus en amont possible de la chaîne des organes de transmission. Ces considérations ont motivé le développement d'un capteur permettant de mesurer les points de contact ainsi que les forces de contact d'une roue avec le terrain. Nous avons baptisé ce capteur *Roue Tactile*.

Il existe un très grand nombre de solutions technologiques qui peuvent être utilisées en robotique pour mesurer les forces et leur point d'application [Russell90][Nicholls89]. Toutes se basent sur la mesure des déformations engendrées par l'action des forces. Pour l'implémentation d'une roue tactile, deux capteurs spécifiques ont été retenus:

- les piézo-résistances à polymère semiconducteur ou *Force Sensing Resistor* (FSR) (figure 7.9)
- les capteurs de distance basés sur la mesure de l'intensité réfléchie, par un obstacle mobile, d'une source lumineuse infrarouge émise (figure 7.10)

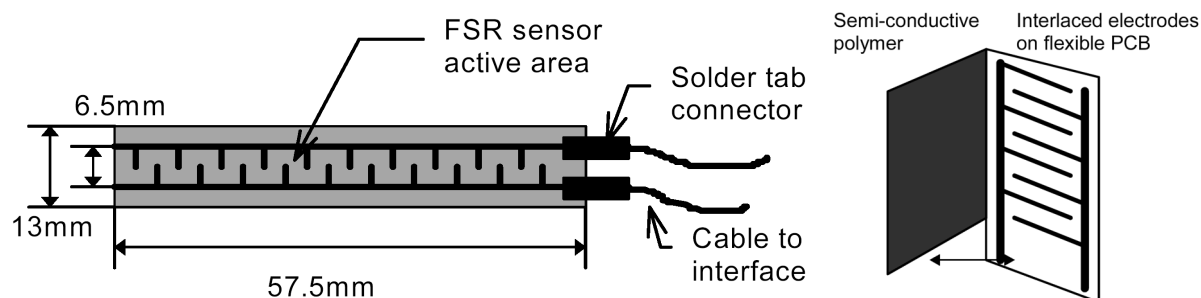


Figure 7.9: piézo-résistance à polymère semiconducteur (*Force Sensing Resistor* ou FSR fabriqué par *Interlink Electronics*)

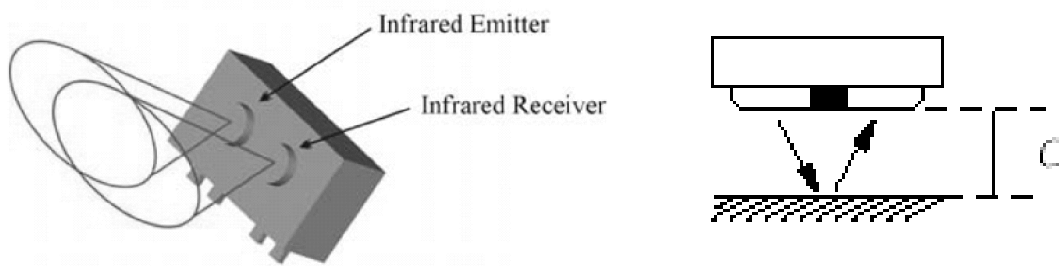


Figure 7.10: bloc émetteur et récepteur à infrarouge intégré utilisé comme capteur de distance (TCRT 1000 fabriqué par *Infineon* ou SFH 900 fabriqué par *Siemens*)

Le premier prototype de *Roue Tactile* fut réalisé dans le cadre d'un projet d'étudiant [Meyer98]. Ce dernier colla 32 capteurs de type FSR sur la surface intérieure d'un pneu. Avec cette technique, les capteurs sont pris en sandwich entre le pneu et la chambre à air. L'amplitude des forces de contact peut être mesurée grâce à la variation de la résistance électrique du capteur. Nous avons finalement décidé de ne pas retenir cette solution pour différentes raisons:

- Les capteurs et les circuits électroniques d'interface tournent avec la roue
- La mise en oeuvre est compliquée à cause du collage et du câblage des FSR
- Le concept est très difficile à intégrer et à miniaturiser

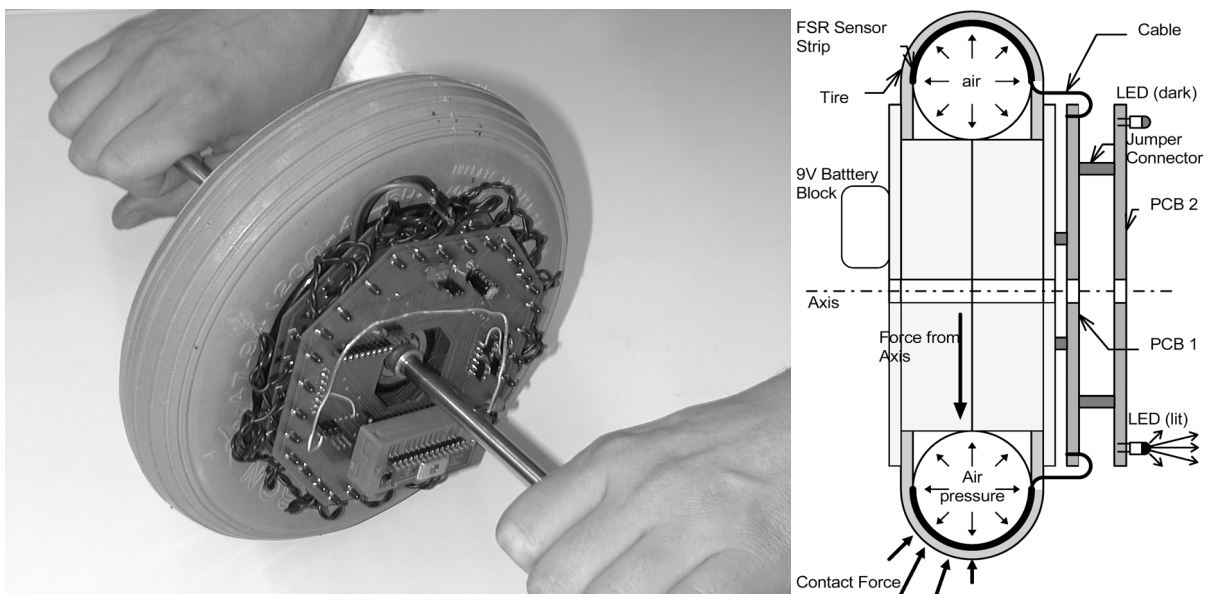


Figure 7.11: Premier prototype de roue tactile basé sur les capteurs FSR

L'étude d'un deuxième prototype utilisant des capteurs de distance à infrarouge pour mesurer la déformation du pneu fut mise à l'étude. Le défi était d'intégrer dans un même volume toutes les fonctionnalités suivantes:

- les capteurs et les circuits électroniques d'interface
- le mécanisme de motorisation de la roue et les circuits de commande du moteur
- le mécanisme de fixation de la roue

Nous avons finalement réussi à intégrer le tout dans une roue de 85mm de diamètre et 40mm de largeur (figure 7.12, figure 7.13, figure 7.14). Le mécanisme est construit autour du carter central (1). Les 16 capteurs de distance à infrarouge (21) sont montés sur un PCB (24) qui est fixé au carter. Ceux-ci sont disposés sur un cercle situé dans le plan médian de la roue. Afin que le passage des signaux infrarouges ne soit pas entravé par la jante, celle-ci est construite en deux parties (11). Le guidage des deux demi-jantes est assuré par deux roulements à 4 points de contact (14). L'entraînement des deux couronnes à denture intérieure des jantes se fait grâce à deux pignons (10) fixés sur le même arbre (8) guidé en rotation par deux roulements fixés au carter (13). L'arbre est entraîné par un mécanisme à vis sans fin (3)(7). La vis est directement collée sur l'arbre du moteur (20). Afin de reprendre les efforts axiaux de la vis, cette dernière est guidée par deux roulements à billes (13) précontraints (17). Afin d'éviter les hyperguidages, le moteur n'est pas fixé rigidement au carter. Seul le degré de liberté de rotation est bloqué grâce à une goupille (5) et un trou oblong dans le carter.

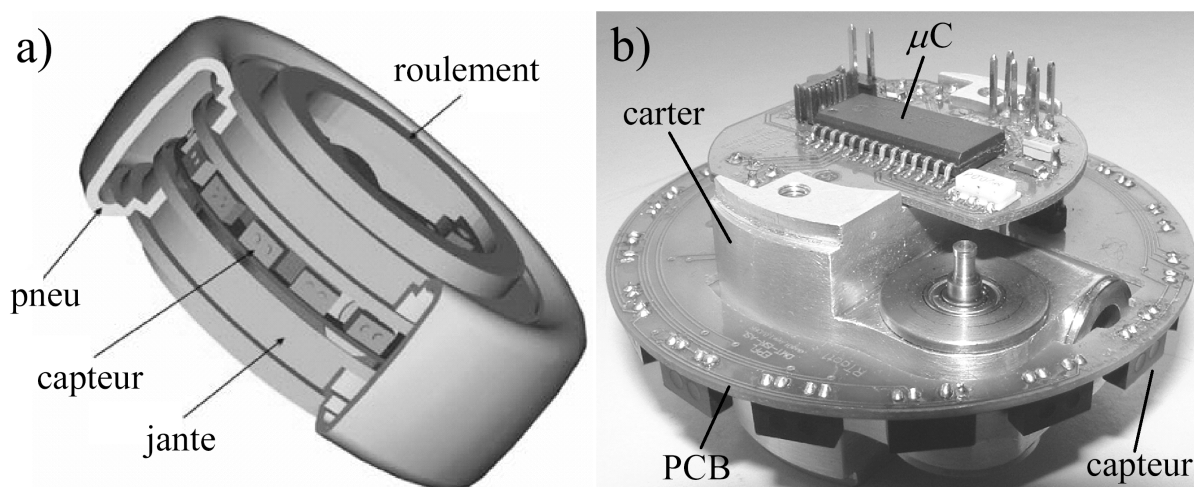


Figure 7.12: (a) dessin CAD de la roue tactile intégrée (b) photo de l'intérieur du mécanisme

