

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE DE BATNA**

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'Electrotechnique

**Mémoire de Magister**

---

En Electrotechnique Option: Electricité industrielle

Présenté par :

**BABESSE SAAD**

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université de Sétif

**THEME**

**CONTRIBUTION A LA SIMULATION ET AU CONTROLE  
D'UN MINIROVER SOUS L'EFFET DE L'INTERACTION  
ROUE/SOL**

Soutenu le : 21 / 10 / 2008 devant le Jury composé de

<b>Jury</b>	<b>Grade</b>	
<b>Qualité</b>		
Dr. N.SLIMANE	Maître de conférences, Batna	Président
Dr. D. AMADDAH	Maître de conférences, Batna	Rapporteur
Dr .M.N. HARMAS	Maître de conférences, Sétif	Examineur
Dr. A.LOUCHENE	Maître de conférences, Batna	Examineur
Dr. M.BENBOUZA	Maître de conférences Batna	Examineur

**\* Année 2008 \***

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du département d'Electrotechnique de l'université de Batna. J'adresse mes sincères remerciements à :

Monsieur Slimane Noureddine, maitre de conférences au département d'Electronique de l'université de Batna, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance du présent mémoire de magister. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance ainsi que ma sincère gratitude.

Monsieur Ameddah Djamel-Eddine, Maitre de conférences au département d'Electronique de l'université de Batna, qui a bien voulu proposer le thème de magister et qui a su diriger le présent travail de recherche avec clairvoyance, disponibilité et patience. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

Monsieur Louchene Ahmed, Maitre de conférences au département d'Electronique de l'université de Batna, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en acceptant d'évaluer ce mémoire et d'être membre de jury. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements et de mon profond respect.

Monsieur Harmas Med-Nadjib, Maitre de conférences au département d'Electrotechnique de l'université de Sétif, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et sa patience pour évaluer ce mémoire et d'être membre de jury. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Monsieur Benbouza Med –Salah, Maitre de conférences au département d'Electrotechnique de l'université de Sétif, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et sa patience pour évaluer ce mémoire et d'être membre de jury. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants du magister, pour leur clairvoyance, disponibilité et patience, tout le long de mes études de post-graduation et spécialement le docteur D.Ameddah qui a su, par son cours sur la modélisation des robots, m'orienter vers la robotique mobile.

A tous ceux qui ont permis la réalisation de ce travail, j'exprime ici ma profonde reconnaissance et spécialement Monsieur Ghebrou Sahraoui, qui a m'encouragé et m'a aidé dès le début dans ce domaine de robotique.

A mes parents, mes frères et sœurs  
Et tous mes amis  
A tout je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS	
RESUME /ABSTRACT	
NOTATIONS ET SYMBOLES	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>Chapitre -1- systèmes de locomotion des robots</b>	
1.1-DEFINITION DE LA LOCOMOTION.....	7
1.2-LA PROBLEMATIQUE DE LA LOCOMOTION ROBOTIQUE.....	8
1.2.1-ROBOTS A ROUES.....	8
1.2.1.1- EXEMPLES DE ROBOTS MOBILES A ROUES.....	9
1.2.1.1.1- ROBOTS A CHASSIS RIGIDE.....	9
1.2.1.1.2- ROBOTS A MOBILITE PASSIVE A CHASSIS SUSPENDU.....	9
1.2.1.1.3- SYSTEMES A ROUES AVEC MOBILITES INTERNES ACTIVES.....	11
1.2.2- ROBOTS A CHENILLES.....	13
1.2.3- ROBOTS A PATTES.....	13
1.2.3- ROBOTS A LOCOMOTION APODE.....	14
1.3- ELEMENTS COMPOSANT UN SYSTEME LOCOMOTEUR.....	15
1.3.1- ORGANES DE SUSTENTATION .....	15
- ROUES RIGIDES ET ROUES DEFORMABLES.....	15
1.3.2- LE SYSTEME DE PROPULSION.....	16
1.3.3- LE SYSTEME DE DIRECTION .....	16
1.3.3.1- ROTATION PAR VITESSES DIFFERENTIELLES (TYPE CHA.....	16
1.3.3.2- ROTATION A CHASSIS ARTICULE.....	16
1.3.3.3 ROTATION AVEC SYSTEME DE DIRECTION COORDONNE (EPURE DE JEANTAUD)...	16
1.3.3.4- ROTATION AVEC ROUES DIRECTRICES INDEPENDANTES.....	17
1.3.4- LE SYSTEME DE SUSPENSION.....	17
1.4- INDICES DE PERFORMANCE D'UNE LOCOMOTION.....	17
1.5- COMPORTEMENT HOLONOME ET NON HOLONOME D'UN ROBOT MOBILE.....	17
1.6- DESCRIPTION DU MODE DE LOCOMOTION DU ROBOT D'EXPLORATION PLANETAIRE...	19
1.7- CONCLUSION.....	20
<b>Chapitre -2- Etude de l'interaction roue/sol</b>	
2.1- SCIENCE DE LA TERRAMECANIQUE.....	23
2.2 PRECEDENTS TRAVAUX DANS LE DOMAINE DE L'INTERACTION ROUE/ SOL.....	24
2.3 PRESENTATION DE L'INTERACTION ROUE/ SOL .....	25

2.4 DIFFERENTES APPROCHES DE LA TERRAMECANIQUE.....	26
2.4.1 METHODES EMPIRIQUES (WES, NRMM) [GRAND 04] .....	27
- PENETROMETRE A CONE.....	27
2.4.2 METHODES ANALYTIQUES.....	29
2.5 PRESENTATION DES CARACTERISTIQUES DU SOL AVEC LE PENETROMETRE.....	30
2.5.2 INDICE DE LA PRESSION DU SOL .....	30
2.5.3 COEFFICIENT DE RESISTANCE DE ROULEMENT.....	30
2.6 MODELISATION DES TERRAINS NATURELS (SOLS) .....	32
2.6.1 CARACTERISATION DES SOLS.....	33
2.6.2 LES LOIS SEMI EMPIRIQUES DU COMPORTEMENT DU SOL.....	33
2.6.2.1 RELATION PRESSION – ENFONCEMENT.....	34
2.6.2.2 CRITERE DE RUPTURE DE MOHR-COULOMB.....	35
2.6.2.3 TECHNIQUE DE BEVAMETRE .....	36
2.6.2.4 RELATION EN CISAILLEMENT .....	38
2.7 EVALUATION DU COMPORTEMENT DE L’INTERACTION ROUE SOL PAR SIMULATION....	40
2.8 DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE L’INTERACTION ROUE/SOL.....	46
2.9. MODELE DE LIAISON ROUE/SOL BASE SUR L’APPROCHE DE LA TERRAMECANIQUE....	47
2.9.1. CAS D’UNE ROUE RIGIDE ET D’UN SOL MEUBLE.....	47
2.9.1.1. TAUX DE GLISSEMENT ET ANGLE DE GLISSEMENT.....	47
2.9.1.2. ENFONCEMENT DE LA ROUE.....	48
2.9.1.3 ANGLE DE CONTACT D’UNE ROUE.....	49
2.9.1.4 DISTRIBUTION DES EFFORTS SOUS UNE ROUE.....	51
2.9.1.5 EVALUATION DES DIFFERENTES FORCES AGISSANT SUR LA ROUE.....	55
2.9.1.5.1 FORCE DE TRACTION NETTE (DRAWBAR PULL $F_x$ ).....	55
2.9.1.5.2 FORCE VERTICALE ( $F_z$ ).....	55
2.9.1.5.3 FORCE LATERALE (TRANSVERSALE) $F_y$ .....	55
2.9.1.6 COUPLE APPLIQUE SUR LA ROUE.....	58
2.9.1.7 EVALUATION DE L’EFFORT DE RESISTANCE AU ROULEMENT.....	58
- APPLICATION SUR LE MINI MINIROVER.....	59
2.9.2 MODELE DE L’INTERACTION ROUE/ SOL SUR UN PLAN INCLINE.....	62
- SIMULATION DE L’INTERACTION ROUE/SOL SUR UN PLAN INCLINE.....	65
2.10 CONCLUSION.....	67

### **Chapitre -3- Modélisation du Minirover**

3.1. FONDEMENTS THEORIQUES.....	69
- DEVELOPPEMENT DU MODELE CINEMATIQUE.....	70
3.2. MODELISATION GEOMETRIQUE ET CINEMATIQUE DU MINI MINIROVER.....	77
3.2.1 MODELISATION GEOMETRIQUE PAR LA METHODE DE DENAVIT HERTENBERG...77	
3.2.2 MODELISATION CINEMATIQUE DU MINIROVER.....	80
3.3 CONCLUSION .....	86

### **Chapitre -4- Simulation du mouvement du Minirover**

4.1 ALGORITHME DE CALCUL [SPACEDYN] .....	88
4.1.1 SYSTEME DE COORDONNEES.....	88
- APPLICATION SUR LE MINIROVER [Gén 07].....	89
4.1.2. MATRICE DE TRANSFORMATION DE COORDONNEES.....	90
4.1.3 VECTEURS DE LIAISONS.....	92
4.1.4 ARTICULATION ROTOIDE.....	92
4.1.5 ARTICULATION PRISMATIQUE.....	93
4.1.6 CINEMATQUES DU POINT TERMINAL.....	93
4.2 EQUATION DU MOUVEMENT D'UN SYSTEME ARTICULE A BASE MOBILE.....	94
4.3 EQUATION DYNAMIQUE : PROCEDURE DE SIMULATION.....	96
4.4 DYNAMIQUE INVERSE.....	96
4.5 EQUATION DU MOUVEMENT DU MINIROVER.....	98
4.6 SIMULATION DU MOUVEMENT DU MINIROVER.....	99
4.7 RESULTATS DE SIMULATION.....	104
4.8 CONCLUSION.....	110
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	112
ANNEXES.....	115
BIBLIOGRAPHIE.....	119

## NOTATIONS ET SYMBOLES

### Paramètres du terrain :

Cohésion du sol.

Angle de frottement des particules du sol [ $^{\circ}$ ].

Module de pressions /enfoncement (coefficient de frottement entre les particules du

sol)  $\left[ \frac{N}{m^n} \right]$

: Angle de destructions du sol [ $^{\circ}$ ].

: Exposant d'enfoncement.

Densité volumique du sol  $\left[ \frac{Kg}{l} \right]$ .

: Taux d'enfoncement de la roue.

### Paramètres du Mini-Over

r : Rayon de la roue[m].

b : Largeur de la roue[m].

W : poids total du rover.

: Angle de suspension du Mini-Over [ $^{\circ}$ ].

: Angles de direction de chaque roue i du Mini-Over [ $^{\circ}$ ].

### Paramètres du contact roue/sol

A : Surface du plateau ou surface du contact de la roue [m].

z : Enfoncement statique de la roue [m].

Z : Enfoncement dynamique de la roue[m].

s : Taux de glissement.

Angle de contact de chaque roue i dans un plan incliné [ $^{\circ}$ ].

: Angle de glissement latéral [ $^{\circ}$ ]

Angle d'entrée de la roue dans le sol [ $^{\circ}$ ].

Angle de sortie de la roue du sol [ $^{\circ}$ ].

Angle correspondant à l'effort de cisaillement maximal [ $^{\circ}$ ].

$\sigma$ : Effort normal à un angle donné [N].

$\tau$  Effort de cisaillement à un angle donné  $\theta$  [ $\frac{N}{l}$ ].

: Déplacement relatif du sol suivant X.

: Déplacement relatif du sol suivant Y.

: Module de déplacement en cisaillement suivant X.

: Module de déplacement en cisaillement suivant Y0

Résistance du bulldozing [N].

. Résistance au roulement (résistance due à la compaction du sol ) [N].

Force de traction nette agissant sur la roue suivant X [N].

. Force latérale agissant sur la roue suivant Y [N].

Force verticale agissant sur la roue suivant Z [N].

Force latérale produite par l'effort de cisaillement latérale sous la roue [n].

Force de réaction générée par le bulldozing sur la face latérale de la roue [N].

T : couple résistant de la roue [N.M].

: Angle entre l'axe X du modèle du terrain plat et l'axe X du modèle du terrain incliné [ $^{\circ}$ ].

: Angle entre l'axe Y du modèle du terrain plat et l'axe Y du modèle du terrain incliné [°].

: Angle entre l'axe Z du modèle du terrain plat et l'axe Z du modèle du terrain incliné [°].

**{ $\Sigma_0$ }** : *Repère de coordonnées de la roue du Minirover dans le plan horizontal.*

**{ $\Sigma$ }** : Repère de coordonnées de la roue du Minirover dans le plan incliné.

**{}** : Repère de référence d'inertie, qui est pris comme repère de référence de tous les vecteurs de positions et de vitesses.

$\vec{v}_i$  : Vecteur du glissement de chaque roue  $i$  du Minirover dans un sol rigide.

$d_i$  : Distance du glissement latéral relatif au mouvement de translation [m].

$l_i$  : Distance du glissement longitudinal relatif au mouvement de translation [m].

$(X, Y, Z)$  : position du Minirover dans le repère de référence d'inertie [m].

$(\phi, \theta, \psi)$  : Angles de roulis, tangage et lacet du Minirover dans le repère de référence [°].

**Epure** : dessin représente une projection d'une machine.

**Meuble** : pouvant se déplacer.

**Mode péristaltique** : mouvement d'un organe tubulaire.

**Odomètre** : instrument technique mesurant la distance parcourue.

**Omnidirectionnelle** : mouvement dans toutes les directions.

**Pantographe** : Instrument qui permet de reproduire un dessin en mouvement d'un corps.

**Pérégrination** : Série de déplacements de nombreux endroits.

**Pivot** : pièce arrondie sur laquelle tourne un corps.

**Révolution** : mouvement circulaire (de rotation).

**Rhéologique** : comportement de la matière en fonction de sa plasticité, sa viscosité lorsqu'elle est soumise à des déformations.

**RMA** : Robot mobile articulé.

**RMR** : Robot mobile à roues.

**Spacedyn** : Ensemble de programmes écrits en langage 'Matlab' dédiés aux systèmes polyarticulé à base mobile, afin de résoudre leurs équations du mouvement.

**Sustentions** : Action de maintenir un organe sur le terrain.



# Introduction Générale

## INTRODUCTION GENERALE

Les robots mobiles tout terrain trouvent leurs applications de nos jours dans plusieurs domaines, on identifie principalement l'exploration terrestre (polaire et volcanologique) ou planétaire (lune, mars) ainsi que les applications militaires ou civiles pour l'observation et la surveillance dans des environnements naturels, urbains voir déstructurées. Les sols sur lesquels doivent évoluer ces engins présentent par endroit des difficultés de traversabilité majeures. Ces difficultés se traduisent à la fois en terme de géométrie de la surface (discontinuités, relief 3D, densité de roches...) et de nature physique du sol (sol meuble, sol non cohésif, sable, éboulis,...). Ces types d'environnement complexe nécessitent des systèmes de locomotion à haute capacité de mobilité et de franchissement. Les systèmes hybrides qui combinent à la fois des organes roulants (roues ou chenilles) avec des mobilités internes conjuguent à la fois les avantages des systèmes à roues et ceux des systèmes à pattes à savoir la rapidité de déplacement pour le premier et la capacité de franchissement pour le second. Ces systèmes roue - patte, illustrées par le robot Hylos ou le robot Hybtor (ou Workpartner) [Grand 04], sont dit à haute mobilité, du fait de leur redondance cinématique. Ils introduisent un concept générique de locomotion appelée "rolking". Outre le mode basique par roulement (adapté aux routes, terrains plats avec des faibles pentes et de faibles irrégularités), on distingue pour ces systèmes le mode de roulement avec reconfiguration (adaptée au franchissement de fortes pentes et dévers), le mode péristaltique (adaptée au passage de sols non cohésifs) ou encore des modes ambulatoires basées sur la définition d'allure de déplacement plus ou moins complexe.

Par ailleurs, la simulation et le contrôle de tels robots nécessitent une identification des paramètres physiques et géométriques du sol sur lequel ils évoluent. On doit donc évaluer les forces de contact roue sol (longitudinale, latérale et verticale), en identifiant les paramètres du terrain tel que : la cohésion, les modules de pression enfoncement, l'angle de frottement...par des autres essais.

Les équations de ces forces montrent qu'elles dépendent essentiellement de deux variables : le taux de glissement et l'angle de glissement. L'estimation des valeurs de ces variables peut aider par la suite de développer un algorithme permettant de résoudre l'équation du mouvement du robot, et donc, de générer dans l'espace virtuelle la trajectoire suivie par son centre de gravité : c'est le contexte que se situe notre travail.

Le premier chapitre présente les différents types de robots rencontrés, la problématique de locomotion, ainsi la description du mode de locomotion du robot étudié. Le second chapitre consiste en l'étude de l'interaction entre la roue et le sol, les différentes approches de la terramecanique, ainsi les équations utilisées pour l'évaluation des forces de contact entre une roue, que soit rigide ou déformable, et le terrain de locomotion et différents essais en simulation du comportement du robot sur différents types de terrains . Le troisième chapitre est consacré à la modélisation géométrique et cinématique du robot mobile articulé par la méthode de Denavit Hertenberg et les résultats, et finalement le quatrième chapitre présente un fondement théorique de la technique exploitée par les auteurs de [spacedyn 00], pour trouver la solution de l'équation du mouvement des robots mobile articulé et la simulation du robot d'exploration planétaire choisi, et la trajectoire générée durant la simulation et on termine par une conclusion générale et perspectives.

# Chapitre01

SYSTEMES DE LOCOMOTIONS DES ROBOTS

Si l'on désire contrôler le mouvement d'un corps, il est nécessaire de pouvoir contrôler ces forces, notre Allah avec sa puissance illimitée et sa sagesse majeure a pu facilement 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 créé 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.

La particularité des robots d'exploration, c'est qu'ils regroupent certaines caractéristiques propres aux robots mobiles à roues ainsi que d'autres propres, celles-ci aux robots mobiles à pattes. En effet, chaque mode de locomotion possède des atouts et des inconvénients qui lui sont particuliers. Ainsi, les robots utilisant des roues bénéficient de la vitesse ainsi que de la stabilité que leur confère cette configuration, cependant, en général, l'absence ou la faiblesse des débattements des suspensions limite grandement les capacités de franchissement du véhicule si l'on doit se déplacer sur un terrain naturel au relief tourmenté et aux obstacles inconnus. A l'inverse, les systèmes de locomotion à pattes jouissent d'une grande facilité en ce qui concerne l'adaptation au relief et l'évitement d'obstacles, mais ils souffrent d'un manque de stabilité qui rend leur contrôle assez ardu si on veut leur éviter le faux pas. Ces systèmes sont également condamnés à la

lenteur pour des raisons liées elles aussi au contrôle du mouvement des pattes, surtout si l'on commence à considérer la question des allures dynamiques. C'est pourquoi, il est apparu intéressant de développer des systèmes

qui combinent les avantages des pattes et des roues. A savoir, l'adaptabilité au terrain des premières et la stabilité ainsi que la rapidité des secondes.

C'est donc dans ce cadre et dans la perspective de missions d'exploration planétaire que des engins de ce type ont été mis au point comme le Mini Rover du L.R.P. et son homologue le LAMA expérimenté, du LAAS de Toulouse. A l'instar de ce dernier, le Mini Rover fait partie des robots à locomotion hybride car il dispose, en plus du classique roulement, d'un mode appelé locomotion péristaltique qui s'apparente à des mouvements de reptation de la part du robot. Ce mode doit permettre au robot de franchir plus aisément des pentes prononcées où le mode de roulement serait moins efficace. En effet, dans ce cas de figure, pour le mode de roulement, la résultante des forces normales au contact est perpendiculaire à la surface de la pente, et de ce fait, elle n'intervient pas dans la traction du véhicule. En mode dit péristaltique, cette résultante a une incidence positive sur la traction car elle se situe sur l'arrière de la roue.

Les principales caractéristiques du Minirover LAMA, et est d'être constitué structurellement de quatre roues dont la suspension possède deux degrés de liberté. Ceci doit lui permettre de conserver constamment les quatre roues au sol, ce qui assure un gain en stabilité ainsi que le contrôle de la configuration de la plate-forme tout en améliorant les capacités de franchissement de terrain accidenté. L'adaptabilité Je la suspension permet également d'optimiser l'équilibre entre les forces de traction et la charge. De plus, comme indiquer plus haut, le robot a donc la possibilité d'exploiter le mode de locomotion péristaltique. Enfin, l'ensemble de ces propriétés doit amener à une réduction du glissement et un meilleur contrôle en rendant par exemple, l'odomètre- appareil mesurant la distance franchie par le robot- plus fiable.

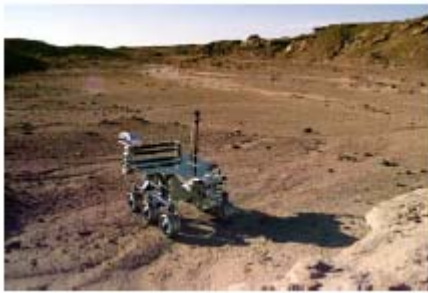
La figure 1.1 représente quelques exemples d'environnements naturels que peut le robot les franchir.



(a) terrain accidenté



(b) Normad en Antarctique.



(c) désert de l'Atacama (Chili)



(d) Dunes de sable

**Fig. 1.1.** Exemples d'environnements naturels variés.

### 1.1 Définition de la locomotion

Tout système capable de se déplacer possède une faculté de locomotion [Lau 03], donc, 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*.

Le principe d'un système de locomotion terrestre est de transmettre des efforts au corps à déplacer, équilibrant les efforts de résistance au mouvement (force de gravité, résistance de l'air, ...). La transmission de ces efforts est obtenue par un mécanisme de propulsion. La capacité de locomotion d'un système dépend fortement de son mécanisme

de propulsion, des organes de sustentation, mais aussi de la nature physique du sol et de sa capacité à supporter les efforts de sustentation et de propulsion du véhicule [Grand 04].

## **1.2 Problématique de la locomotion robotique :**

On distingue plusieurs types de système locomoteur, suivant la nature et le mode d'actionnement des corps générant les efforts de propulsion entre le sol et le robot [Le 99]:

### **1.2.1 Robots à roues :**

La première réponse au problème de locomotion robotique est l'utilisation de roues.

La gamme de robots basés sur cette solution technologique est très étendue en allant du plus simple robot à commande différentielle et roue folle au plus complexe, disposant d'un châssis polyarticulé actifs. Il est évident que les performances de ces robots, en termes de mobilité, ne sont pas identiques.

Les plus simples des robots à roues sont les robots à châssis non articulé à deux roues motrices et roues folles. Ces robots de conception très simple et peu coûteux disposent généralement d'une mobilité restreinte à un monde plan. De plus, le non holonomie de ce type de plates-formes roulantes induit des problèmes de génération de trajectoire. Dans le même cadre applicatif de mobilité sur sols plans, on pourra citer les robots à roues omnidirectionnelles permettant la réalisation de mouvements complexes.

En termes de mobilité, les solutions les plus intéressantes basées sur l'utilisation de roues sont des robots à châssis articulés ou disposant de suspensions à grand débattement.

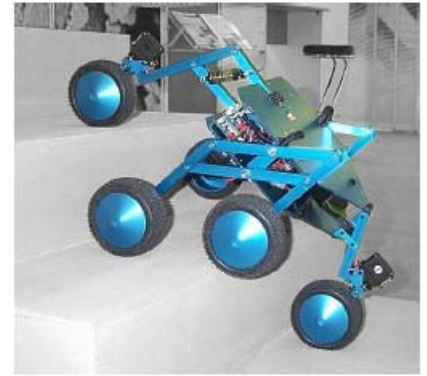
Les travaux originaux menés à l'EPFL, dont le Shrimp III (figure 1.2) est le résultat sont une bonne illustration des capacités de franchissement dont peuvent disposer les structures à châssis polyarticulé. BlueBotics propose une version commerciale de ce robot à structure passive pour des applications de navigation en extérieur sur terrains irréguliers. La stabilité intrinsèque de cette structure ainsi qu'une relative simplicité de commande sont obtenues par le biais de l'utilisation d'articulations passives. Le problème principal des robots à 4 roues est la présence d'une zone morte du point de vue de la locomotion. En effet, le robot peut rester bloqué sur un obstacle en un point milieu de son châssis si la garde au sol n'est pas suffisante. Les châssis articulés et l'augmentation du nombre de roues sont une réponse partielle à ce problème. L'augmentation du nombre de roues est à



relativiser car elle implique généralement une diminution du rendement énergétique due au glissement.



(a) Hylos(LRP6)



(b) Shrimp III(EPFL)



(c) WorkPartner

**Figure.1.2.** Exemples des robots à roues.

### 1.2.1.1 Exemples de robots mobiles à roues :

Il existe trois types de robot mobiles selon leurs structures :

#### 1.2.1.1.1 Robots à châssis rigide :

Qui n'ont pas de capacité d'adaptation avec le terrain (véhicules simples).

#### 1.2.1.1.2 Robots à mobilité passive à châssis suspendu :

Les robots de cette classe de système sont capables d'adapter leur configuration aux variations locales de la géométrie du terrain. Le principal objet des systèmes de suspension passifs est le maintien de contact sous chaque roue, améliorant ainsi la stabilité et la propulsion du système. Cependant, les systèmes articulés passifs ne permettent pas l'optimisation de la distribution des efforts de contact et de la propulsion associée. De plus, leur marge de stabilité est limitée par la capacité du système de suspension, liés principalement aux d'abattements et la topologie du mécanisme articulé (orientation relative des articulations). La figure 1.3 présente quelques robots illustrant ce type de système locomoteur.



Spirit (JPL/NASA)



Shrimp (EPFL/ASL)



Nomad (CMU/RI)



Rocky 8 (JPL/Caltech)

**Figure.1.3.** quelques robots mobiles à mobilités internes passives.

La série des robots Rocky, développés au JPL du Caltech [grand 04], sont des systèmes à 6 roues motrices dont 4 sont orientables. Ils sont identiquement conçus autour

d'un système de suspension de type bogie. L'exploration de la surface de Mars, en janvier 2004, par les robots Spirit et Opportunity sur les sites respectifs de « Gusev crater » et « Meridiani Planum », sont des exemples d'utilisation de ce type de robots.