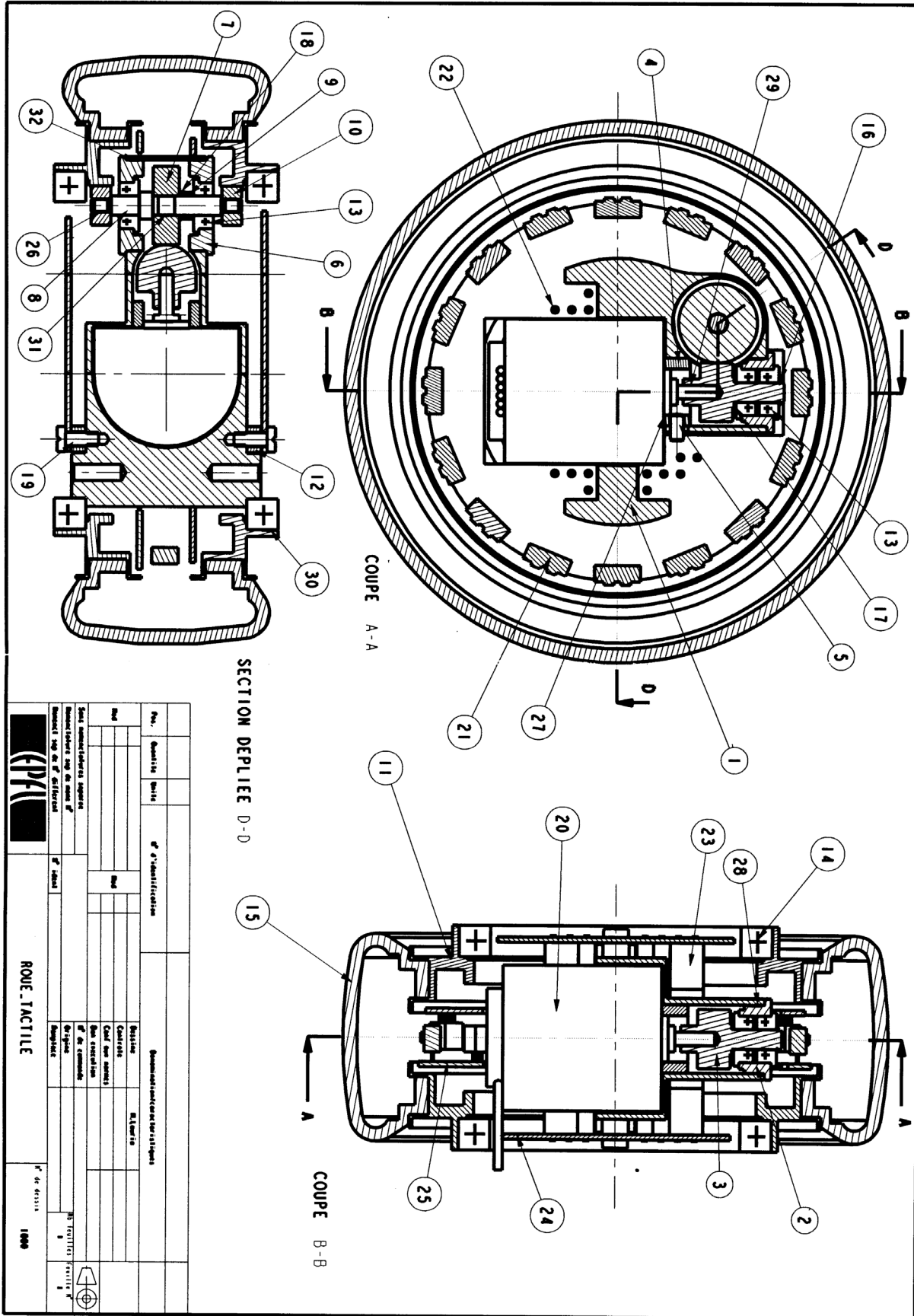


Figure 7.13: dessin d'ensemble d'une roue tactile intégré



32	2	----	----	Colle Loctite 638 Blocpresse				
31	1	----	----	Colle Loctite 638 Blocpresse				
30	2	----	----	Colle Loctite 603 Scelroulement				
29	1	----	----	Colle Loctite 638 Blocpresse				
28	1	----	----	Colle Loctite 638 Blocpresse				
27	1	----	----	Colle Loctite 326 + activateur 7649				
26	2	----	----	Colle Loctite 638 Blocpresse				
25	2	----	----	PCB centraux				
24	2	----	----	PCB latéraux				
23	14	----	----	Connecteur femelle 2 poles h=7				
22	14	----	----	Connecteur male double isol				
21	16	----	----	Capteur TCRT 1000				
20	1	----	----	Moteur Min 2224U012SR IE2-5I2				
19	4	----	----	Vis tête plate M2x3				
18	1	----	----	Rondelle Elastique RMB FS3x4.5				
17	1	----	----	Rondelle Elastique RMB FS3x4.5				
16	1	----	----	Seg d'arrêt pour arbre $\varnothing 3$ DIN 6799				
15	1	----	----	Pneu				
14	2	----	----	Roulement 4pdc Kaydon KAA10XLO				
13	4	----	----	Roulement EZO F683ZZMC3P6SRL				
12	4	1000	1013	Entretoise PCB				
11	2	1000	1011	Couronne				
10	1	1000	1001	Pignon				
9	1	1000	1004	Tube Roue vis sans fin				
8	1	1000	1002	Arbre Roue Vis sans fin				
7	1	1000	1005	Roue Vis sans fin				
6	2	1000	1003	Support Roue Vis sans fin				
5	1	1000	1009	Goupille Antirotation				
4	1	1000	1008	Douille Moteur Roue				
3	1	1000	1007	Vis sans fin				
2	1	1000	1006	Support vis sans fin				
1	1	1000	1010	Carter Roue				
Pos.	Quantite	Usite	N° d'identification		Denomination/caracteristiques			
Mod			Mod		Dessine	M. Lourie	Echelle	
					Contrôle			
					Conf aux normes			
					Bon execution			
Sans nomenclatures separee					N° de commande			
Nomenclature sep de meme N°					Origine			Nb feuilles
Nomencl sep de N° different					Remplace		Feuille N°	
					ROUE_TACTILE			N° de dessin 1000

Figure 7.14: liste des pièces d'une roue tactile intégrée

Avant son utilisation, chaque capteur doit être calibré. En effet, nous avons remarqué que des capteurs qui étaient placés dans les mêmes conditions de mesure n'avaient jamais les mêmes caractéristiques. Cette tâche a été implémentée avec un microcontrôleur intégré dans la roue [Pachoud99]. Après calibration, les données peuvent être lues et une image de l'environnement peut être reconstituée (figure 7.10). Des tests effectués sur le capteur ont démontré son efficacité pour détecter la position des zones de contact avec l'environnement. Malheureusement, le capteur ne permet pas de mesurer les forces de contact avec précision. Les raisons sont les suivantes:

- Nous n'avons pas de modèle de déformation du pneu. Son étude sort du cadre de ce travail.
- La déformation du pneu n'est pas complètement élastique.
- L'intérieur du pneu n'est pas parfaitement circulaire

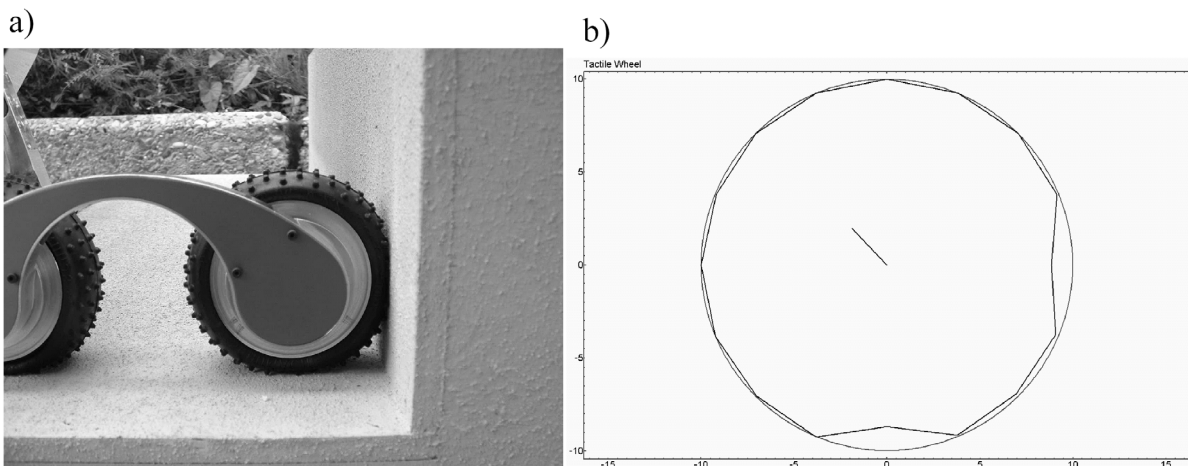


Figure 7.15: (a) roue tactile en contact avec une marche d'escalier (b) image de la marche d'escalier perçue par les capteurs tactiles intégrés. Un algorithme permet de calculer la direction moyenne et l'amplitude du contact.

7.3 Modules électroniques pour le prototypage rapide de robots

Dans le cadre de ce travail, nous avons contribué au développement de modules électroniques permettant d'interfacer un ensemble de capteurs et d'actuateurs sur un bus I2C (figure 7.16)[Viscarret00].

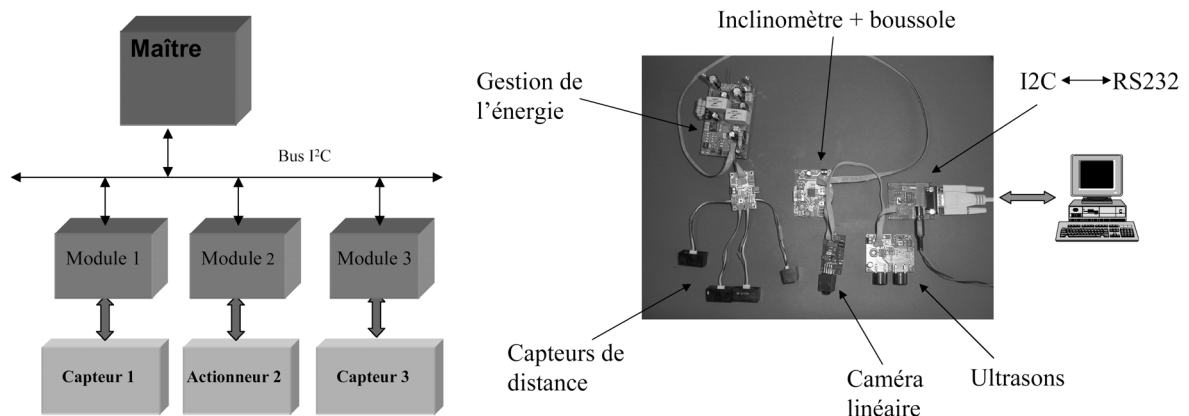


Figure 7.16: modules électroniques pour le prototypage rapide de robots

Nous nous sommes plus particulièrement occupés de la mise au point d'un module de contrôle pour moteur à courant continu. Plusieurs projets d'étudiants ont été consacrés à son développement [Viscarret99][Deschler99][Baer03]. Ses principales qualités par rapport aux modules concurrents sont sa taille réduite, sa grande flexibilité d'emploi et sa documentation. Il a pu être utilisé avec succès dans une quinzaine d'applications différentes. Chaque module permet de mesurer et de régler la position, la vitesse ou le couple d'un moteur DC (figure 7.16).

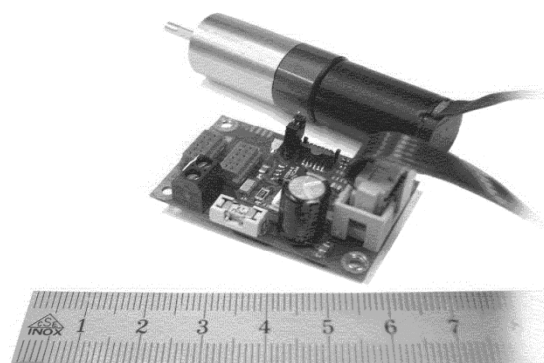
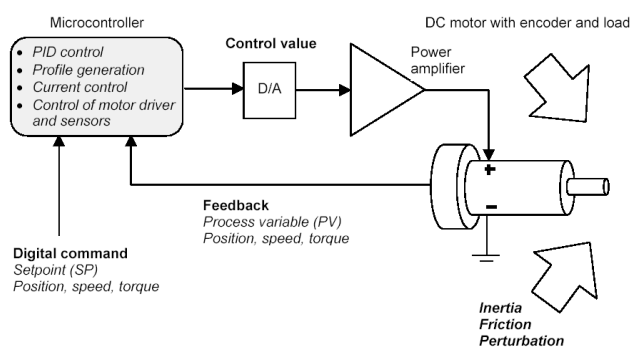


Figure 7.17: module électronique de contrôle pour moteur à courant continu

7.4 Robot *Shrimp*

La grande complexité des mécanismes à suspension active comme *Space Cat* nous a poussé à développer de nouveaux concepts de locomotion roulants à suspension passive. Cette tâche fut confiée à deux étudiants dans le cadre de leur projet d'étude [Merminod99]. Un nouveau mécanisme de locomotion, baptisé *Shrimp*, était né (figure 7.18).

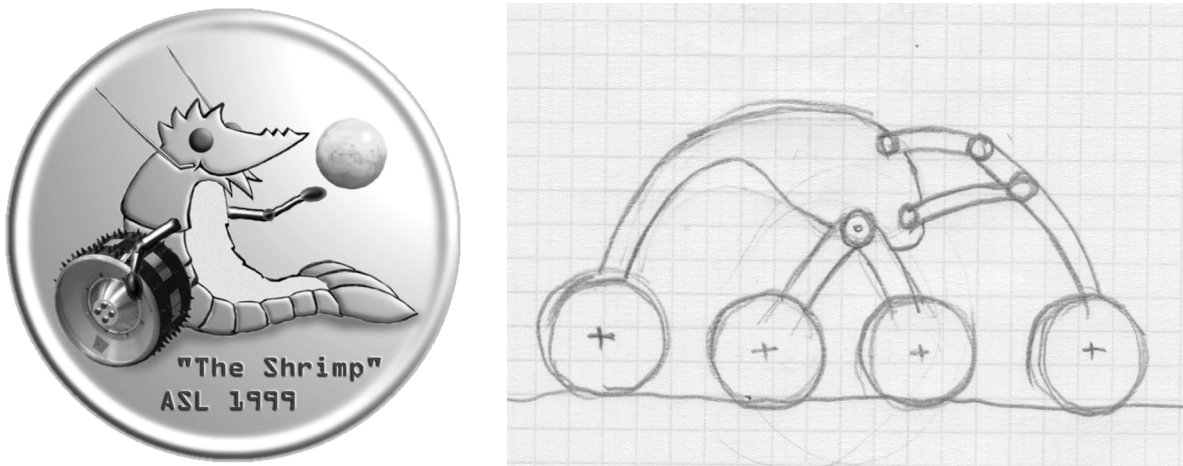


Figure 7.18: *Shrimp* signifie «crevette» en anglais. En observant le premier croquis du robot dessiné par ses deux inventeurs principaux, Yann Crausaz et Baptiste Merminod, on peut facilement comprendre pourquoi.

Shrimp (figure 7.19) possède 6 roues motrices dont la configuration forme un losange (figure 7.22 b):

- La roue frontale est montée sur une fourche passive à 1 DDL
- Les 4 roues latérales sont montées sur 2 bogies latéraux passifs
- La roue arrière est fixée rigidement au corps principal du mécanisme

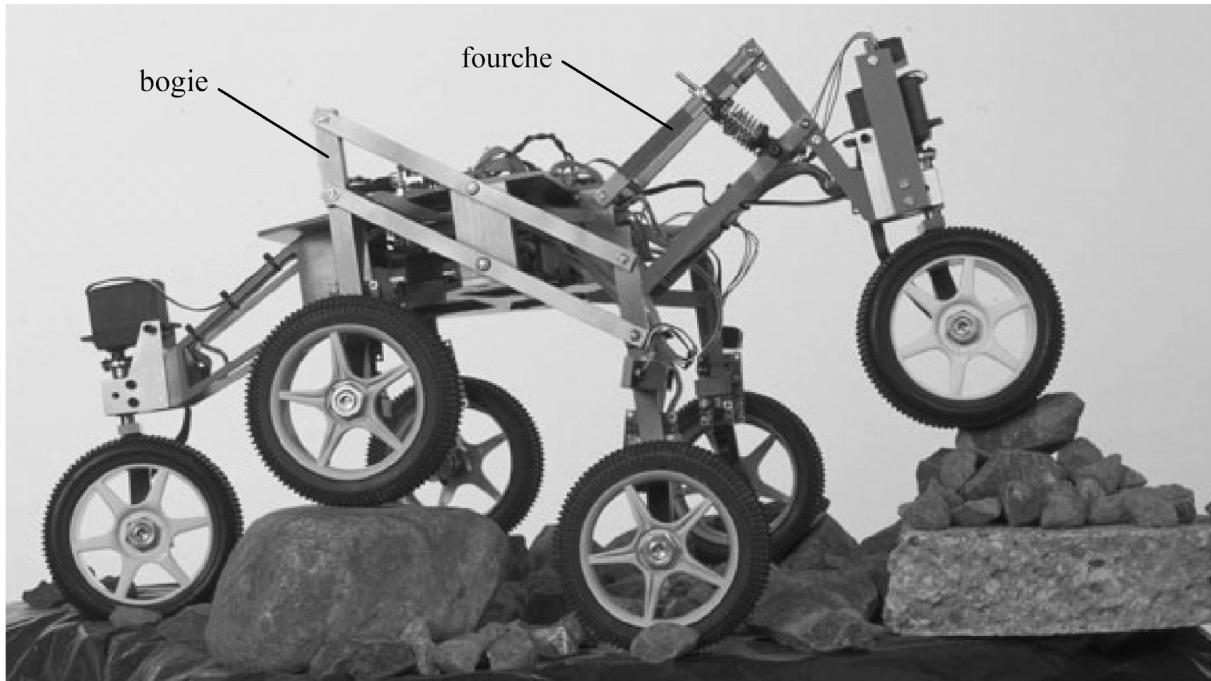


Figure 7.19: Premier prototype du Robot *Shrimp* réalisé à l'EPFL en 1999

L'architecture mécanique des bogies utilise la géométrie d'un parallélogramme afin de garder le centre de rotation au centre des deux roues tout en donnant une bonne garde au sol au train de roues (figure 7.20 a).

L'architecture mécanique de la fourche avant utilise les propriétés géométriques d'un mécanisme articulé à 4 barres [Erdman97]. Les longueurs des différentes pièces ont été optimisées afin d'obtenir un centre instantané de rotation plus bas que le centre de la roue fixée sur la fourche lorsque le mécanisme se trouve sur un terrain plat. De cette façon, on obtient un mouvement ascendant de la roue lorsque celle-ci se trouve face à une paroi verticale (figure 7.20 b). Le degré de liberté de la fourche est motorisé de façon passive avec un ressort afin de permettre une meilleure répartition du poids sur toutes les roues et d'augmenter la traction sur la roue montée sur la fourche.

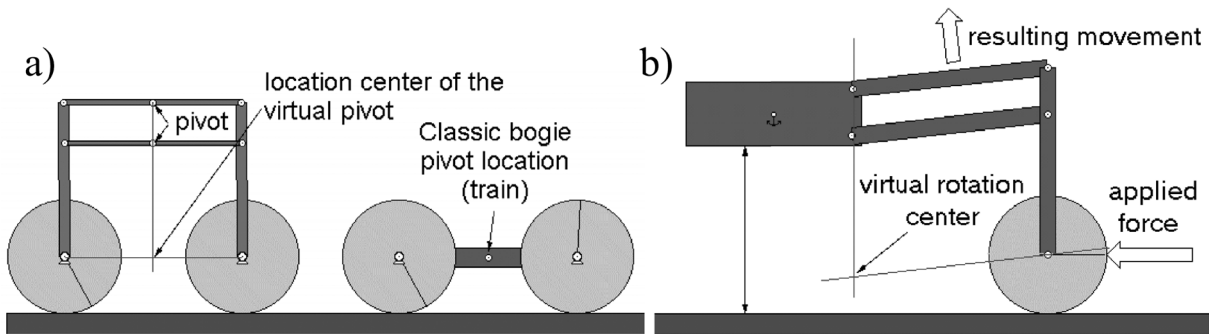


Figure 7.20: (a) différence de garde au sol entre un bogie à architecture parallèle et un bogie classique (b) le centre instantané de rotation de la fourche avant est situé plus bas que le centre de la roue

Les dimensions du mécanisme ont été optimisées afin que le système soit capable de gravir une marche d'escalier (figure 7.21).

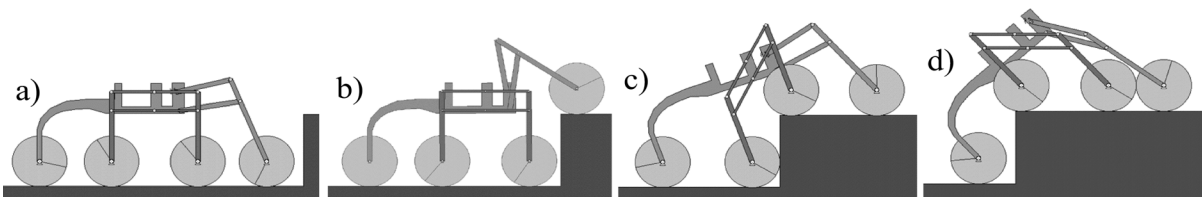


Figure 7.21: franchissement d'une marche d'escalier avec *Shrimp*

Dans un premier temps, ce mécanisme de locomotion a pu être modélisé en deux dimensions. On peut facilement démontrer que la mobilité du véhicule 2D par rapport au sol vaut 1 (Section 4.3). En d'autres termes, ce mécanisme est capable de suivre le profil d'un terrain avec toutes les roues en contact même si le sol n'est pas plat (figure 7.22 c et d). Si toutes les roues sont motrices, le système est surmotorisé (Section 4.4.5). Si l'on connaît la position des points de contact avec le sol pour chaque roue, il est possible de calculer par optimisation le torseur des couples de motorisation qui limite les risques de glissement du robot. Ce travail a été confié à un étudiant dans le cadre d'un projet de diplôme [Krebs03]. Pour déterminer les points de contact, il existe une alternative aux roues tactiles qui s'applique particulièrement bien aux mécanismes de locomotion à suspension passive. Baptisée «odométrie 3D», cette méthode a été développée et appliquée au robot *Shrimp* dans le cadre d'une autre thèse à l'EPFL [Lamon03]. Elle se base sur le modèle cinématique du robot et utilise des accéléromètres embarqués et des capteurs rotatifs sur les articulations passives. Des travaux similaires ont été réalisés pour le robot à suspension passive *Sojourner* [Iagnemma00].

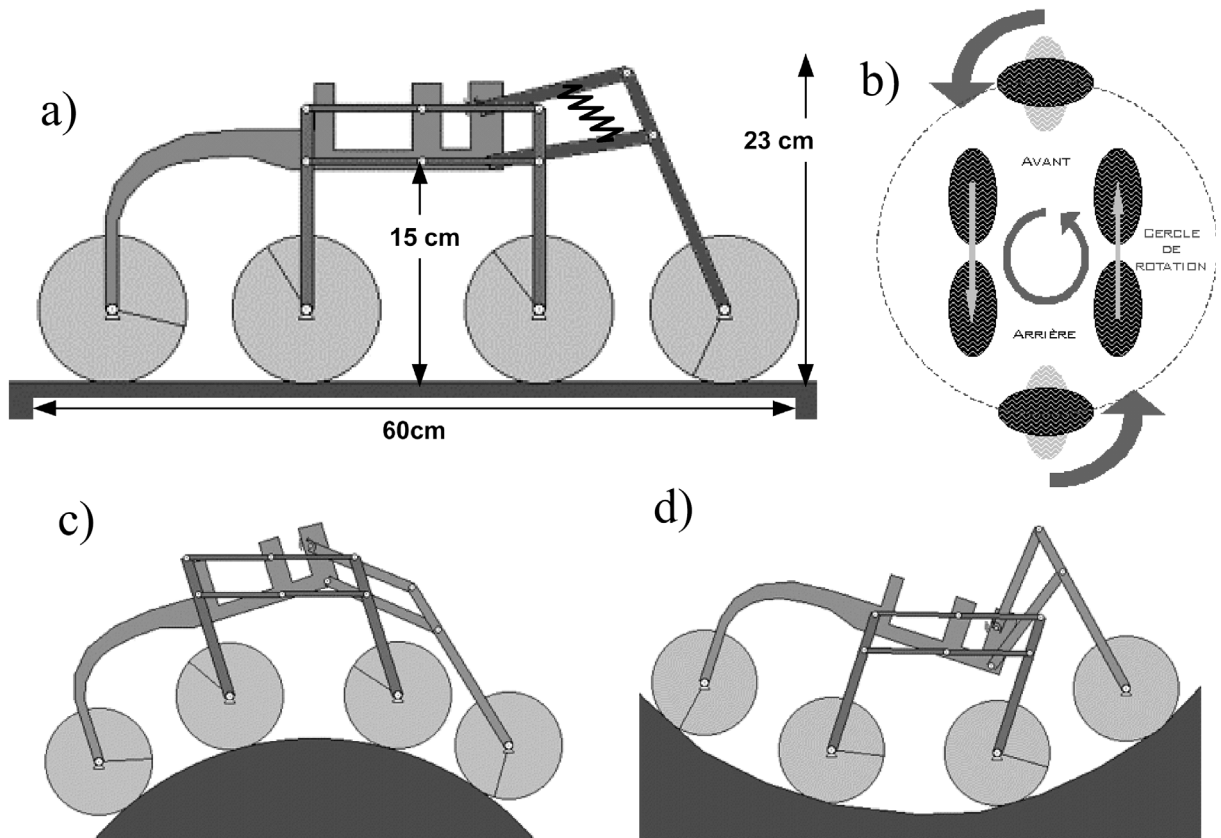


Figure 7.22: (a) dimensions du premier prototype (b) rotation sur place en tournant les roues avant et arrière de 90 degrés (c) déformation passive du châssis sous l'effet de la gravité sur terrain convexe (d) idem sur terrain concave

Des mesures ont été effectuées en vue de tracer la trajectoire du centre de masse lors du franchissement d'une marche de 17cm de hauteur [Estier00]. On constate que l'architecture mécanique de *Shrimp* confère à son centre de gravité une trajectoire beaucoup plus adoucie que le relief de la marche (figure 7.23).