Le robot Shrimp développé à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) est un système à 6 roues capable de franchir des marches d'une hauteur égale à deux fois le diamètre de ces roues. Les 6 roues sont motrices et seules les deux roues situées à l'avant et l'arrière du robot sont orientables. Les quatre autres roues sont fixées deux à deux sur des mécanismes parallèles de suspension. La roue avant est montée sur une fourche articulée avec un mécanisme à pantographe passif dont le centre instantané de rotation se trouve sous le centre de la roue. Ce système permet au robot de franchir des obstacles sans avoir recours à un mécanisme d'actionnement spécifique.

Le robot Namad a été développé en Robotics Institute de l'Université de Carnegie Mellon, il utilise 4 roues motrices et orientables indépendantes qui sont fixées sur un mécanisme à barres déployable. Ce mécanisme est composé de deux sous-ensembles reliés par un système de différentiel qui joue, ici, le rôle de suspension passive. La spécificité de ce robot réside dans son châssis déployable qui constitue un système de direction particulier.

Ce robot a été mis en œuvre dans le cadre d'une mission de recherche de météorites en antarctique.

#### **1.2.1.1.3 Systèmes à roues avec mobilités internes actives**

Cette catégorie de robot inclut les systèmes de locomotion à roues dont le châssis dispose de liaisons internes actionnées. Ces systèmes sont capables d'optimiser, au moins partiellement, leur configuration afin d'améliorer leurs performances de locomotion en terme de stabilité, de franchissement et de consommation d'énergie. De plus, certains de ces systèmes peuvent se mouvoir avec des modes de déplacement auxiliaires tels que les modes rampants de type péristaltique



GoFor (JPL/CalTech)



Hybtor (HUT)



SRR (JPL/CalTech)



Lama (Alcatel/Espace)



Octopus (EPFL/ASL)



Nano Rover (JPL/CalTech)

**Figure.1.4.** Exemples de systèmes articulés à mobilité active.

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, de nouvelles applications verront certainement le jour lorsque ces nouveaux concepts de locomotion à suspension active seront suffisamment robustes pour affronter le monde réel.

Les robots dont les roues se trouvent à l'extrémité d'un mécanisme de type patte entrent aussi dans cette catégorie (robots hybrides roues- pattes).

Certains robots combinent des mécanismes locomoteurs bien différents, tels que le Roller- Walker de l'Université Technologique de Tokyo ou Azimut de l'Université de Sherbrooke, Canada, qui disposent de véritables capacités de locomotion multimodale, et le robot Hylos développé au LRP.

### 1.2.2 Robots à chenilles

Les robots à chenilles présentent une alternative aux robots à roues, ils ont longtemps été délaissés pour des raisons de rendement énergétique. En effet, du fait du glissement obligatoirement induit par l'utilisation de chenilles, la dépense énergétique d'une rotation sur place de la structure est élevée. De plus, ces phénomènes de glissement impliquent de mauvais résultats du point de vue de l'odomètre, néanmoins, les problèmes de zones mortes observables sur les robots à roues sont minimisés par l'utilisation de chenilles. Enfin, l'utilisation de chenilles permet de répartir le poids du robot sur toute la surface de contact.



(a) ROBHAZ-DT3(KIST)\_version militaire



b) PackBot(iRobot)

**Figure.1.5.** Exemples des robots à chenilles

On obtient ainsi de bonnes performances de progression sur des sols meubles.

### 1.2.3 Robots à pattes

Les robots à pattes regroupent un grand nombre de robots assez différents : bipèdes, humanoïdes, hexapodes, quadrupèdes. L'avantage de la plupart de ces robots est qu'ils sont potentiellement capables de progresser sur les mêmes terrains que leurs modèles.

Toutefois, cette caractéristique reste un objectif à atteindre à moyen et long terme.

Les problèmes liés à l'utilisation de pattes pour la robotique sont la stabilisation de la locomotion et la gestion d'un nombre élevé de degrés de liberté.



(a) BigDog (BostonDynamics)



(b) HRP-3P (Kawada)

**Figure.1.6.** Exemples des robots à pattes.

### 1.2.4 Robots à locomotion apode

On utilise les éléments de structure du robot pour générer et appliquer au sol les efforts de propulsion. Le robot est le plus souvent revêtu d'une peau assurant un bon coefficient d'adhérence pour la transmission des efforts et un faible frottement dans le sens

du déplacement. La locomotion est de type ondulatoire et consiste à générer un déplacement net par une déformation périodique de sa structure. Les modes de déplacement sont, par exemple, ceux du serpent (ondulation horizontale) ou du lombric (ondulation verticale) [Grand 04].

### **1.3 Eléments composant un système locomoteur :**

Nous nous intéressons plus particulièrement aux véhicules tout-terrains à roues dont le système locomoteur est généralement composé des éléments suivants [grand 04] :

- **Le système de sustentation,**
- **Le système de propulsion,**
- **Le système de direction,**
- **Le système de suspension.**

#### **1.3.1 Organes de sustentation :**

Le système de sustentation est composé des organes par lesquels le véhicule repose sur le sol. Ils ont pour fonction d'assurer l'équilibre statique du véhicule et d'absorber les perturbations dues aux petites variations géométriques du sol (rugosité). De plus en assurant le contact du véhicule avec le sol, ils doivent permettre une bonne transmission des efforts de propulsion. Enfin, la contrôlabilité du système dépend, entre autre, de leur géométrie.

Le système de sustentation comprend des organes de contact, il existe plusieurs classes des organes de contact ; qui se caractérisent par une géométrie de surface de contact et les propriétés mécaniques de cette surface. On va s'intéresser dans ce qui suit du travail aux roues. Les roues 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. On distingue:

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

#### **➤ Roues rigides et roues déformables :**

Il est nécessaire d'avoir un critère de discernement pour pouvoir distinguer entre une roue rigide ou déformable. Alors, une roue à pression pneumatique est considérée rigide si la pression de gonflage est supérieure par rapport à la rigidité (dureté) du sol [Bekker 69].

Les roues rigides retiennent un diamètre de roulement constant et une forme de section de croisement sous n'importe quelle charge, et incluent des roues métalliques dures ou à pneus solides non métalliques. Tandis que les roues déformables se dévient par au moins 10% du diamètre de roulement ; leurs pneus sont construits par des parois minces non métalliques et incluent basses à moyennes pression pneumatiques des pneus.

### **1.3.2 Le système de propulsion**

Le mécanisme de propulsion dépend des capacités d'actionnement des mobilités cinématiques du système de corps composant le robot. Ainsi, pour les robots à roues la propulsion peut-être obtenue par actionnement des roues ou des articulations internes du châssis (tel que sur le robot Lama, par exemple) [Grand 04]. Au système de propulsion sont associés les modes de locomotion qui peuvent être multiples, comme nous le verrons, dans le cas des structures à mobilités internes actives par la suite.

### **1.3.3 Système de direction**

Le système de direction dépend du type de locomotion. La locomotion à roues suppose la conception de mécanismes particuliers permettant de modifier la direction d'avance du véhicule. Il existe, dans ce cas, une grande variété de système et nous présentons les plus classiques.

#### **1.3.3.1 Rotation par vitesses différentielles (type char)**

Dans ce cas, les axes de rotation des roues ne sont pas orientables par rapport à la plate-forme. La mise en rotation de la plate-forme est obtenue en réglant les vitesses et sens de rotation des roues sur les deux cotés opposés du châssis. Dans ce mode, le rayon de braquage du véhicule est fonction de la différence de vitesse entre les roues opposées.

#### **1.3.3.2 Rotation à châssis articulé**

Le système est équipé d'un châssis composé de deux ou plusieurs parties orientables, les unes par rapport aux autres, par des liaisons pivots. Ces liaisons peuvent



être actives ou passives. La manœuvrabilité du véhicule augmente avec le nombre de mobilités actives, mais la complexité de la commande devient alors plus importante. Les systèmes équipés d'un axe de direction articulé sont un cas particulier de ce type de mécanisme de direction.

#### **1.3.3.3 Rotation avec système de direction coordonné (épure de Jeantaud)**

Ces systèmes utilisent un couplage mécanique assurant une rotation coordonnée des roues de façon à satisfaire les contraintes cinématiques du véhicule. La direction à épure de Jeantaud est un cas particulier de ces systèmes. Il est très populaire du fait de son utilisation courante sur les véhicules routiers classiques. Dans ce mode, la commande est simple.

#### **1.3.3.4 Rotation avec roues directrices indépendantes**

Dans cette configuration, les roues sont orientables indépendamment. Il est ainsi possible d'émuler un grand nombre de configurations de châssis rigides. Ce mode suppose un système de régulation et de coordination avec un asservissement des angles de direction intégrant les contraintes cinématiques du véhicule. L'inconvénient de ce mode de manœuvre est la complexité de la motorisation des axes de direction et la précision nécessaire du système de commande coordonnée. Cependant, il offre une plus grande manœuvrabilité que les autres modes, spécialement lors du déplacement sur des terrains fortement accidentés. Il permet aussi des manœuvres impossibles à réaliser avec les autres mécanismes, telles que le déplacement en crabe.

#### **1.3.4 Système de suspension**

Le rôle du mécanisme de suspension en locomotion tout-terrain est d'assurer stabilité du système et le maintien du contact des organes de sustentation avec le sol. Le système de suspension peut- être passif ou actif. Il permet, lorsqu'il est actif, d'optimiser la distribution des efforts de contact et donc les performances locomotion. De plus, suivant le nombre de mobilités actives dans la suspension, il est possible de commander certains paramètres de l'attitude de la plate-forme tels que les angles de roulis tangage, la garde au sol, ...

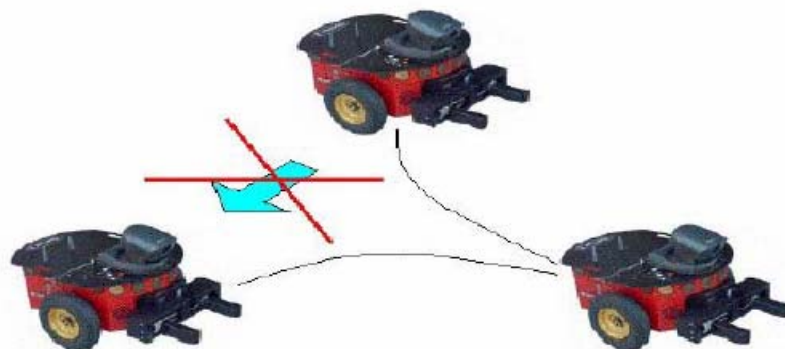
#### 1.4 Indices de performance d'une locomotion :

Il existe trois indices de performance pour un bon choix des valeurs optimales des paramètres de configuration d'un robot mobile :

- traficabilité : c'est la capacité d'un robot de traverser des sols meubles ou durs sans perte de traction.
- Manœuvrabilité : c'est la capacité d'un robot de naviguer à travers un environnement.
- Terrainabilité : c'est la capacité d'un robot de négocier les irrégularités du terrain.

#### 1.5 Comportement holonome et non holonome d'un robot mobile

Si le robot peut instantanément mouvoir en avant et en arrière mais il ne peut pas mouvoir à droite et à gauche sans que les roues se glissent on dit c'est une contrainte non holonome.



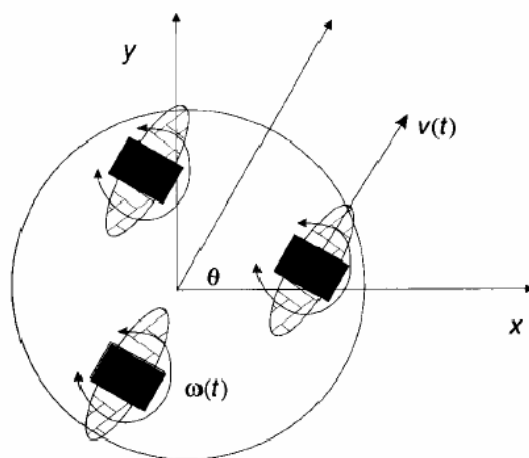
**Figure 1.7** Exemple d'une contrainte non holonome.

Par contre si chaque roue est capable d'être à la fois conduite et guidée (manœuvrée), on dit qu'il s'agit d'un comportement holonome du robot.

Les robots non holonomes sont les plus dominants à cause de leur simplicité de conception et facilité de commande. Par leur nature, les robots mobiles non holonomes ont moins de degrés de liberté par rapport aux robots mobiles holonomes. Ces degrés de liberté sont souvent indépendamment contrôlables ou mécaniquement découplés, de plus simplifiant la commande à bas niveau du robot. Et puisque ils ont un peu de degrés de liberté, il y a des mouvements qui ne peuvent pas être exécutés. Cela crée des difficultés et

des problèmes dans la planification des mouvements et l'implémentation des comportements réactifs.

Par contre les holonomes, offrent une mobilité complète avec le même nombre de degré de liberté que l'environnement. Cela fait une planification de trajectoire la plus facile parce qu'il n'y a pas de contraintes à intégrer. Faire Implémenter des comportements réactifs est facile car il n'y a pas de contraintes qui limitent les directions dans lesquelles le robot peut accélérer.



**Figure 1.8** Robot tricycle à roues suédoises (omnidirectionnelles).

### 1.6 Description du mode de locomotion du robot d'exploration planétaire [Gén 07]

Le Minirover, à quatre roues illustré dans la figure 1.9, possède les caractéristiques mentionnées sur le tableau de l'annexe 03, il est développé par le département des sciences aérospatiales, Université de Tohoku, Japan.