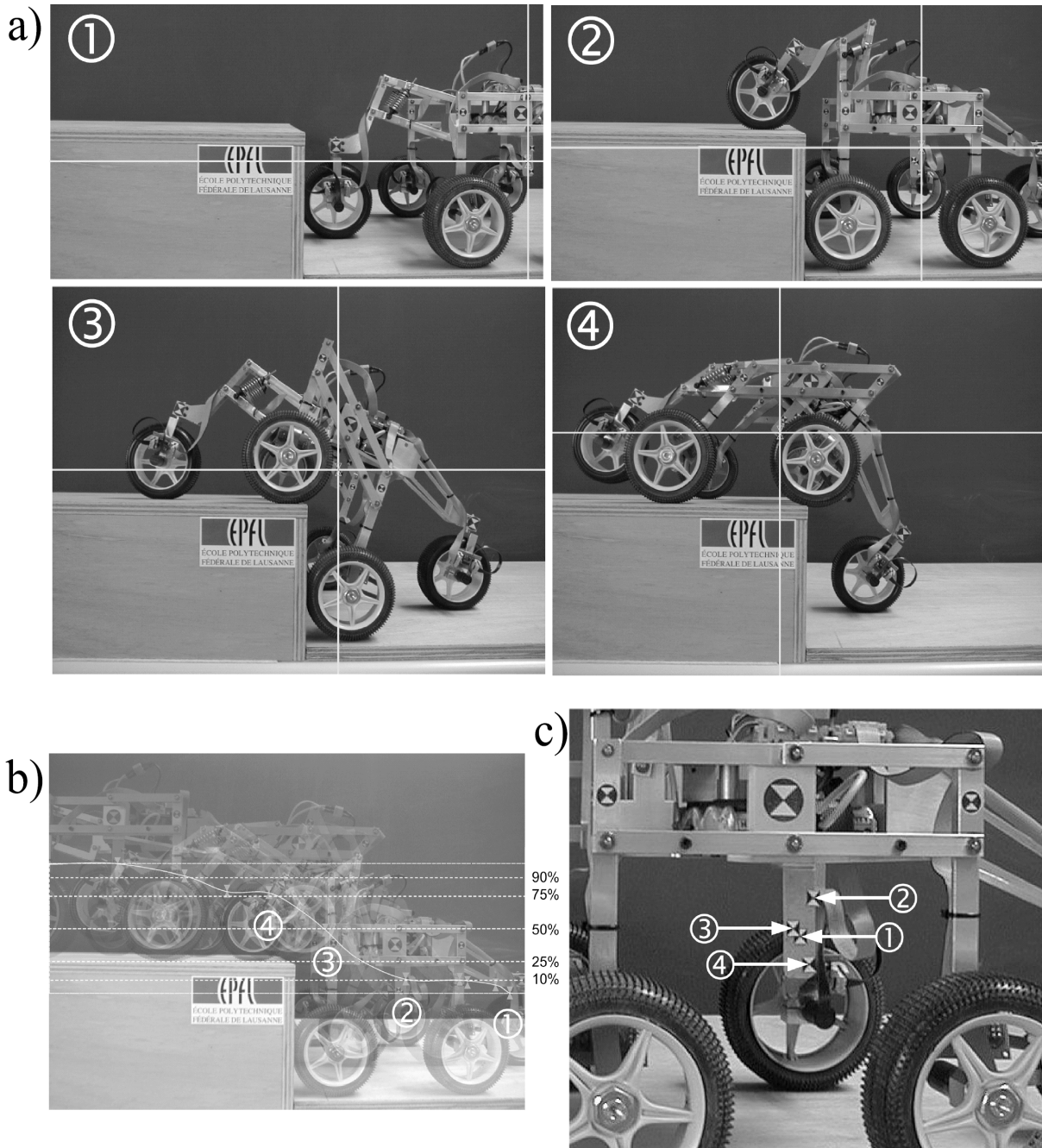


Figure 7.23: (a) Trajectoire du centre de masse du robot lors du franchissement d'une marche (b) par rapport à un référentiel lié à la marche (c) par rapport à un référentiel lié au robot

Encouragés par les performances de franchissement d'une marche, nous avons voulu tester le mécanisme sur un escalier entier (figure 7.24 a et b). *Shrimp* peut monter la plupart des escaliers. Cependant, le mécanisme a tout de même certaines limitations:

- lorsqu'il n'y pas une bonne corrélation entre l'empattement du train de roues et la géométrie de l'escalier
- lorsque l'escalier est glissant
- lorsque les parois verticales de l'escalier sont en surplomb

Shrimp fait preuve d'une excellente stabilité en terrain accidenté. Il est en effet capable de se mouvoir avec une inclinaison frontale ou latérale de 40 degrés et peut franchir des obstacles comme des rochers avec un seul bogie (figure 7.24 c). Le prototype a été testé dans divers terrains sablonneux, rocaillieux et broussailleux (figure 7.24 d).

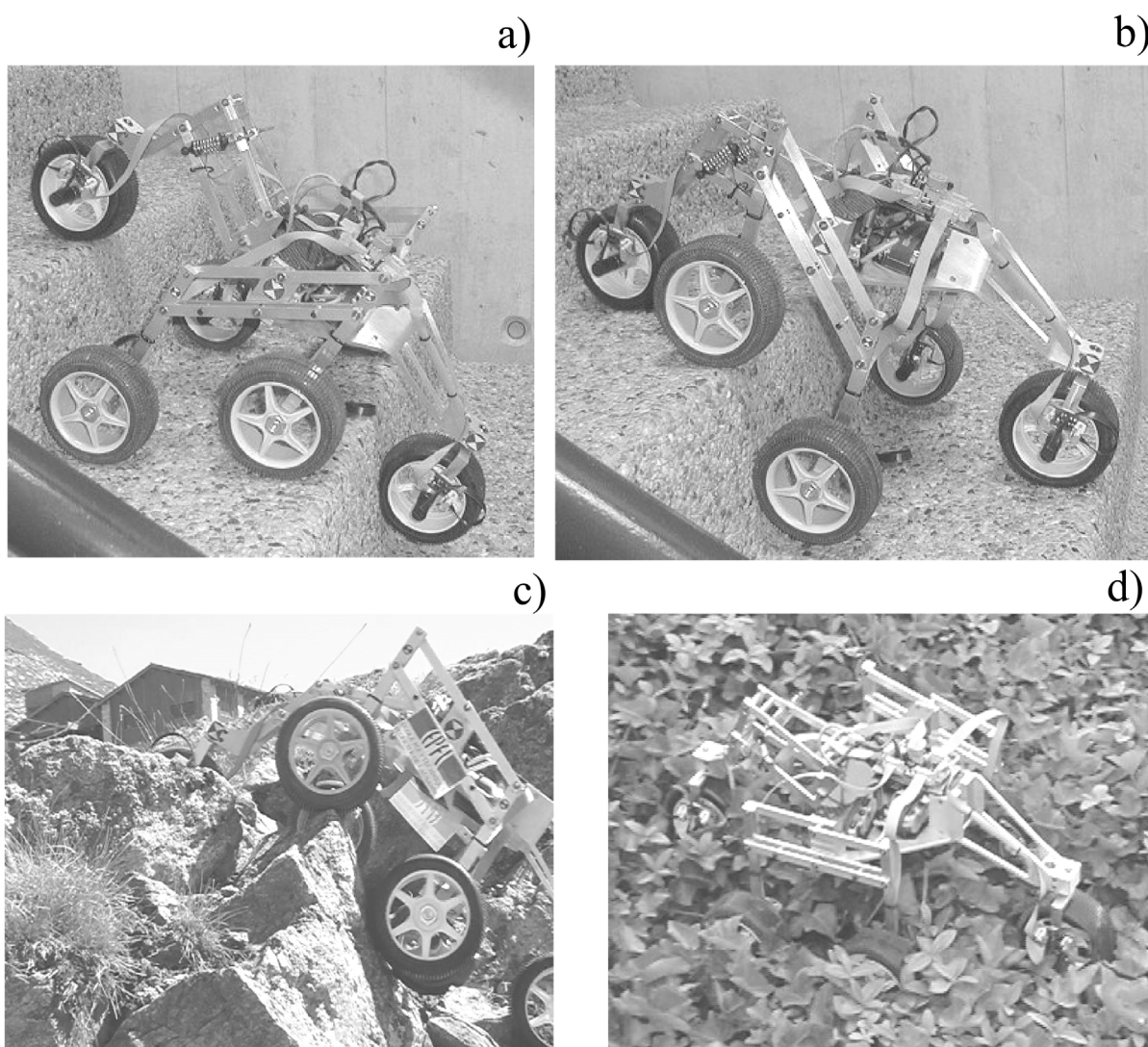


Figure 7.24: (a et b) le robot est capable de gravir un escalier de façon autonome (c) essais de locomotion sur un terrain rocaillieux (d) et sur un terrain broussailleux

De 1999 à 2003, plusieurs versions dérivées de *Shrimp I* ont vu le jour (figure 7.25). L'une d'entre elles est d'ailleurs une candidate sérieuse pour une future mission martienne de l'Agence Spatiale Européenne (figure 7.24 d). Parallèlement, l'entreprise canadienne Colineo est en train de développer *Shrimp IV*, une version avec une motorisation hydraulique qui devrait peser une centaine de kilogrammes.