Toutes ses roues qui ont un rayon de 0.09 m, et qui sont fabriquées en aluminium, couvertes par des crampons de 0.01m de hauteur, ont un degré de liberté d'une direction active. Les roues sont liées à la base par une suspension de basculement d'un angle de suspension  $\rho$  (coordonnée généralisée).

Le basculement se fait par un mécanisme de suspension passif non élastique qui lie les roues par des liaisons pivots libres. La liaison différentielle de la suspension est utilisée pour garder l'angle tangage  $\beta$  du rover au milieu des articulations de basculement gauche et droit en cas du franchissement d'un obstacle. Les quatre articulations de direction au dessus des roues servent à orienter le rover.



**Figure 1.9** Minirover d'exploration planétaire.

## **1.7 Conclusion :**

On a vu quelques concepts des différents types de locomotion en robotique mobile, dédiées à la navigation en extérieur, en particulier sur terrain accidenté. Certaines présentent en particulier des modes de déplacement distincts afin de mieux faire face à la variété de situations qu'elles sont susceptibles de rencontrer.

Les travaux développés dans le cadre de cette thèse s'intéressent donc à l'étude des capacités de déplacement de structures de locomotions hybrides, ainsi que de leurs facultés d'adaptation autonomes aux variations géométriques et physiques des sols naturels.

La nécessité de savoir le type de suspension du rover, active ou passive, ainsi les différentes articulations constituant un rover nous permet par la suite une modélisation concrète et donc une bonne commande du robot.

# Chapitre02

ETUDE DE L'INTERACTION ROUE/SOL

Pour optimiser la conception et le contrôle du Minirover en fonction du type de mission qu'il doit accomplir et de l'environnement qu'il doit affronter, il est primordial de connaître au mieux ce qui se passe à l'interaction roue /sol pour pouvoir le caractériser et en exploiter les informations utiles.

L'étude de cette interaction a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment dans le cadre d'une discipline scientifique appelée terra mécanique dont l'objectif est de déterminer des modèles et des facteurs influant sur le comportement de véhicules destinés à se mouvoir en terrain dit naturel, c'est-à-dire tout type de terrain, à l'exception des routes bitumées ou des sols en béton.

L'objectif principal de l'étude et de la modélisation de l'interaction roue sol est de proposer un modèle mathématique décrivant le comportement dynamique (ou quasi-statique) d'un système mécanique d'un corps articulé en intégrant la dynamique du contact roue sol.

En effet, on peut classer ces modèles mathématiques, suivant l'environnement opérationnel considéré, en deux grands axes de recherches à savoir [Bekker 81]:

- ✓ La première classe traite les véhicules routiers en modélisant le comportement dynamique des roues pneumatiques (à pneus) sur terrain artificiel considéré rigide. Elle est basée essentiellement sur l'étude du comportement routier du véhicule :

Stabilité latérale, survirage, anti dérapage...elle s'appuie sur des lois empiriques telles que celles de Ben Amar, Kiencke et la formule 'magique' de Pacejka [Steph 01].

- ✓ La deuxième classe, qui on s'intéresse dans ce travail, étudie le comportement des roues rigides ou déformables sur des sols naturels. l'on s'intéresse aux propriétés physiques du sol et à son comportement en déformation lorsqu'il est soumis aux actions mécaniques du véhicule.

Notons ici, que les futures missions d'exploration planétaire exigeront les Minirovers à traverser des terrains rugueux sans avoir une supervision humaine, l'interaction roue sol joue un rôle très important dans la mobilité en surfaces rugueuses. Les objectifs proposés des futures missions incluent le franchissement des plusieurs kilomètres avec un grand degré d'autonomie.

Dans l'étude des systèmes véhicule sol, différentes approches sont adoptées depuis quelques dizaines d'années, on citera notamment l'approche basée sur la terramécanique

### ***2.1 Science de la terramécanique***

La mécanique du sol est l'application des lois de la mécanique et de l'hydraulique aux problèmes de l'engineering qui traitent les sédiments et autres accumulations non consolidées de particules solides produites par la mécanique et par la désintégration chimique de pierres, sans souci de si ou pas ils contiennent des composants organiques [Terz 43].

Or, la terramécanique est la science qui étudie les performances globales d'une machine en relation avec son environnement opérationnel -le terrain-[Wong 89].

Il convient de distinguer deux étapes dans l'étude du comportement des systèmes véhicules - sols. La première étape est la modélisation du terrain, elle correspond à l'étude de la réponse des sols sous diverses sollicitations, i.e, la caractérisation du terrain. On obtient alors les lois de comportement du sol, la deuxième étape est la modélisation de l'interaction entre l'organe de propulsion (la roue) et le sol. Elle suppose une étude de l'organe de propulsion : modélisation de la géométrie de contact et de sa déformation.

L'interaction roue sol est assez complexe à caractériser car elle met en jeu *des* paramètres provenant à la fois des propriétés du véhicule et de celles du terrain, or si pour le véhicule, les mécaniciens savent déjà qu'il n'est pas aisé d'obtenir un modèle satisfaisant, il l'est encore peut-être moins en ce qui concerne le terrain puisqu'il s'agit d'un milieu qui ne peut bénéficier de l'approximation des corps rigides par exemple. De plus, dans le cas qui nous intéresse, la roue se déforme également. C'est pourquoi dans le domaine, il existe surtout des modèles empiriques ou semi empiriques, pour essayer de cerner la réalité de cette interaction.

Cependant, dans l'optique de la mise au point du Minirover, on doit tenter de parvenir à des solutions exploitables pour l'amélioration de la conception et du contrôle du robot mobile. Deux approches semblent alors se dégager, la première consiste à déterminer un modèle d'interaction pour le contrôle du robot réel à partir de la validation d'autres modèles existant dans la littérature, on pense notamment aux travaux de Bekker, Wong ou Komandi. Ce modèle serait effectivement implémenté dans le système de contrôle dû



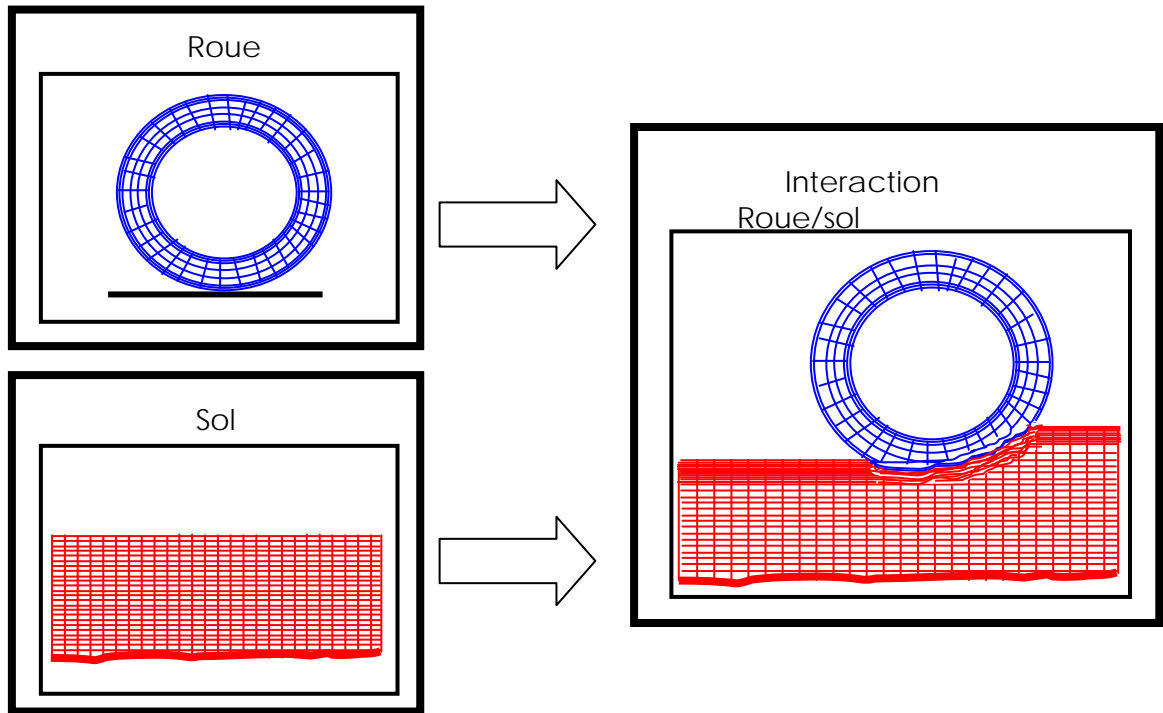
Minirover et jouerait donc un rôle dans l'exploitation des données provenant des différents capteurs (odomètre, capteur d'effort) embarqués. Le modèle utilisé ne devra pas être trop lourd pour satisfaire, entre autres, aux capacités de calcul en temps réel.

La seconde approche consiste, elle, à utiliser des modèles assez complets, ceux-ci seraient destinés à l'élaboration d'une simulation informatique des pérégrinations du petit robot. Cette simulation prendra en fait en compte les modèles caractérisant le Minirover lui-même, ses roues, le terrain et son comportement (sol meuble, compact, pulvérulent, etc.) et finalement, l'interaction roue sol. Ce système devrait permettre de simuler les performances du robot dans différents cas de figure. Il doit donc comporter de nombreux paramètres relatifs aux propriétés des éléments de la simulation.

Mais avant de parvenir à d'éventuels résultats, il nous faut prendre connaissance des différents travaux menés auparavant sur le thème de l'interaction roue sol.

## **2.2 Précédents travaux dans le domaine de l'interaction roue/ sol**

Les recherches en terramécanique ont deux buts prioritaires qui sont dans un premier temps, la détermination de relations fonctionnelles entre les performances d'un véhicule tout terrain et les paramètres de sa conception ainsi que les caractéristiques du terrain, le tout avec un degré de précision acceptable en fondons de la tâche requise. Dans un second temps, il s'agit de prévoir les modifications structurelles du terrain après le passage du véhicule. Si cette dernière affirmation est surtout destinée aux applications agricoles, elle peut néanmoins servir lors de la prise en compte des passages multiples du robot. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons principalement au premier aspect de cette définition, le second pouvant intervenir occasionnellement.



**Figure 2.1** Phénomène de l'interaction roue/sol

Dans ce chapitre, nous verrons tout d'abord en quoi consistent les principales mesures des paramètres sur lesquels se basent la plupart des modèles existants, il s'ensuit une présentation d'un des modèles les plus anciens, mais aussi celui qui sert de base à bon nombre de travaux actuels, le modèle de Bekker. Et finalement, un recensement (non exhaustif) des méthodes de prédiction du comportement du sol et des performances du véhicule, que ces méthodes soient empiriques, semi-empiriques ou analytiques et les réserves ou les encourageantes perspectives qu'elles laissent entrevoir quant à leur exploitation pour l'amélioration des caractéristiques du Minirover.

### **2.3 Présentation de l'interaction roue sol**

Comme nous le verrons plus loin, le lieu primordial de l'interaction se situe au niveau de la zone de contact entre la roue et le terrain, et il s'avère difficile de modéliser simplement ce qu'il s'y passe. Cinématiquement, on peut considérer le mouvement de la roue par rapport au sol comme un roulement avec ou sans glissement. Cependant, d'un point de vue dynamique, il faut pouvoir prendre en compte l'influence des caractéristiques élastiques de la roue et la réponse du sol au chargement.

### **2.4 Différentes approches de la terramecanique**

Il est à signaler qu'il existe plusieurs méthodes de modélisation du comportement des systèmes véhicule /sol. Dans la littérature, ces travaux sont classés en trois grandes classes :

- Méthodes empiriques [Waterways Experiment Station (WES), NATO Reference Mobility Model (NRMM)]:
  - Caractérisation du sol avec pénétromètre à cône.
  - Méthodes d'évaluation de la mobilité du véhicule.
- Méthodes analytiques [Bekker 69] :
  - Modèles physiques pour l'interaction roue/sol.
  - Modèles des paramètres du sol, basés sur un modèle semi empiriques du comportement.
  - L'utilisation du bevamètre dans les expérimentations.
- Méthodes théoriques [Kara 78] :
  - Méthode des éléments finis.
  - Paramètres basiques du sol obtenus expérimentalement.
  - Modèle de la déformation plastique du sol.

Les premières approches sont purement empiriques, car la modélisation de l'interaction entre un véhicule tout terrain et le terrain était très difficile. Ces méthodes étaient principalement basées sur la corrélation expérimentale entre les performances du véhicule et les caractéristiques des terrains identifiées, puis on établit des relations empiriques permettant d'évaluer d'une part la traficabilité du terrain et d'autre part la mobilité du véhicule.

#### **2.4.1 Méthodes empiriques (WES, NRMM) [Grand 04]**

La méthode de WES est une méthode semi empirique basée sur l'utilisation d'un pénétromètre pour évaluer la traficabilité du sol, originalement développée par l'US de l'armée américaine : 'Waterways Experimentation Station'. Le paramètre du sol est la résistance de pénétration mesurée en utilisant le cône standard. Les paramètres du véhicule sont les constantes de la roue (CN, NCI etc.) calculées à partir des dimensions de la roue et du glissement(S), basées sur les modèles d'une simple roue et les théories.

Les sols considérés sont : les sols granulaires fins de type argileux, ainsi que les sols granulaires plus grossiers de type sable (désert, plage...).