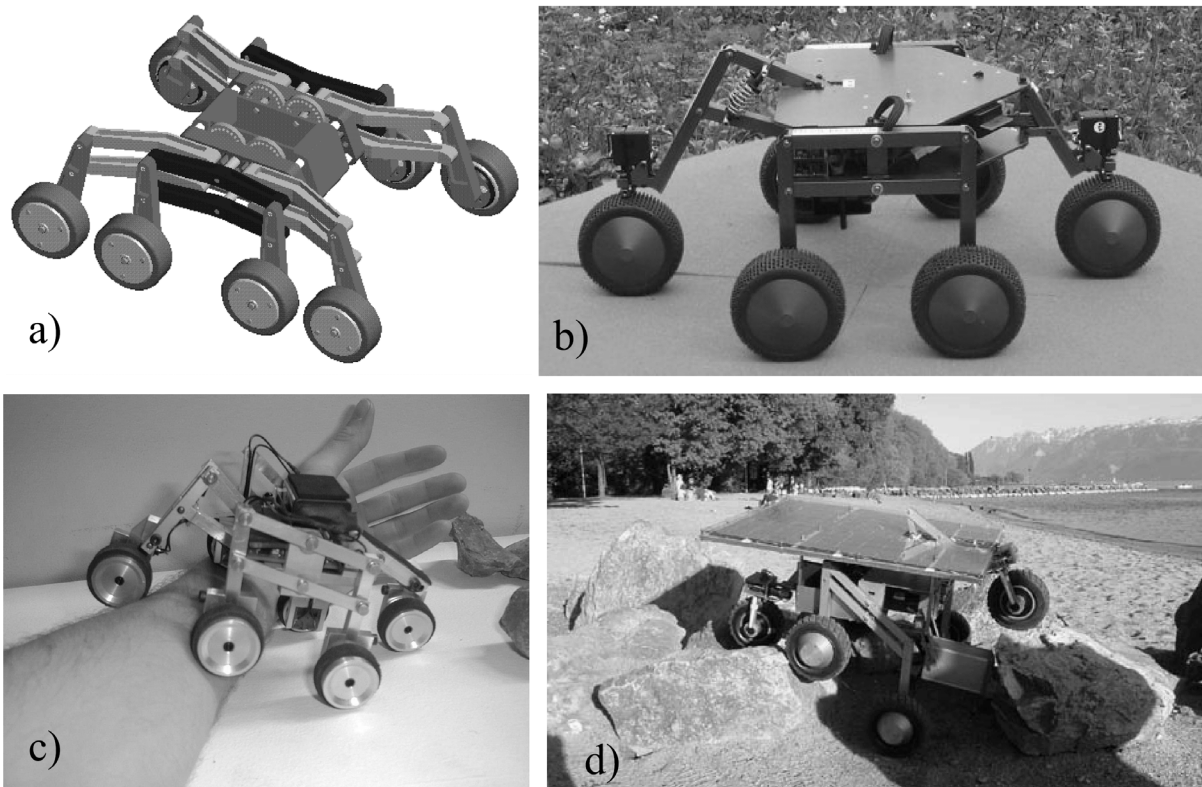


Figure 7.25: (a) *Shrimp II* (variante à 8 roues) [Merminod00] (b) *Shrimp III* produit et commercialisé par l'entreprise Bluebotics (c) Mini *Shrimp* [Michaud01] (d) *Solero* (Shrimp Solaire) réalisé par l'EPFL et l'entreprise allemande vH&S pour l'agence spatiale Européenne [Michaud02]

Le succès de cette architecture mécanique est lié à sa grande robustesse. En effet, l'adaptation du véhicule au profil du terrain se fait de manière passive sans capteurs, sans moteurs actifs et sans contrôle actif. *Shrimp* constitue une excellente plate-forme tout-terrain sur laquelle il faut encore ajouter des organes de perception et de décision si l'on désire avoir une totale autonomie du robot mais ce type de travaux sort du cadre de cette thèse.

Cette plate-forme mécanique a fait l'objet d'un brevet [Crausaz01] et de plusieurs publications dont une sur support vidéo [Lauria00] et une dans un journal scientifique international [Siegwart02].

7.5 Robot *Octopus*

La conception et la réalisation du robot *Octopus* a nécessité plus de deux années de travail. Il est le fruit d'une longue réflexion qui s'inspire de tous les travaux exposés précédemment. Il a été conçu autour des roues tactiles intégrées afin de démontrer que les performances des mécanismes de locomotion à suspension active pouvaient transcender leurs homologues à suspension passive.

Nous allons maintenant décrire la morphologie du mécanisme qui forme le squelette d'*Octopus* (figure 7.26). Au centre, le support pour la charge utile est lié mécaniquement aux deux corps latéraux grâce à un mécanisme à différentiel passif. Deux bras mobiles sont fixés sur chaque corps dans une configuration de parallélogramme motorisé actif. Les avant bras sont fixés aux bras et peuvent tourner grâce à une motorisation active. Les 6 moteurs des articulations du mécanisme sont situés à l'intérieur du support central. Deux roues tactiles motorisées sont fixées sur chaque avant bras. Ce mécanisme de suspension garantit un contact permanent aux huit roues indépendamment du relief du terrain. De plus, la position du centre de masse peut être déplacée activement sans changer la position des points de contact entre les roues et le terrain.

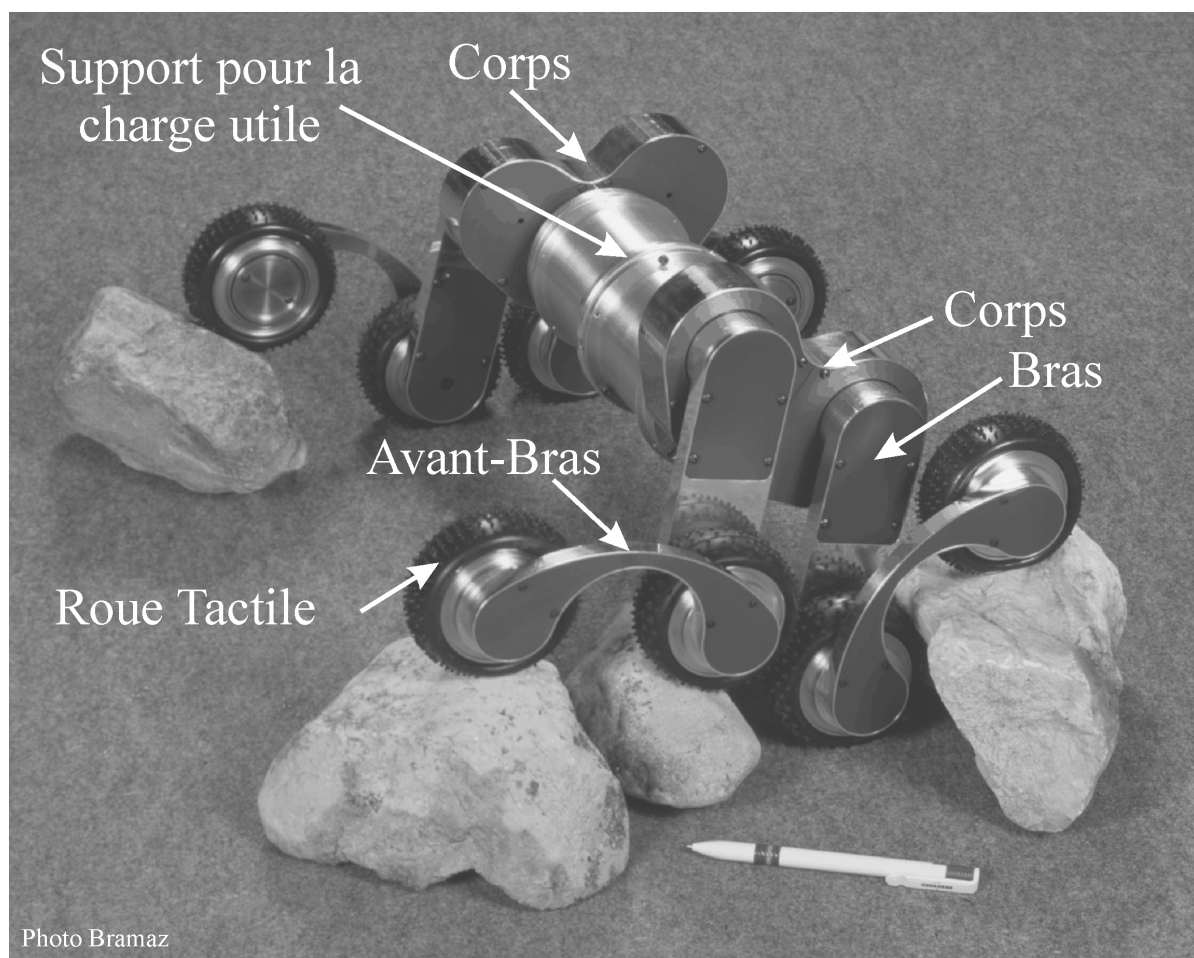


Figure 7.26: Le robot mobile tout-terrain à suspension active *Octopus*

Le robot mesure 43cm de long par 42cm de large par 23cm de haut. La masse du système à vide est de 10kg. Une charge utile de 5Kg ainsi que des accumulateurs électriques peuvent être montés sur le support central.

La partie électronique du robot est composée d'une trentaine de modules répartis dans tous le mécanisme (figure 7.27). Chacun des 14 moteurs possède son propre microcontrôleur permettant de mesurer et de commander la position, la vitesse ou le couple des roues et des articulations. Chaque roue tactile possède son propre microcontrôleur permettant l'acquisition et le pré-traitement des capteurs tactiles. De plus, un inclinomètre à deux axes permettant de mesurer l'assiette du robot est monté sur chaque corps. Tous ces modules sont connectés sur un bus I2C qui parcourt le robot. Le tout est connecté à un ordinateur via un circuit translateur I2C/RS232 qui centralise les données et qui génère les consignes pour les moteurs. De nombreux emplacements libres permettent de connecter d'autres modules sur le bus. Pour remédier au manque de place au niveau des articulations, des contacts électriques rotatifs utilisant des circuits flexibles ainsi que les connecteurs associés ont spécialement été développés pour cette application. De plus, la connexion des circuits situés au centre du support central se fait grâce à des outils spécialement conçus à cet effet. La complexité du robot se mesure par la quantité et la diversité des pièces mécaniques (figure 7.29) et par la quantité et les différentes formes de détournage des circuits électroniques (figure 7.30).

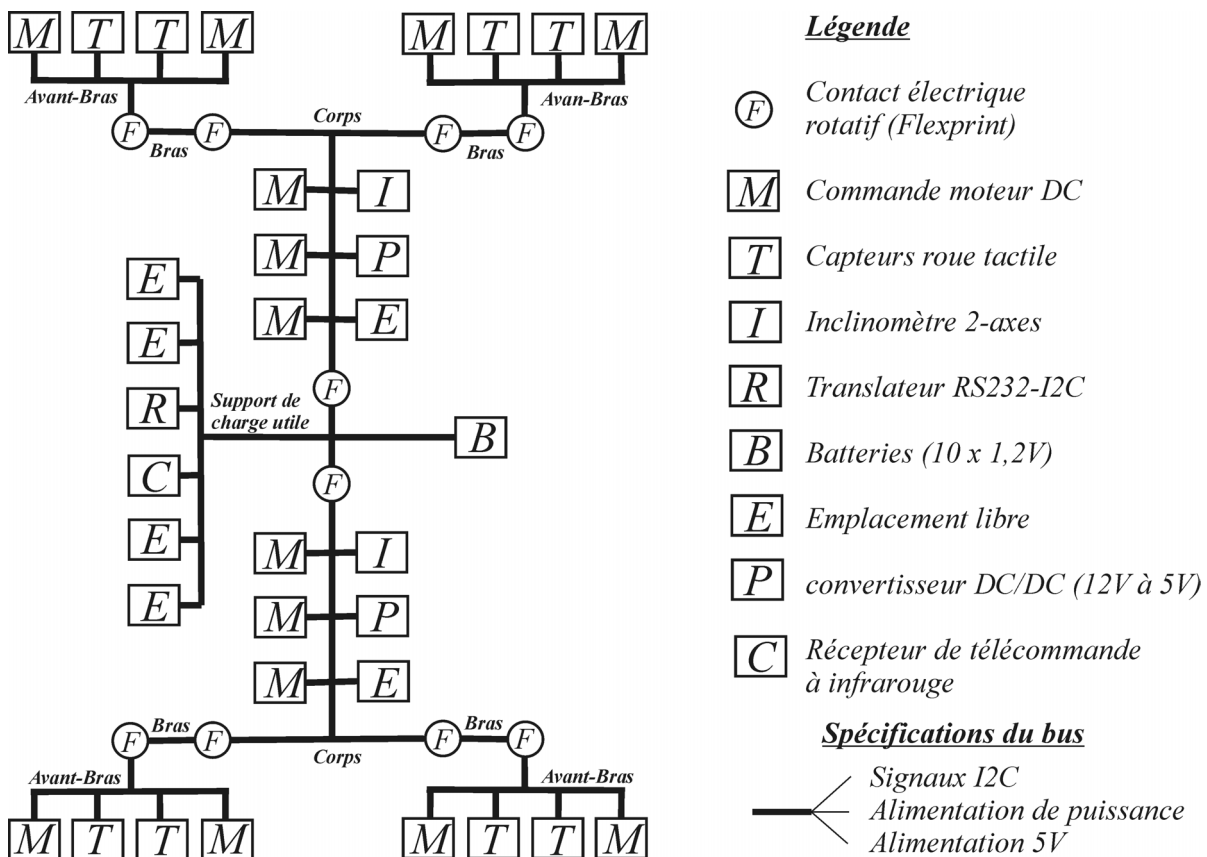


Figure 7.27: Architecture modulaire de l'électronique intégrée d'Octopus

Nous allons maintenant décrire la séquence de franchissement théorique d'une marche d'escalier trois fois plus haute que le diamètre d'une des roues d'*Octopus*.