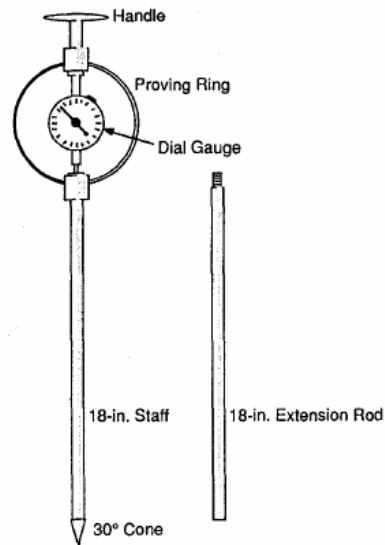
Les méthodes NRMM incluent la philosophie empirique du WES. Cependant, elles présentent un niveau de sophistication supérieur et sont de ce fait plus adaptées à la planification de mission. Elles s'appuient sur l'identification du sol à l'aide du pénétromètre à cône (index de cône  $C_i$ ) et la corrélation de cette mesure avec les performances de locomotion des véhicules ("vehicle cone index"  $V_{ci}$ ). Ces méthodologies restent néanmoins limitées au cadre de prise de décision sur la traficabilité d'un terrain pour des véhicules lourds de type chars ou engins agricoles. L'application de ces méthodes sur les véhicules légers d'exploration planétaire n'est donc pas envisageable dans ce travail [grand 04].

#### ➤ **Pénétrromètre à cône**

Cette technique a été développée lors de la Seconde Guerre Mondiale par le WES (Waterways Experiment Station) de l'armée américaine pour obtenir des informations fiables et rapides sur la praticabilité des terrains rencontrés. A partir de ce test est obtenu un indice dit indice du cône qui sera utilisé dans les calculs de performance. Cet indice représente la résistance à la pénétration du cône dans le terrain, il comporte des données sur les caractéristiques de cisaillement et de compression des sols sablonneux ou argileux. Bien que relativement pratique, ce test a été remis en question par Turnage (1984), le test unique du pénétromètre étant remplacé par une série de tests en laboratoire et in situ, pourtant, de nombreuses études continuent à considérer cet indice du cône. (Wong)

Le pénétromètre est composé d'une tige en acier posée avec un bout conique pour contrôler la force et la position du cône. Le cône standard a un angle de  $30^\circ$ , et une surface de base égale à  $322.6 \text{ mm}^2$  ( $0.5 \text{ inch}^2$ ). Le cône est poussé dans le sol avec une vitesse constante dont la résistance de pénétration est observée. Les anciennes versions étaient mécaniques, et la résistance de pénétration était lise à des certaines profondeurs. Aujourd'hui des pénétromètres à auto enregistrement sont généralement utilisés. La résistance de pénétration est exprimée en [kPa]. Le paramètre identifié grâce à cet instrument est appelé "index de cône" ( $I_c$ ), il est égal au rapport entre la force  $F$  nécessaire pour enfoncer le cône et la surface de base  $S$ . Cet indice a donc la grandeur d'une pression et il dépend à la fois des caractéristiques de cisaillement et de compression du terrain. La plage de variation généralement constatée est de  $0\text{-}300 \text{ kN/cm}^2$ .

$$I_c = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$



**Figure 2.2** Pénétrömètre à cône.

#### 2.4.2 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques, basées sur les travaux de Bekker, introduisent des modèles mathématiques décrivant plus en détail les phénomènes physiques intervenant lors de la locomotion tout-terrain [Bekker 69]. Les modèles élémentaires proposés par Bekker puis affinés par la suite [Wong 78], fournissent des modèles analytiques décrivant la relation entre les efforts transmis et le déplacement relatif de la roue par rapport au sol. Ces modèles peuvent être adaptés à diverses classes de véhicules comme les véhicules légers robotisés.

Cependant, le phénomène de l'élasticité des pneumatiques, n'est pas toujours considéré dans cette étude.

#### 2.5 Présentation des caractéristiques du sol avec le pénétromètre

On peut aussi extraire des autres paramètres adimensionnels, en se basant sur l'indice de cône, et qui ont une importance dans l'étude de la performance des engins militaires, agricoles, et les véhicules tout terrains, on note :

### 2.5.1 Nombre de mobilité

L'expression du nombre de mobilité est donnée comme suit [Saar 02]:

$$M = \frac{I_c b d}{W} \sqrt{\frac{\delta}{h} \left( 1 + \frac{b}{2d} \right)} \quad (2.2)$$

Avec :

M : Nombre de mobilité.

$I_c$  : Indice de cône.

$\delta$  : Déformation du pneu.

$h$  : Hauteur de la section du pneu

$b$  : Largeur du pneu.

$d$  : Diamètre de la roue.

$W$  : Charge verticale (force normale exercée sur la roue).

### 2.5.2 Indice de la pression du sol

C'est l'inverse du nombre de mobilité, qui est donné par :

$$G = \frac{1}{M} = \frac{W}{I_c b d} \sqrt{\frac{h}{\delta} \left( 1 + \frac{b}{2d} \right)} \quad (2.3)$$

### 2.5.3 Coefficient de résistance de roulement

C'est le rapport de la résistance du sol sur la charge appliquée, c'est-à-dire :

$$\frac{R}{W} = 0.05 + 0.29 \frac{G}{I_c} \quad (2.4)$$

Godbole, Alcock et Hettiaratchi donnent dans l'expression de Krick du nombre T permettant de déterminer la déformation  $f$  de la roue sur un sol rigide et sous l'influence d'une charge  $W$  et en fonction de la pression de gonflage  $p$ , du diamètre  $D$  et de la largeur  $B$  de la roue,

$$T = \frac{pDS}{W} \quad (2.5)$$

L'équation de prédiction empirique pour la déformation est :

$$\frac{f}{S} = 0.67 T^{-0.8} \quad (2.6)$$

Avec  $S$ , la hauteur de la section du pneu. Kricks a d'ailleurs établi une expression de  $T$  en fonction de ce paramètre.

$$T = \frac{pDS}{W} \quad (2.7)$$

Il y a par contre assez peu de chances que les valeurs présentées ici soient utilisables pour le Minirover. Par ailleurs, il existe des banques de données sur les paramètres empiriques qui ne seront pas exploitables pour le robot à locomotion hybride. En effet, les méthodes empiriques, même bien développées, ne sont valables que pour un véhicule ayant des caractéristiques similaires à celui qui a servi à la mise en œuvre du modèle or il s'agit en général de véhicules lourds pour des applications militaires ou agricoles.

Bien que cette méthode paraisse séduisante et rapide pour l'évaluation d'un véhicule donné sur un terrain particulier, il n'est en aucun cas certain que de telles méthodes pourraient être extrapolées au-delà de leurs conditions expérimentales, ce qui les limite dans l'évaluation de nouvelles conceptions ou dans la prédiction des performances d'un véhicule dans un nouvel environnement opérationnel. De plus, si un nombre conséquent de paramètres sont requis pour définir le problème, alors une approche empirique n'est pas rentable.

Pour essayer de simuler les performances d'un véhicule en modifiant les paramètres de l'interaction en fonction des données de la mission, il est peut-être préférable de se tourner vers les modèles théoriques analytiques.

## **2.6 Modélisation des terrains naturels (sols)**

La première étape dans l'étude des interactions mécaniques entre les véhicules et leur environnement opérationnel est la modélisation des sols eux-mêmes. Donner un modèle au sol consiste généralement en l'étude de l'interaction entre les particules constituant ce sol.

Le terrain se caractérise par deux caractères principaux qui sont estimés de manière expérimentale : la cohésion qui est la tendance des particules qui le composent à se coller entre elles, et l'angle de frottement entre ces mêmes particules.

L'évaluation des performances de locomotion d'un robot mobile nécessite l'intégration des caractéristiques physiques et géométriques du terrain.

En effet, la modélisation géométrique du terrain est une étape primordiale dans l'étude de la mobilité des véhicules et leur navigation sur des terrains naturels.

Le fameux modèle utilisé pour ce genre de modélisation est le modèle numérique du terrain (MNT), qui donne l'élévation  $z$  du sol (carte d'altitude) en fonction des coordonnées cartésiennes  $(x, y)$  ou sphériques  $(\phi, \psi)$ .

### **2.6.1 Caractérisation des sols**

La caractérisation du sol détermine les caractéristiques du terrain qui affecte la performance de conduite et la sécurité des petits robots mobile qui traversent un terrain quelconque.

En plus, la caractérisation nous dit comment le terrain affecte le comportement de conduite sans essayer d'identifier ce terrain. On note que la caractérisation des terrains a été le sujet des plusieurs études, bien que ces dernières études aient été appliquées à des larges classes de véhicules, l'étude la plus connue et le travail largement cité est celui de Bekker et Wong [Ojeda 05]. Du point de vue terramécanique, le sol peut être caractérisé en déterminant quelques paramètres du terrain.

La caractérisation du comportement du sol a pour but d'établir des relations décrivant la réponse du sol sous diverses sollicitations. Ces relations sont essentiellement entre les contraintes qui sont les sollicitations exercées par la roue sur le sol, et la déformation qui traduit le déplacement relatif de la roue par rapport au sol. On cite notamment les relations pression enfoncement dans le plan vertical, et les relations de cisaillement dans le plan horizontal.

### **2.6.2 Les lois semi empiriques du comportement du sol**

Ces lois de comportement sont dites semi empiriques car elles ne sont pas définies a priori à partir de considérations théoriques, mais plutôt à partir de séries de mesures.

Le principe consiste à effectuer une série de mesure sur différents types de sols de la réponse à des sollicitations qui sont les plus proches possibles de celles exercées par un véhicule. Ces mesures sont le plus souvent obtenues à partir d'un *bevameter*. On obtient donc des modèles mathématiques semi empiriques caractérisent le comportement du sol. Ces fonctions dépendent de paramètres qui sont propres au type de sol. Ainsi, les modèles



d'interaction roue sol proposés par Bekker sont dits semi empiriques car ils reposent sur l'utilisation des paramètres de sol ainsi déterminés.

### 2.6.2.1 Relation pression – enfoncement

Dans un sol meuble, le chargement d'une roue entraîne un enfoncement de la roue sur le plan d'interaction vertical. On utilise un plateau circulaire ou rectangulaire sur lequel on applique une charge variable puis on mesure à chaque fois l'enfoncement de la roue dans le sol.

Les résultats des travaux de Bernstein en 1913 ont donné une relation entre la pression exercée  $P$  sur le plateau et l'enfoncement du sol  $Z$  connue par la formule suivante :

$$P = K.z^{0.5} \quad (2.8)$$

Cette formule a été spécialement utilisée pour la modélisation du comportement des sols agricoles. Où  $K$  est le module de déformation non élastique, et 0.5 et l'exposant d'enfoncement. Cette formule fut généralisée par la suite par les travaux réalisés en Russie par Goriatchkin en 1936 qui proposa la relation :  $P = K.z^n$  où  $0 < n < 1$  [Grand 03]. Ensuite, les travaux de Bekker en 1960 dans son travail « Introduction to terrain vehicle system », qui généralisa encore ces relations pour tout type de sol, en aboutissant la formule fameuse de Bekker :

$$P = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n = k_{\phi q} z^n \quad (2.9)$$

Dans ces équations :  $b$  désigne le rayon du plateau circulaire

$k_c$  : est le coefficient d'adhérence entre les particules du sol.

$k_\phi$  : est le coefficient de friction entre les particules du sol.

Ces modèles sont généralement analysés sur des traces logarithmiques puisque la courbe d'équation (2.2) tend vers une droite.

$$\log(p) = \log(k_c) + n \log(z) \quad (2.10)$$

La déformation  $z$  peut être calculée comme une fonction de la charge  $W$ , pour un plateau donné avec une surface  $A$  auparavant connue.

$$z = \sqrt[n]{\frac{W}{A\left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right)}} \quad (2.11)$$

### 2.6.2.2 Critère de rupture de Mohr-Coulomb

L'analyse des conditions de rupture des matériaux qui composent le sol nécessite l'étude des propriétés du sol en cisaillement. En terramecanique, la formule de Mohr-Coulomb est la plus couramment employée comme un critère de rupture des sols.

Ce critère stipule qu'il y a rupture du matériau lorsque la contrainte de cisaillement, dans un plan quelconque, est supérieure ou égale à la contrainte de résistance à la rupture du matériau  $\tau_{\max}$ . Coulomb a établi que la contrainte de résistance  $\tau_{\max}$  est une fonction linéaire de la contrainte normale à ce plan  $\sigma_n$ , soit la loi de Mohr-Coulomb suivant :

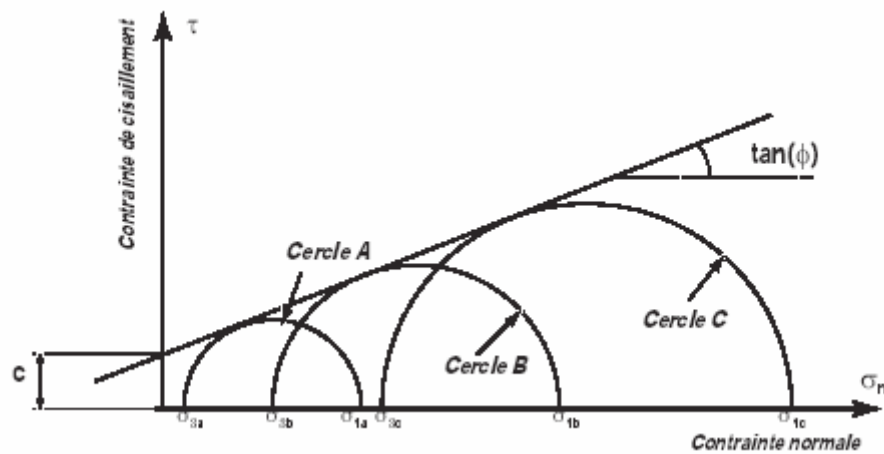
$$\tau_{\max} = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.12)$$

Où :  $c$  définit la cohésion du sol,  $\tan \phi$  est le coefficient de frottement interne ( $\phi$  est l'angle de frottement interne).

On peut construire une série de cercles de Mohr correspondants à différentes valeurs de contraintes principales de cisaillements qui tendent vers la rupture du sol.

La figure (2.3) montre ces cercles pour trois valeurs de contraintes de cisaillement ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) :

La ligne d'enveloppe est représentée par la droite de la fonction (2.12).



**Figure 2.3** Construction des cercles de Mohr et de la ligne d'enveloppe.

Il existe plusieurs méthodes pour l'identification des paramètres de cohésion et de frottement interne du sol. Dans le cadre de la terramecanique, on utilise un bevamètre pour les mesurer.

Pour les sables secs il n'y a pas presque de cohésion entre les particules, l'équation (2.12) s'écrit [Le 99]:

$$\tau = p \tan \phi \quad (2.13)$$

Pour l'argile plastique, il n'y a pas de frottement entre les particules, l'équation (2.11) s'écrit

$$\tau = c \quad (2.14)$$

### 2.6.2.3 Technique de bevamètre

Le bevamètre est un instrument sert à mesurer des paramètres de performance de mobilité des véhicules tels que la cohésion  $c$  et l'angle de frottement interne  $\phi$ .

Son principe de fonctionnement est basé essentiellement sur deux ensembles d'essai :

- La première est l'essai de pénétration d'un plateau.
- La deuxième est l'essai de pénétration.

La figure 2.4 présente une vue schématique d'un bevamètre.

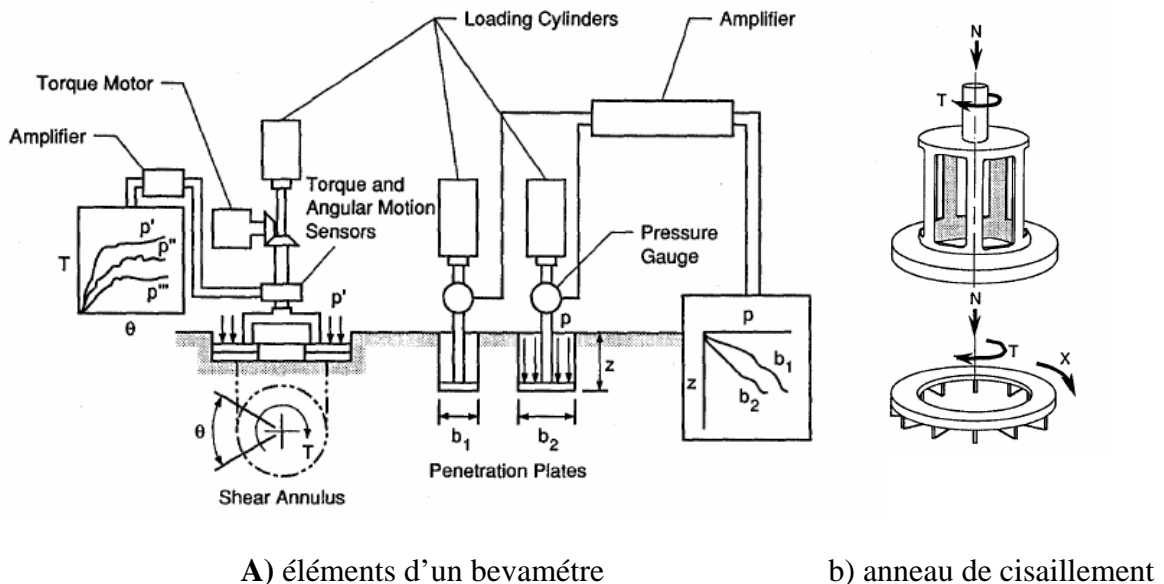


Figure 2.4 Vue schématique d'un bevamètre.

L'essai de pénétration utilise différentes tailles de plateau afin de simuler différentes surfaces de contact de roue ; elles doivent être du même ordre de grandeur que la dimension caractéristique de la roue (en générale sa largeur). La charge verticale est appliquée par un vérin hydraulique piloté en vitesse par une servovalve. La vitesse de pénétration peut varier entre 0 et 10 cm/s et doit être constante durant l'essai.

L'essai de cisaillement utilise un anneau dit de cisaillement. Cet anneau est soumis à un effort de pression vertical par l'intermédiaire du vérin piloté en effort, et à un moment de rotation, autour de son axe de symétrie, créé par un moteur commandé en couple.

Le déplacement angulaire résultant correspond au déplacement horizontal du sol et le moment de rotation aux contraintes de cisaillement. Cet essai permet de caractériser la relation déplacement contrainte dans le plan tangent. Utilisé conjointement avec une mesure du déplacement vertical, il peut aussi être utilisé pour caractériser la relation entre enfoncement et glissement.

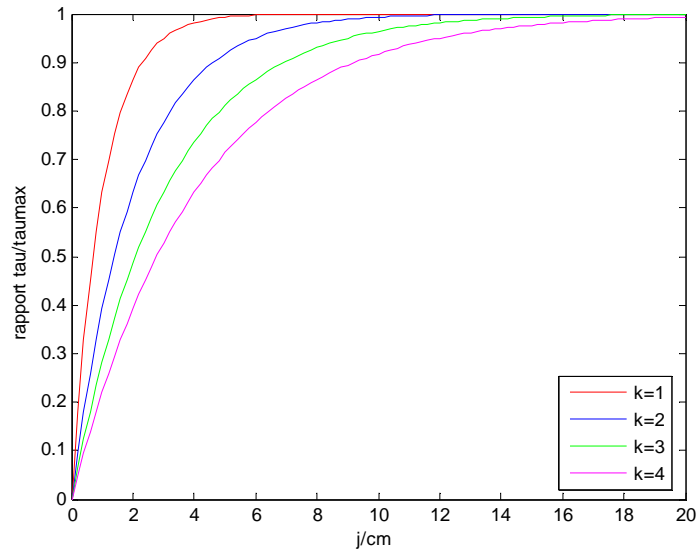
#### 2.6.2.4 Relation en cisaillement

Considérons maintenant le cas d'une roue soumise à un couple de traction autour de son axe de rotation. Ce type d'effort engendre une action de cisaillement au niveau de l'interface roue sol. Pour décrire les interactions roue sol, on a besoin de l'effort de cisaillement comme une fonction du déplacement relatif horizontal du sol  $j$ , une approximation générale est acceptée a été trouvée par Janosi et Hanamoto donnée par l'équation, elle est du type fonction exponentielle :

$$\tau = \tau_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{j}{K}} \right) \quad (2.15)$$

Où  $\tau_{\max}$  est la contrainte de cisaillement maximale supportée par le sol. Elle dépend de la cohésion du sol  $c$  et de son angle de frottement interne  $\phi$  assurant la transmission des contraintes normales  $p$  (*Mohr-Coulomb*). La contrainte de cisaillement s'exprime donc en un point donné en fonction de la contrainte normale exercée  $p$ , du déplacement relatif  $j$ , des paramètres du sol  $c, \phi$  et du module de cisaillement  $K$ . Le paramètre  $K$  est le module tangent du déplacement horizontal du sol et contrôle la forme de la courbe comme représentée dans la figure (2.4). Typiquement, le paramètre  $K$  a des valeurs entre 1 cm et 3 cm (2.5 cm est la valeur commune).

L'approche de Janosi et Hanamoto est appliquée notamment pour les sols à faible cohésion de type sable, argile saturé ou neige sèche,



**Figure 2.4** Relation du déplacement relatif d'après Janosi et Hanamoto.

Une description alternative de la relation entre déplacement relatif et l'effort de cisaillement, qui est ainsi applicable en terrains avec une crête d'un maximum d'effort de cisaillement, a été publiée par Wong dans son travail « Terramechanics and off road vehicles » en 1989, par :

$$\tau = \tau_{\max} K_r \left[ 1 + \left( \frac{1}{K_r \left(1 - \frac{1}{e}\right)} - 1 \right) e^{\frac{-j}{K_w}} \right] \left( 1 - e^{\frac{-j}{K}} \right) \quad (2.16)$$

La figure (2.16) montre l'influence des différentes valeurs du paramètre  $K_r$ .

Ce type de relations est obtenu pour les sols dont la cohésion est plus forte (sable compact, glaise, certaines neiges,...),

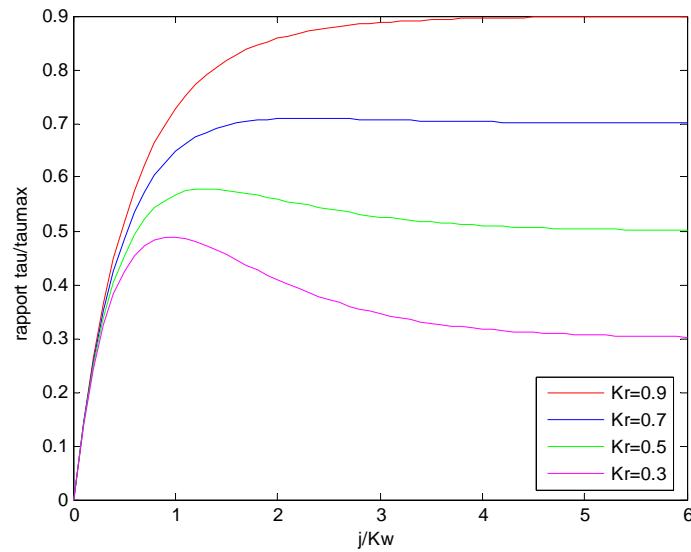


Figure 2.5

Relation du déplacement relatif du sol selon Wong.

Les paramètres de cohésion  $c$  et l'angle de frottement interne  $\phi$  peuvent être identifiés en procédant à plusieurs essais de cisaillement en augmentant à chaque fois la charge verticale. En effet, la courbe représentant l'évolution de la contrainte de cisaillement maximale  $\tau_{\max}$  en fonction de la charge verticale (pression) doit tendre vers une droite suivant l'équation (2.5). Les coefficients  $\tan\phi$  et  $c$  sont obtenus par une méthode d'identification des moindres carrés.

### 2.7 Evaluation du comportement de l'interaction roue sol par simulation

Le robot étudié est un mini Minirover à quatre roues, toutes ses roues qui ont un rayon de 0.09 m, et qui sont fabriquées en aluminium, couvertes par des crampons de 0.01m de hauteur, ont une direction active (actionnées par des moteurs). Les roues sont liées à la base par une suspension de basculement d'un angle de suspension contrôlable.

Le sol d'essai se ressemble à celui de Mars, qui est très cohésif et qui contient de sable fin.

On évalue le comportement du mini Minirover sur un sol déformable, les caractéristiques du sol et du Minirover sont données sur le tableau 2.1 suivant :

paramètres	valeur	unité	Description
$c$	0.80	kpa	Effort de cohésion
$\phi$	37.2	deg	Angle de frottement

$X_c$	26.4	deg	Angle de distraction du sol
$k_c$	$1.37.10^3$	$N / m^{n+1}$	Module pression enfoncement
$k_\phi$	$8.14.10^5$	$N / m^{n+2}$	Module pression enfoncement
n	1.00	SD	Exposant d'enfoncement
$a_0$	0.40	SD	Paramètre dépend du contact.
$a_1$	0.15	SD	Paramètre dépend du contact.
$\rho_d$	$1.6.10^3$	$kg / m^3$	Densité volumique du sol
$\lambda$	1	SD	Taux d'enfoncement de la roue
r	0.09	m	Rayon de la roue
b	0.11	m	largeur de la roue
W	66	N	Poids total du robot