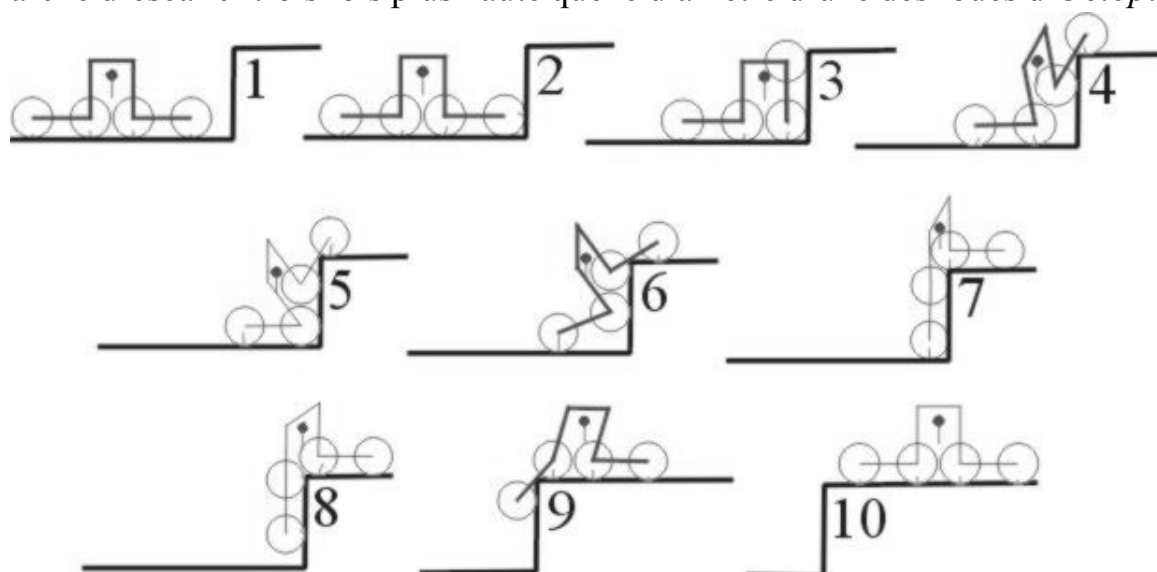


Figure 7.28: Séquence de franchissement d'une marche avec *Octopus*

1. Le robot roule à plat avec son centre de gravité situé entre les roues centrales.
2. La première roue touche la paroi verticale de la marche.
3. L'avant-bras situé à l'avant s'élève en même temps que le robot continue son avance jusqu'à ce que la deuxième roue touche la paroi verticale.
4. L'avant bras situé à l'arrière et le parallélogramme motorisé contribuent à élever le corps, le bras, l'avant-bras et les deux roues situés à l'avant jusqu'à ce que la première roue atteigne la partie horizontale supérieure de la marche.
5. Le robot continue son avance jusqu'à ce que la troisième roue touche la paroi verticale.
6. Les deux avant-bras contribuent à élever les deux bras, le corps et les roues centrales. Le poids du robot repose sur les deux roues externes.
7. Dans un premier temps, la deuxième roue atteint la partie horizontale supérieure de la marche puis c'est au tour de la dernière roue. A ce moment le poids du robot repose sur les deux premières roues ainsi que sur la dernière roue.
8. L'avant-bras situé à l'avant et le parallélogramme motorisé contribuent à élever le corps, le bras, l'avant-bras et les roues situées à l'arrière. Le robot continue son avance afin que les roues situées à l'arrière gardent le contact avec la paroi verticale de la marche. Le poids du robot repose sur les deux premières roues alors que la projection verticale du centre de masse passe à l'extérieur des deux points de contact correspondants. Dans ce cas, une composante horizontale de friction est nécessaire sur les deux premières roues pour ne pas basculer en arrière.
9. La troisième roue atteint la partie horizontale supérieure de la marche. L'avant-bras arrière s'élève jusqu'à ce que la dernière roue termine son ascension.



Figure 7.29: Les composants mécaniques d'*Octopus*

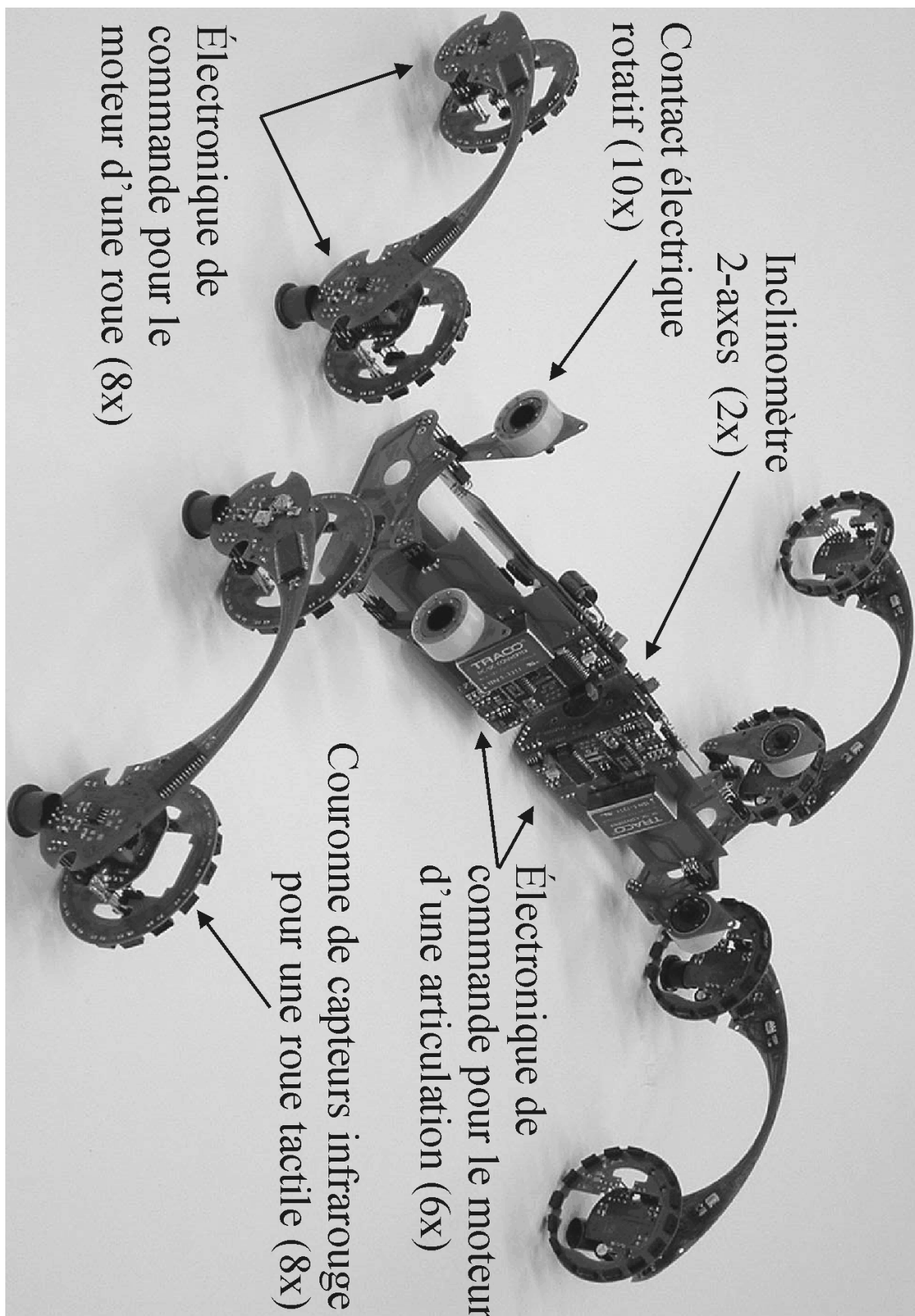


Figure 7.30: Les circuits électroniques d'*Octopus*

Le logiciel Sysquake nous a permis de réaliser une interface graphique avec le robot (figure 7.31). Celle-ci comprend plusieurs fonctionnalités dont:

- Des boutons qui permettent de configurer la communication série
- Une télécommande qui permet de contrôler les moteurs de la structure
- Des boutons qui permettent de lancer une calibration automatique des roues tactiles
- Une interface qui permet de visualiser l'information perçue par chacun des capteurs de la roue tactile désirée
- Une interface qui permet de visualiser l'état des articulations du robot par rapport à l'horizontale grâce aux mesures fournies par les inclinomètres. Cette interface permet également de visualiser les points de contact perçus par les roues tactiles ainsi qu'une mesure analogique de la déformation du pneu.

Le logiciel Sysquake nous a également permis de faire des simulations des différents modèles du mécanisme de suspension longitudinal et de mettre au point des algorithmes de contrôle. Deux problèmes ont fait que nous n'avons pas pu implémenter correctement les concepts basés sur une optimisation de la distribution des forces de contact (présentés à la section 4.4.6).

- Le frottement dans les réducteurs à engrenages du prototype ne nous permet pas de contrôler de façon précise le couple appliqué en amont de la chaîne de réduction.
- Le premier problème aurait pu être résolu grâce à une mesure de force au niveau des roues tactiles. Malheureusement les prototypes réalisés ne nous fournissent pas cette mesure avec la précision nécessaire. Les capacités de franchissement autonome s'en trouvent fortement diminuées. Actuellement le robot est capable de franchir de façon autonome des obstacles de la taille d'une roue (figure 7.32).

L'implémentation de capteurs de force mesurant la flexion des avant-bras est peut-être la solution à ce problème. Malheureusement, la complexité de cette tâche et le manque de temps ne nous a pas permis de mettre en pratique cette idée.