**Tableau 2.1** Paramètres de simulation du Minirover et du sol.

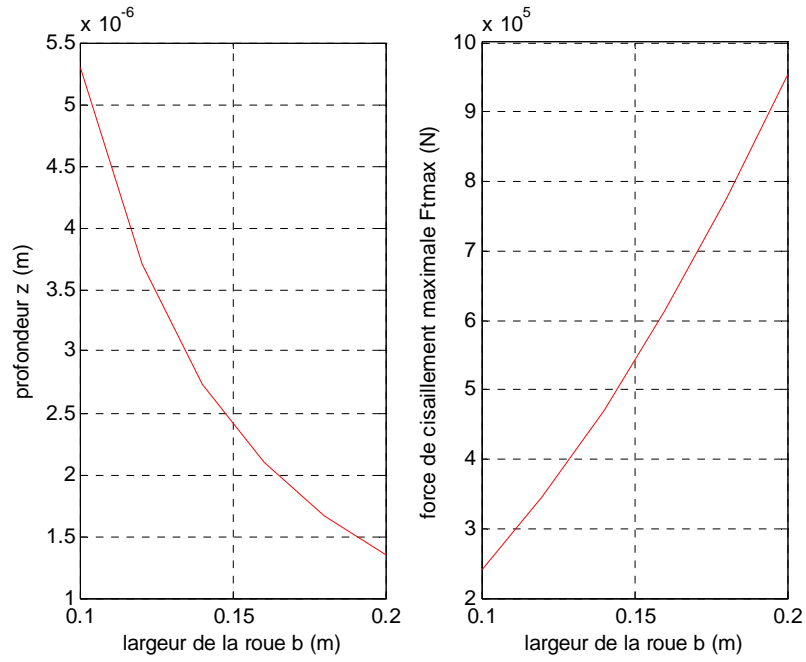
Dans le tableau 2.1,  $a_0, a_1$  sont des paramètres qui dépendent de l'interaction roue/sol. Leurs valeurs sont généralement supposées comme suit :

$$a_0 \approx 0.4 \text{ et } 0 \leq a_1 \leq 0.3 \text{ [Gén 07].}$$

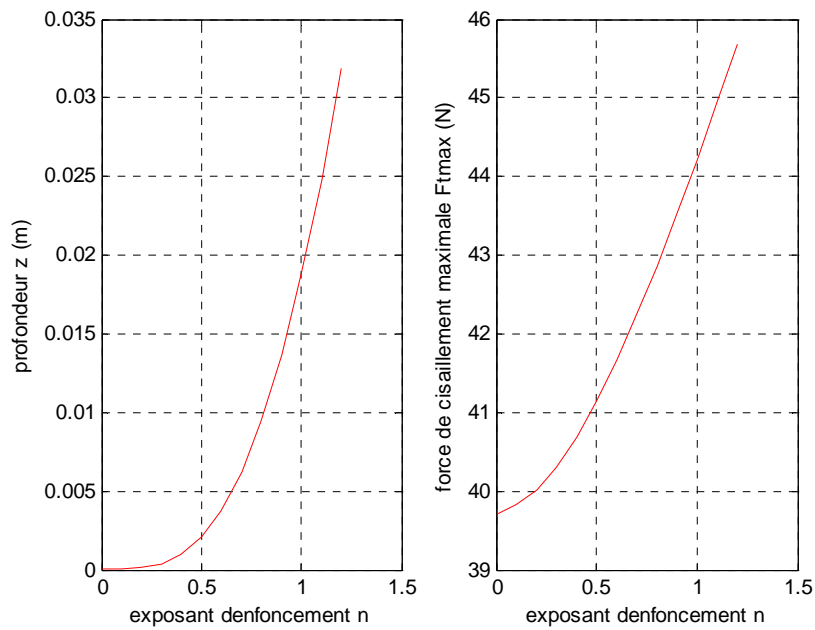
On note que chaque paramètre est supposé indépendant de la gravité, et le terrain est supposé homogène au cours de la simulation.

On étudie d'abord l'influence de la largeur de la roue, du rayon de la roue et de l'exposant d'enfoncement sur le taux d'enfoncement et la force de cisaillement maximale.

Les figures (2.6), (2.7), (2.8) montrent leurs courbes pour un même type de sol :

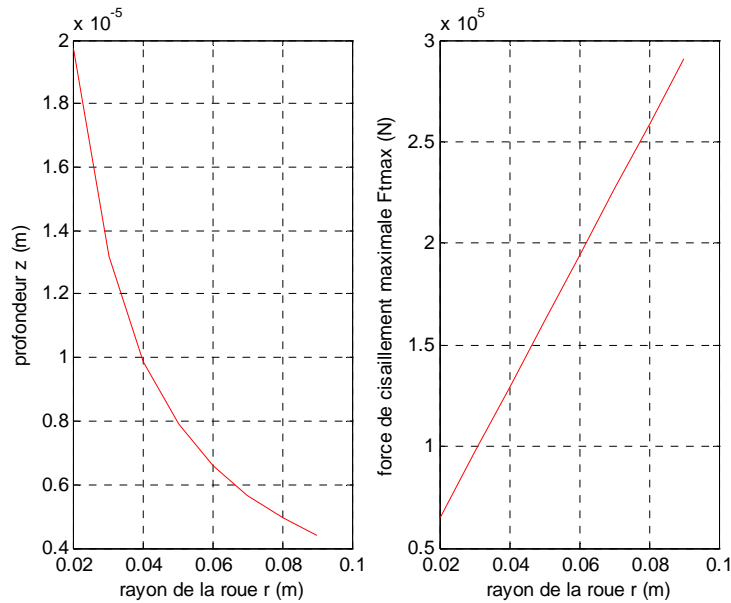


**Figure 2.6** Effet de la largeur de la roue sur la profondeur d'enfoncement et la force de traction maximale.



**Figure 2.7** Effet l'exposant d'enfoncement sur la profondeur d'enfoncement et la force de traction maximale.





**Figure 2.8** Effet du rayon de la roue sur la profondeur d'enfoncement et la force de traction maximale.

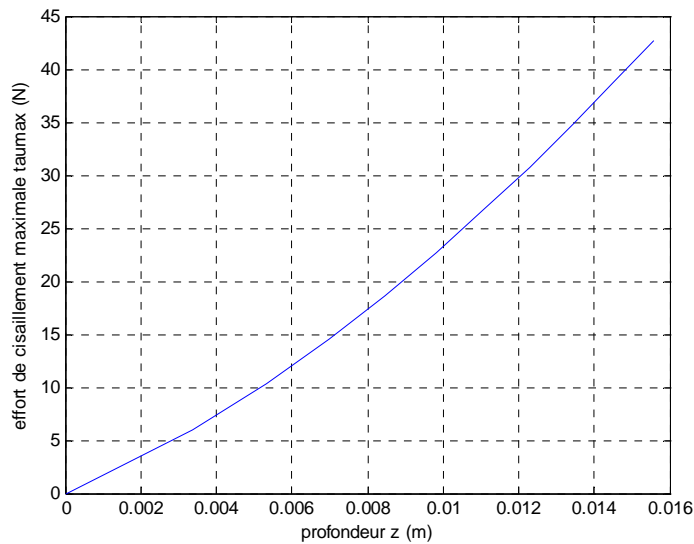
Analysons les courbes précédentes, on trouve que la profondeur d'enfoncement augmente avec l'exposant d'enfoncement  $n$  car c'est un paramètre qui influe directement, dans la formule de Bekker (équation (2.6)) sur l'enfoncement, par contre cette profondeur diminue en augmentant la largeur et le rayon qui diminue à son tour

la surface de pression, donc diminue l'enfoncement ( $p = \frac{f_n}{s}$ ) où :

$f_n$  : Force normale.

$s$  : Surface de pression.

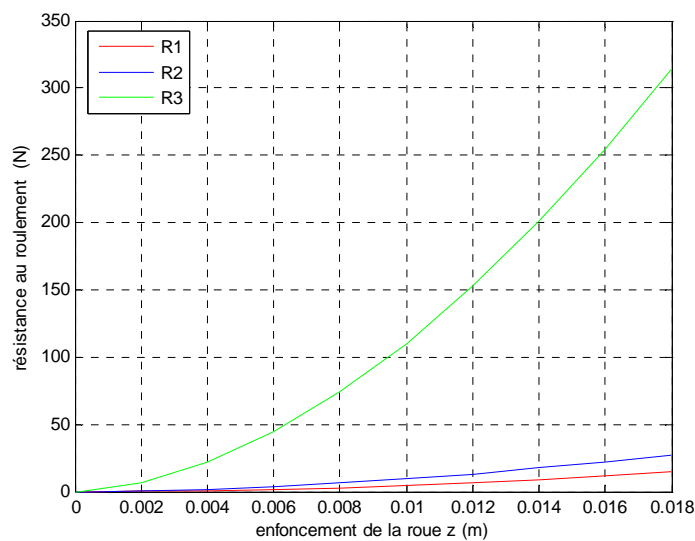
Or, la force de cisaillement maximale ; qui est nécessaire à la destruction du sol dans la partie antérieure de la roue, augmente avec l'augmentation de la largeur et du rayon de la roue, et avec l'augmentation de l'exposant d'enfoncement, car avec l'augmentation du volume de la roue la force de cisaillement devient importante. On note aussi que l'exposant d'enfoncement, qui dépend de la nature du sol, son augmentation produit une profondeur plus grande, donc un volume du sol à l'avant de la roue plus grand, ce qui provoque une augmentation de la force de cisaillement maximale, ce qui est montré par la figure (2.9) :



**Figure 2.9** Effort de cisaillement maximal en fonction de la profondeur d'enfoncement.

On étudie aussi la résistance au roulement de trois types de sol (sable), en faisant augmenter le taux d'enfoncement, on constate une augmentation mais qui n'est pas identique pour les trois cas, puisque la résistance au roulement est moindre sur les sols rigides, la roue s'enlisant moins pour une même charge (troisième type de sol est le plus rigide).

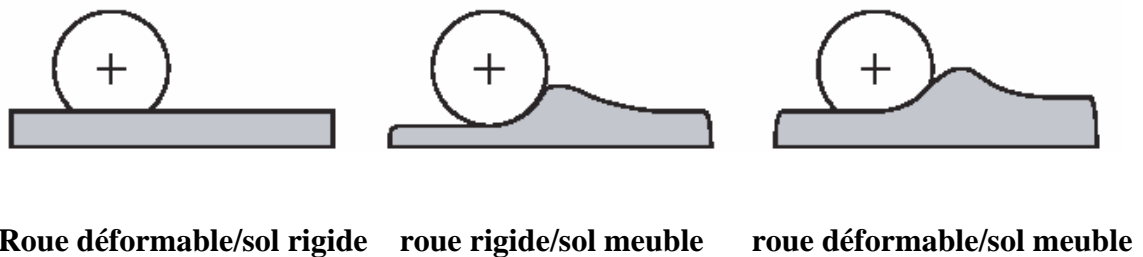
L'évaluation de ce paramètre est considéré très important dans l'étude de l'interaction roue sol car la force de traction nette du robot est égale à la force longitudinale moins la résistance de mouvement qui est généralement égale à la résistance au roulement.



**Figure 2.10** Résistance au roulement en fonction de l'enfoncement de la roue des trois types de sol

## 2.8 Différentes configurations de l'interaction roue/sol

Les chercheurs ont adopté trois types de configurations roue sol, selon l'effort exercé de l'un sur l'autre et la réaction résultante. Le type de roue est choisi en fonction des contraintes liées à la mission. Par exemple, dans le cas typique d'applications agricoles où il est souhaité de ne pas déformer les terrains meubles sur lesquels le système évolue, on utilise des roues pneumatiques à basse pression. Dans le cadre de l'exploration planétaire et de la recherche de traces biologiques, les roues en matériaux organiques (caoutchouc, hydrocarbure ...) sont prohibées afin de ne pas polluer le site exploré. On note qu'il y a un quatrième type de configuration roue sol mais il est destiné uniquement pour les tramways (roue rigide/sol rigide). Le premier cas figure (2.11.a) est très utilisé dans l'étude des performances des véhicules routiers (sols en goudron).



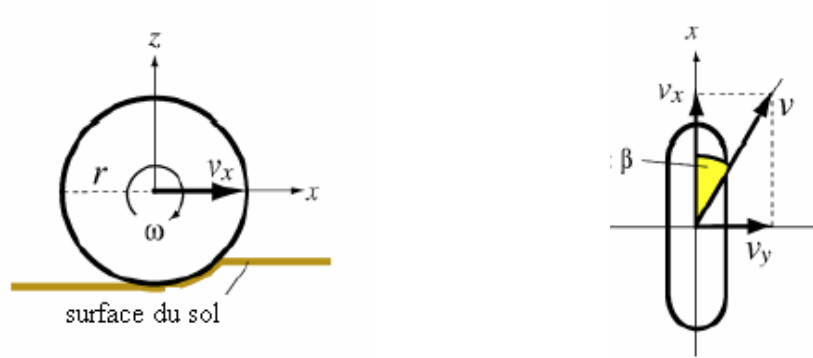
**Figure 2.11** Différentes configurations du système roue sol.

Les deux autres cas figure (2.11.b) et figure (2.11.c) seront étudiés séparément dans ce qui suit du chapitre.

## 2.9. Modèle de liaison roue/sol basé sur l'approche de la terramécanique

### 2.9.1. Cas d'une roue rigide et d'un sol meuble

L'analyse suivante concerne une roue rigide qui roule sur un sol meuble. Le système de coordonnées d'une roue est obtenu par le schéma suivant illustré sur la figure 2.7 :



**Figure 2.12.** Système de coordonnées de la roue.

Dans ce système la direction longitudinale est notée par  $x$ , la direction latérale par  $y$  et la direction verticale par  $z$ .