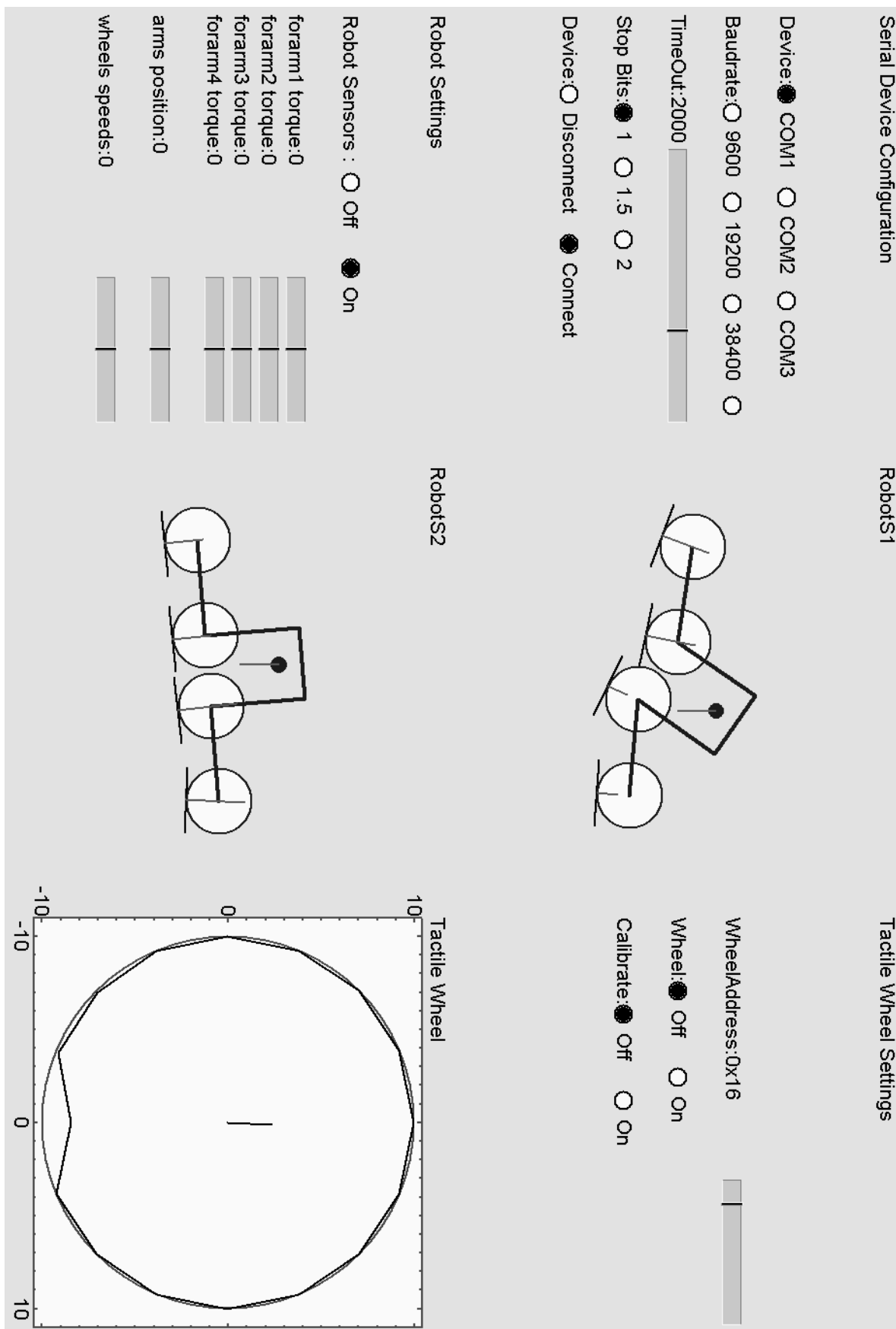


Figure 7.31: L'interface avec le robot

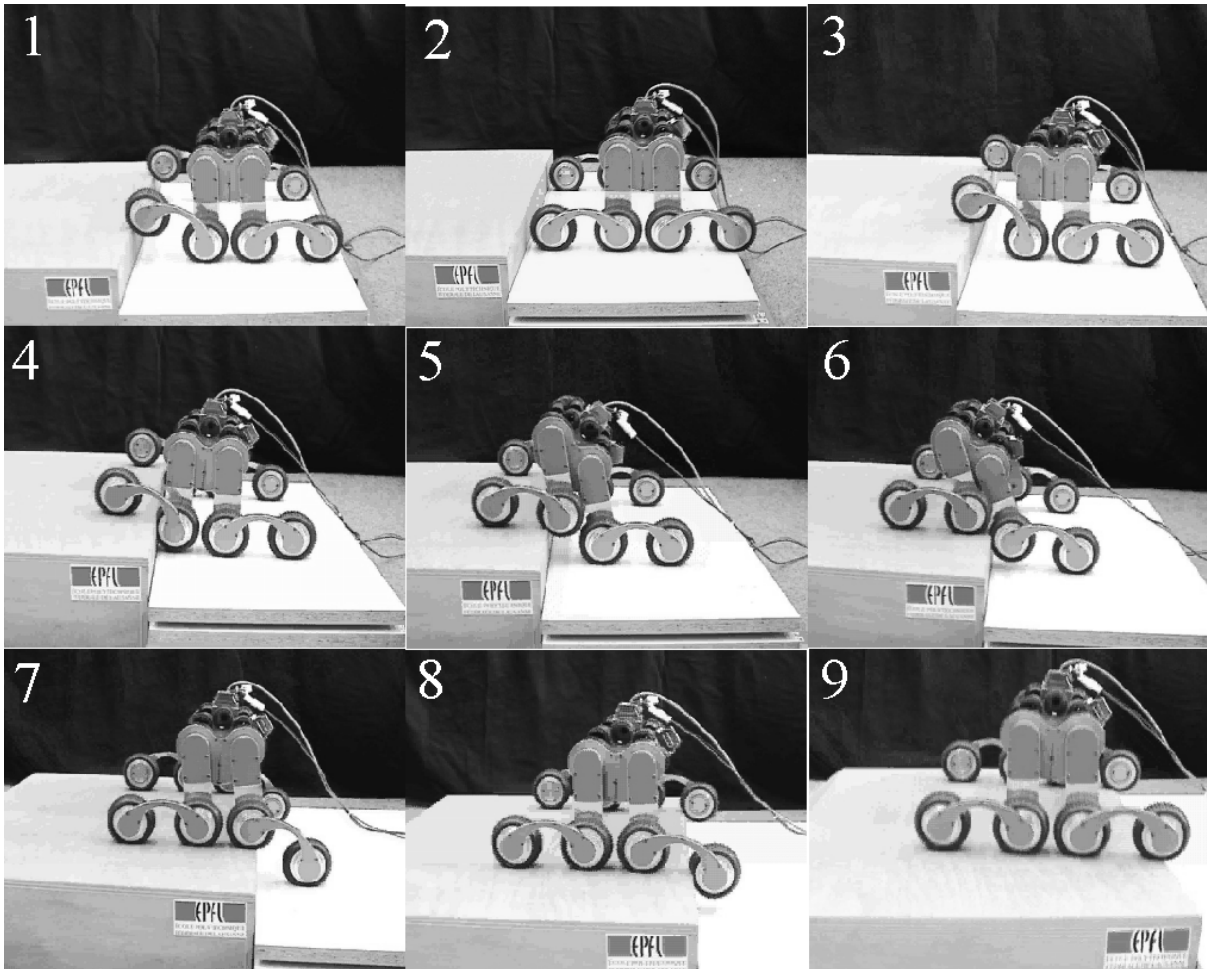


Figure 7.32: Franchissement totalement autonome d'une marche de la taille d'une roue

8

Conclusion et perspectives

L'objectif de cette thèse était d'étudier, de concevoir, de réaliser et de tester de nouvelles architectures de systèmes de locomotion ayant des capacités de franchissement autonome des obstacles rencontrés en milieu tout-terrain. Dans le cadre de ce travail, nous avons focalisé notre étude sur les mécanismes de locomotion roulants qui se déplacent suffisamment lentement pour que les effets dynamiques puissent être négligés. Deux classes de mécanismes ont été mis en évidence:

- les mécanismes à suspension passive qui s'adaptent automatiquement aux irrégularités du terrain sans aucun mécanisme de rétroaction actif
- les mécanismes à suspension active qui se basent sur une perception du relief du terrain afin de pouvoir contrôler la traction et la stabilité du véhicule en agissant sur des moteurs intégrés dans la structure

Dans le cadre de ce travail, plusieurs concepts novateurs ont été imaginés, réalisés et testés:

- *Shrimp* est un mécanisme de locomotion à suspension passive. Son architecture mécanique extrêmement simple lui confère une très grande robustesse. Ses capacités de franchissement autonome en milieu tout-terrain lui permettent de passer là où d'autres véhicules de même proportion restent bloqués.
- La *roue tactile* est un concept qui associe la perception tactile avec la fonction mécanique d'une roue. Ce travail a permis de démontrer sa faisabilité et son utilité pour améliorer les capacités de franchissement des robots tout-terrain.

- *Octopus* est un mécanisme de locomotion à suspension active. Son architecture mécanique extrêmement complexe lui confère une très grande agilité. Ses capacités de franchissement autonome en milieu tout-terrain dépendent des organes de perception et des algorithmes de contrôle qui ont également fait l'objet d'une recherche dans le cadre de ce travail. Le problème a été partiellement résolu grâce à l'utilisation des roues tactiles pour la détection des zones de contact avec le terrain. A l'heure actuelle, le prototype réalisé n'a pas encore démontré tout son potentiel de franchissement autonome car les roues tactiles réalisées ne permettent pas de mesurer les forces de contact avec la précision nécessaire.

Actuellement, les mécanismes à suspension passive sont arrivés à maturité et sont déjà utilisés dans des applications comme l'exploration planétaire. Cependant, les mécanismes à suspension active gardent un potentiel de franchissement inégalable passivement. Mais ces qualités ne peuvent être exploitées qu'au prix d'une intégration mécatronique de capteurs, de moteurs et d'algorithmes de contrôle spécialisés. La miniaturisation toujours plus poussée des composants électroniques, les matériaux émergents, les nouvelles techniques d'usinage et les nouvelles découvertes en intelligence artificielle permettent d'augmenter peu à peu le rayon d'action des robots mobiles. De nouvelles applications verront certainement le jour lorsque ces nouveaux concepts de locomotion à suspension active seront suffisamment robustes pour affronter le monde réel.

Littérature

Livres

- [Bamberger81] Bamberger, Y., *Mécanique de l'ingénieur I: Systèmes de corps rigides*, éditions Hermann, 1981.
- [Beer84] Beer, F. P., Johnston, E. R., *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*, Mc Graw-Hill, 1984.
- [Curnier00] Curnier, A., *Discrete Contact Mechanics*, Lecture Notes, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
- [Coiffet81] Coiffet, P., *Les Robots: Modélisation et Commande*, Tome 1, Hermes Publishing, 1981.
- [DelPedro01] Del Pedro, M., Gmür, T., *Elements de Mécanique des Structures*, aux édition PPUR (Presses Polytechniques Universitaires Romandes), 2001.
- [Erdman97] Erdman , A. G., Sandor, G., N., *Mechanism Design: Analysis and Synthesis*, Prentice Hall, 1997.
- [Goldstein02] Goldstein, Poole, Safko, *Classical Mechanics*, Third Edition, Addison Wesley, 2002.
- [Gruber88] Gruber, C., *Mécanique Générale*, aux édition PPUR (Presses Polytechniques Universitaires Romandes), 1988.
- [Hunt78] Hunt, K. H., *Kinematics Geometry of Mechanisms*, Calrendon Press, Oxford, 1978.

- [Jufer95] Jufer, M., *Traité d'électricité: électromécanique*, aux édition PPUR (Presses Polytechniques Universitaires Romandes), 1995.
- [Lallemand94] Lallemand, J.-P., Zeghloul, S., *Robotique: Aspects fondamentaux*, Masson, 1994.
- [Liebling00] Liebling, T. M., *Algèbre Linéaire: Une introduction pour ingénieurs*, Notes de cours, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.
- [Monard87] Monard, J.-A., *Cours de Physique: Electricité*, édité par la centrale d'achats de la ville de Bienne, 1987.
- [Petit Robert I] Robert, P., *Le Petit Robert*, Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française, édition de 1986.
- [Russell90] Russell, R. A., *Robot Tactile Sensing*, Prentice Hall, 1990.
- [Spinnler97] Spinnler, G., *Conception des machines: principes et applications Vol 1 Statique*, aux édition PPUR (Presses Polytechniques Universitaires Romandes), 1997.
- [Siegwart99] Siegwart, R., Nourbakhsh, I., *Autonomous Mobile Robots*, Lecture Notes, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999.

Articles

- [Alexander92] Alexander, R.M., *Mechanics of Animal Locomotion*, Advances in Comparative and Environmental Physiology, Springer-Verlag, 1992.
- [Baumgartner98] Baumgartner, E., Wilcox, B., Welch, R., Jones, R., *Mobility Performance of a Small-Body Rover*, International Symposium on Robotics wit Applications, World Automation Congress, Anchorage, 1988.
- [Dimmler00] Dimmler, M., Piguet, Y., *Intuitive Design of Complex Real-Time Control Systems*, in Proc. of 11th International Workshop on Rapid System Prototyping, RSP 2000, Paris, France, 2000.

- [Falcone03] Falcone, E., Gockley, R., Porter, E., Nourbakhsh, I., *The Personal Rover: The Comprehensive Design of a Domestic Personal Robot*, Robotics and Autonomous Systems, Special Issue on Socially Interactive Robots 42 (3-4), pp 245-258, 2003.
- [Featherstone00] Featherstone, R., Orin, D., *Robot Dynamics: Equations and Algorithms*, Proceedings of ICRA: pp. 826-834, San Francisco, April 2000.
- [Grand02] Grand, C., Ben Amar, F., Plumet, F., Bidaus, Ph., *Stability control of a wheel-legged mini-rover*, in Proceedings of the Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots, Published by Professional Engineering Publishing Limited, Bury St Edmunds and London, UK, 2002.
- [Guccione01] Guccione, S., Muscato, G., Virk, G. S., *Further Progress in the Development of the ROBOVOLC System*, in Proc. of the Fourth International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR, Germany, 2001.
- [Hirose98] Hirose, S., *Considerations on the design of Hyper-Redundant Versatile Robotic System*, in Proc. of TITech COE/Super Mechano Systems Workshop, 1998.
- [Iagnemma00] Iagnemma, K., Dubowsky, S., *Vehicle Wheel Ground Contact Angle Estimation with application to mobile robot traction control*, in proc. of 7th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Slovenia, 2000.
- [Iagnemma01] Iagnemma, K., Rzepniewski, A., Dubowsky, S., Pirjanian, P., Huntsberger, T., Schenker, P., *Mobile Robot Reconfigurability for Rogh Terrain*, In Proc. of SPIE's International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, 2000.
- [Kemurdjian92] Kemurdjian, A. L., Gromov, V., Mishkinyuk, V., Kucherenko, V., Sologub, P., *Small Marsokhod Configuration*, International Conference on Robotics and Automation, 1992.
- [Koyanagi99] Koyanagi, E., Yuta, S., *A development of a six wheel vehicle for indoor and outdoor environment*, in Proc. of Field and Service Robotics, Pittsburg, USA, 1999.

- [Kubota99] Kubota, T., Kuroda, Y., Kunii, Y., Natakani, Y., *Micro Planetary Rover Micro5*, in Proc. of Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, pp. 373-378, 1999.
- [Kumar90] Kumar, V., Waldron, K. J., *Force distribution in walking vehicles*, in Transactions of the ASME, vol 112, p 90-99, 1990.
- [Lamon03] Lamon, P., Siegwart, R., *3D-Odometry for rough terrain: Towards real 3D navigation*, in proc. of ICRA'03, Taiwan, 2003.
- [Leppänen98] Leppänen, I., Salmi, S., Halme, A., *WorkPartner, HUT Automation's new hybrid walking machine*, in Proc. of CLAWAR, Belgium, 1998.
- [Michaud02] Michaud, S., Schneider, A., Bertrand, R., Lamon, P., Siegwart, R., Van Winnendael, M., Schiele, A., Solero: Solar Powered Exploration Rover, in proc. of the 7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, The Netherlands, 2002.
- [Nicholls89] Nicholls, H. R., Lee, M. H., *A Survey of Robot Tactile Sensing Technology*, International Journal of Robotics Research, vol 8, no 3, 1989.
- [Nicoud95] Nicoud, J.-D., Mächler, Ph, Pemex-B: a low cost robot for searching anti-personnel mines, in proc. of WAPM, Lausanne, 1995.
- [Nicoud00] Nicoud, J.-D., *Robots Mobiles Miniatures*, Collection Techniques de l'ingénieur, Vol S 7 854, 2000.
- [Papadopoulos96] Papadopoulos, E. G., Rey, D. A., *A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators*, Proceedings of ICRA, Minneapolis, 1996.
- [Stone96] Stone, H. W., *Mars Pathfinder Microrover: A low-cost low-power Spacecraft*, in Proc. of the AIAA Forum on Advanced Developments in Space Robotics, Madison WI, 1996.
- [Uchida99] Uchida, Y., Furuichi, K., Hirose, S., *Fundamental Performance of 6-Wheeled Off-Road Vehicle HELIOS-V*, in Proc. of ICRA, 1999.

- [Yoshida02] Yoshida, K., Hamano, H., *Motion Dynamics of a Rover with Slip-Based Traction Model*, In Proc. of International Conference on Robotics and Automation, ICRA, pp.3155-3160, 2002.
- [Yoshida03] Yoshida, K., Watanabe, T., Mizuno, N., Ishigami, G., *Terra-mechanics-Based Analysis and Traction Control of a Lunar/Planetary Rover*, In Proc. of Field and Service Robotics, Japan, 2003.

Thèses

- [Apostolopoulos01] Apostolopoulos, D. S., *Analytical Configuration of Wheeled Robotic Locomotion*, dissertation submitted to the Robotics Institute of Carnegie Mellon University, Pittsburg, 2001.
- [Yim95] Yim, M., *Locomotion with a unit-modular reconfigurable robot*, dissertation submitted to the department of mechanical engineering of Standford University, 1995.

Rapports des projets d'étudiants supervisés

- [Baer03] Baer, D., *The I2C DC Motor Driver and Motion Controller*, rapport de projet de diplôme @ ASL-EPFL, supervisé par F.Mondada et M.Lauria , 2003.
- [Conti98] Conti, F., *Commande d'un robot mobile à travers une caméra vidéo*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria , 1998.
- [Corbat01] Corbat, O., *Contrôle du robot mobile tout-terrain Octopus*, rapport de projet de diplôme @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria et Y.Piguet, 2001.
- [Deschler99] Deschler, M., *Design et implémentation d'un régulateur vitesse/position universel pour moteur DC*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria et R.Meier, 1999.

- [Greppin99] Greppin, X., *Robot mobile tout terrain actif*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria et T. Estier, 1999.
- [Krebs03] Krebs, A., *Trajectory Controller for the Shrimp*, rapport de projet de diplôme @ ASL-EPFL, supervisé par P.Lamon et M.Lauria, 2003.
- [Lorotte99] Lorotte, A., *Robot omnidirectionnel pour Expo 2002*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria et F.Conti, 1999.
- [Meisser00] Meisser, M., Greppin, X., *WebCam mobile tout-terrain autonome*, rapport de projet de diplôme @ ASL-EPFL, supervisé par R.Piguet et M.Lauria , 2000.
- [Merminod99] Merminod, B., Crausaz, Y., *Robot Mobile tout terrain Shrimp*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria, R.Piguet et R.Siegwart, 1999.
- [Merminod00] Merminod, B., Crausaz, Y., *Nouvelle application pour le robot Shrimp*, rapport de projet de diplôme @ ASL-EPFL, supervisé par T.Estier et R. Piguet, 2000.
- [Meyer98] Meyer, R., *Touch Sensitive Wheel for Off-Road Mobile Robot*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria et R.Piguet, 1998.
- [Michaud01] Michaud, S., *Mini Shrimp*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria et T. Estier, 2001.
- [Pachoud99] Pachoud, A., *Démonstrateur pour roue tactile*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par M.Lauria et R.Piguet, 1999.
- [Viscarret99] Viscarret, U., *Interfaçage d'un moteur DC avec un régulateur vitesse/position*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé M.Lauria et R.Piguet, 1999.
- [Viscarret00] Viscarret, U., *Mise au point d'un système modulaire poue le prototypage rapide de robots*, rapport de projet de semestre @ ASL-EPFL, supervisé par R.Piguet et M.Lauria , 1999.

Nos publications

- [Bertrand99] Bertrand, R., Lauria, M., Mäusli, P., A., Schäfer, B., Schedl, M., Richter, L., Rieder, R., Van Winnendael, M., *Micro-Robots for Scientific Applications: Summary Report*, ESTEC Contract No 12052/96/NL/JG(SC), 1999.
- [Crausaz01] Crausaz Y., Merminod B., Wiesendanger M., Siegwart R., Lauria M., Piguet R., *Véhicule pour terrain accidenté*, European Patent Application EP 0081054.7, 21.1.2000.
- [Estier00] Estier, T., Crausaz, Y., Merminod, B., Lauria, M., Piguet, R. and Siegwart, R., *An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities*, In Proceedings of Space & Robotics, the Fourth International Conference and Exposition on Robotics in Challenging Environments, Albuquerque, USA, 2000.
- [Lauria98] Lauria, M., Conti, F., Mäusli, P.-A., van Winnendael, M., Bertrand, R. and Siegwart, R., *Design and Control of an Innovative Micro-Rover*, in Proceedings of the Fifth ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, The Netherlands, 1998.
- [Lauria99] Lauria, M., Conti, F. and Siegwart, R., *SpaceCat, a Micro-Rover based on an Innovative Locomotion Concept*, in Video Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, USA, 1999.
- [Lauria00] Lauria, M., Estier, T. and Siegwart, R., *An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities*, in Video Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA, 2000.
- [Lauria01] Lauria, M., Terrien, G., Piguet, R., Estier, T. and Siegwart, R., *Un robot mobile tout-terrain*, la Revue Polytechnique, no 8, août 2001, p. 455-456.
- [Lauria02] Lauria, M., Piguet Y. and Siegwart, R., *Octopus - An Autonomous Wheeled Climbing Robot*, in Proceedings of the Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots, Published by Professional Engineering Publishing Limited, Bury St Edmunds and London, UK, 2002.

- [Lauria03] Lauria, M., Shooter, S., Siegwart, R., *Topological Analysis of Robotic Ground Vehicles*, In Proc. of Field and Space Robotics, Japan, 2003.
- [Siegwart98] Siegwart, R., Lauria, M., Mäusli, P.-A. and van Winnendael, M., *Design and Implementation of an Innovative Micro-Rover*, in Proceedings of Robotics 98, the Third Conference and Exposition on Robotics in Challenging Environments, Albuquerque, USA, 1998.
- [Siegwart00] Siegwart, R., Estier, T., Crausaz, Y., Merminod, B., Lauria, M. and Piguet, R., *Innovative Concept for Wheeled Locomotion in Rough Terrain*, in Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Venice, Italy, 2000.
- [Siegwart02] Siegwart, R., Lamon, P., Estier, T., Lauria, M. and Piguet, R., *Innovative Design for Wheeled Locomotion in Rough Terrain*. Journal of Robotics and Autonomous Systems, Elsevier, 2002.

Curriculum Vitae



Nom:	Michel Lauria
Nationalité:	Italienne et Suisse
Date de Naissance:	17 mai 1974 (à Yverdon, Suisse)
Lieu d'origine:	Palagonia (CT) en Italie Prilly (VD) en Suisse
Etat Civil:	Marié
Contact:	michel.lauria@a3.epfl.ch

Education

1997	Diplôme Universitaire d'Ingénieur en Microtechnique Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
1992	Baccalauréat Scientifique et Maturité Fédérale Gymnase Cantonal de la Cité, Lausanne

Parcours Professionnel

Mars 1997 - juillet 2003	PhD Student, Laboratoire de Systèmes Autonomes, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Prof. Roland Siegwart
-----------------------------	--