### 2.9.1.1. Taux de glissement et angle de glissement

Dans un sol meuble, les roues peuvent être l'objet d'un glissement et perdent leur adhérence. La roue peut glisser dans les deux directions longitudinale ou latérale (dérapage). Le glissement dans la direction longitudinale est mesuré par le taux de glissement qui est défini comme une fonction de la vitesse du déplacement de la roue par rapport au sol ( $v_x$ ) et la vitesse de circonférence de la roue  $r\omega$  (où  $r$  est le rayon de la roue, et  $\omega$  est la vitesse angulaire de la roue)

$$s = \begin{cases} (r\omega - v_x) / r\omega & (\text{if } |r\omega| > |v_x|) : \text{traction} \\ (r\omega - v_x) / v_x & (\text{if } |r\omega| < |v_x|) : \text{freinage} \end{cases} \quad (2.10)$$

Il est évident que :  $-1 < s < 1$

D'autre part, le glissement latéral (transversal) est exprimé par l'angle de glissement  $\beta$  :

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{v_y}{v_x} \right) \quad (2.11)$$

### 2.9.1.2. Enfoncement de la roue :

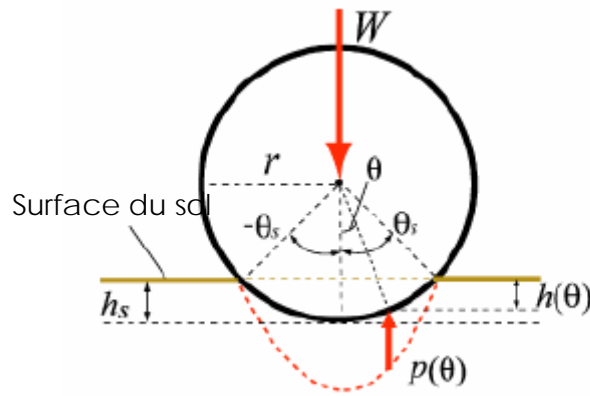
L'enfoncement d'une roue rigide dans un sol meuble peut être statique ou dynamique :

- L'enfoncement statique ne dépend que de la charge sur la roue  $W$ . On rappelle que :

Pour un effort statique (pression)  $P$  généré sous un plateau rectangulaire plat de largeur  $b$  qui s'enfonce d'une valeur de  $z$ , on a la relation, formulée par Bekker, suivante :

$$P(h) = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n$$

On peut facilement extraire des formules de l'équation précédente. Premièrement, on donne le schéma qui montre l'enfoncement statique d'une roue comme montre la figure suivante :



**Figure 2.13** Enfoncement statique d'une roue rigide dans un sol meuble

L'enfoncement statique  $z(\theta)$  à un angle arbitraire  $\theta$  de la roue est analytiquement donné par la formule suivante :

$$z(\theta) = r(\cos \theta - \cos \theta_s) \quad (2.13)$$

L'angle  $\theta_s$  est l'angle de la liaison statique, par substitution des deux dernières équations, on obtient l'expression de l'effort statique suivante :

$$P(\theta) = r^n \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) (\cos \theta - \cos \theta_s)^n \quad (2.14)$$

L'angle  $\theta_s$  est numériquement obtenu en résolvant l'équation suivante lorsque la charge verticale est soumise :

$$W = \int_{-\theta_s}^{\theta_s} P(\theta) b r \cos \theta d\theta = r^{n+1} (k_c + b k_\phi) \times \int_{-\theta_s}^{\theta_s} (\cos \theta - \cos \theta_s)^n \cos \theta d\theta. \quad (2.15)$$

Finalement, l'enfoncement statique  $z_s$  est dérivé comme suit :

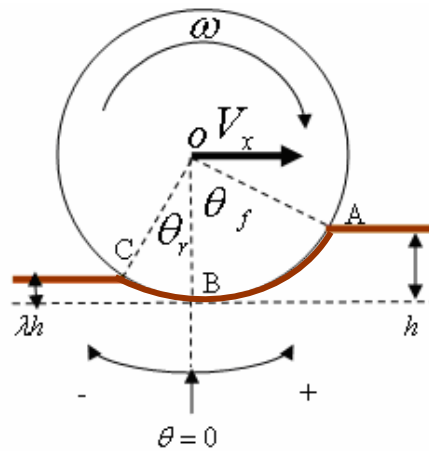
$$z_s = r(1 - \cos \theta_s) \quad (2.16)$$

Dans l'autre côté, l'enfoncement dynamique qui dépend du taux de glissement, des données de la surface de la roue et des caractéristiques du sol, est très difficile de l'obtenir analytiquement, donc le recours au calcul numérique est souhaitable.

### 2.9.1.3 Angle de contact d'une roue

Une fois que l'enfoncement de la roue est obtenu, les angles de contact peuvent être calculés.

Un des deux angles de contact est appelé l'angle d'entrée, et l'autre est l'angle de sortie.



**Figure 2.14** Angles de contact d'une roue.

La figure 2.14 représente un schéma descriptif qui résume le modèle de contact d'une roue rigide immobile sur un sol meuble.

L'angle d'entrée est l'angle formé du vertical ( $OB$ ) et du premier point de contact de la roue  $A$  (Ici  $\angle AOB = \theta_f$ ). L'expression de cet angle est donnée en fonction de  $z$  comme suit :

$$\theta_f = \cos^{-1}\left(1 - \frac{z}{r}\right) \quad (2.17)$$

L'angle de sortie est l'angle formé par le vertical (OB) et le point où la roue part (ici  $\angle BOC = \theta_r$ ). Son expression est donnée aussi comme suit :

$$\theta_r = \cos^{-1}\left(1 - \lambda \cdot \frac{z}{r}\right) \quad (2.18)$$

où :  $\lambda$  est le taux d'enfoncement de la roue, qui désigne le rapport entre les enfoncements avant et arrière de la roue. Il dépend des caractéristiques du sol, les données de l'état de surface de la roue et du taux de glissement [Eshig 07].

#### 2.9.1.4 Distribution des efforts sous une roue

En se basant sur les modèles de terramecanique, les efforts sous une roue tournante peuvent être modélisés comme montre la figure suivante :

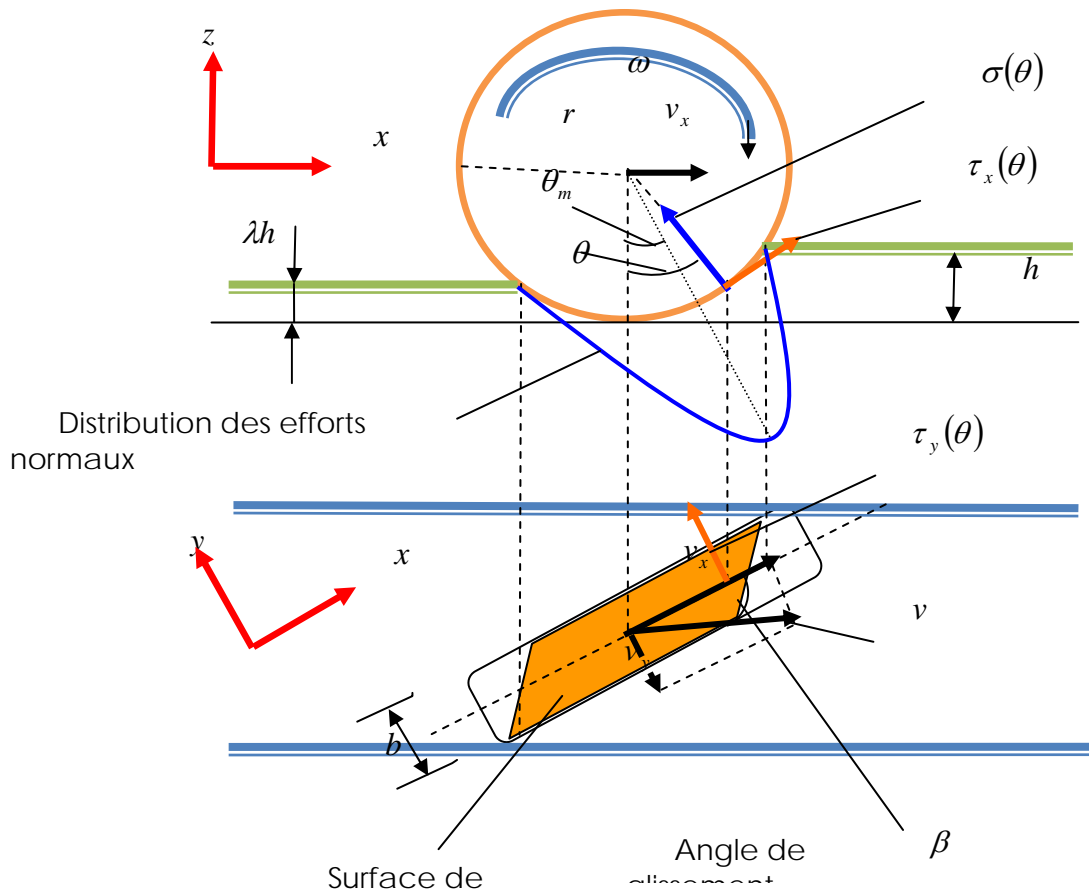


Figure 2.15 Modèle d'effort de la roue.

L'effort normal est donné par [Eshig 07]:

$$\sigma(\theta) = \begin{cases} r^n \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) [\cos \theta - \cos \theta_f]^n \dots (1) \\ r^n \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \left[ \cos \left\{ \theta_f - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} (\theta_f - \theta_m) \right\} - \cos \theta_f \right]^n \dots (2) \end{cases} \quad (2.18)$$

L'équation (2.18.1) est valable pour  $\theta_m \leq \theta < \theta_f$ , pour (2.18.2)  $\theta_r < \theta \leq \theta_m$ .

On note que si  $n = 1$  on parle du modèle de Wong-Reece.

$\theta_m$  Angle spécifique dans lequel l'effort normal est maximal. Il est donné par :

$$\theta_m = (a_0 + a_1 s) \theta_f \quad (2.19)$$

Les valeurs de  $a_0, a_1$  dépendent de l'interaction roue sol, elles sont données généralement par :

$a_0 \approx 0.4$  et  $0 \leq a_1 \leq 0.3$ , et  $s$  : est le taux de glissement.

Les efforts de cisaillement  $\tau_x(\theta), \tau_y(\theta)$  sont exprimés par des équations similaires :

$$\tau_x(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) \left[ 1 - e^{-j_x(\theta)/k_x} \right] \quad (2.20)$$

$$\tau_y(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) \left[ 1 - e^{-j_y(\theta)/k_y} \right] \quad (2.21)$$

Tel que :

$j_x, j_y$  Sont les déplacements relatifs du sol.

$k_x, k_y$  Sont les modules de déplacement en cisaillements.

D'après toujours les mêmes auteurs, on peut aussi écrire les déplacements relatifs du sol  $j_x, j_y$  en fonction de  $\theta$  comme suit :

$$j_x(\theta) = r[\theta_f - \theta - (1 - s)(\sin \theta_f - \sin \theta)] \quad (2.22)$$

$$j_y(\theta) = r(1 - s)(\theta_f - \theta) \tan \beta \quad (2.23)$$

La figure (2.16) représente le modèle de force de la roue.



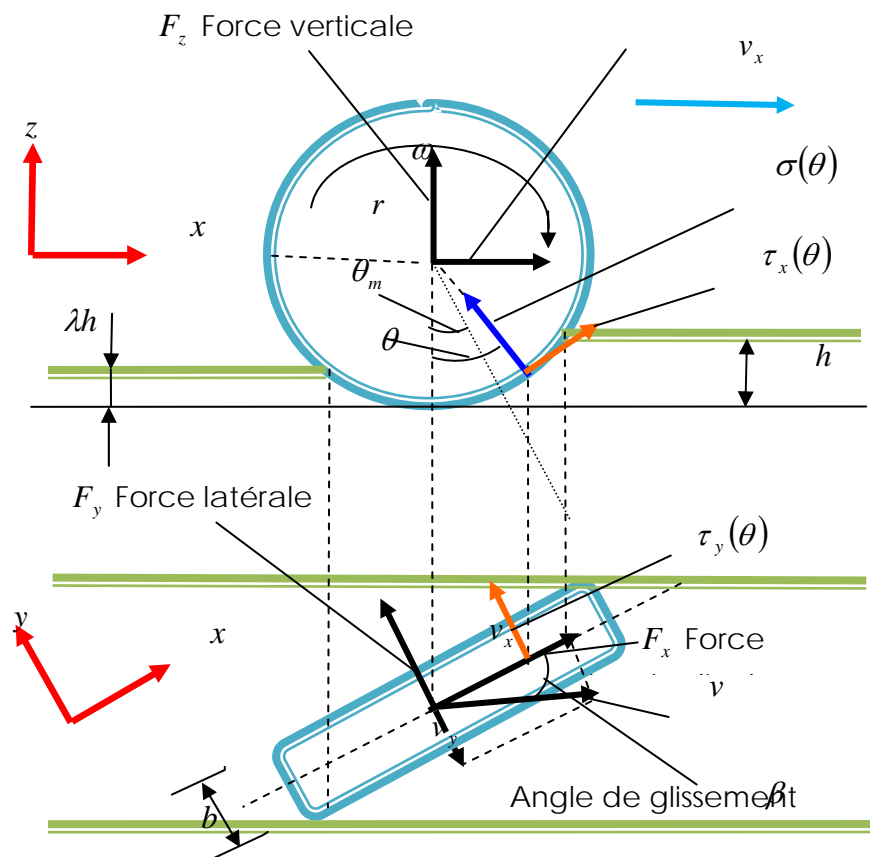


Figure 2.16 Modèle de force d'une roue.

### 2.9.1.5 Evaluation des différentes forces agissant sur la roue

#### 2.9.1.5.1 Force de traction nette (Drawbar pull $F_x$ ) :

Cette force correspond à l'effort de poussée générant le mouvement de la roue, qui est égale à la différence entre la force de traction et la résultante des résistances de la roue.

En utilisant l'effort normal  $\sigma(\theta)$  et l'effort de cisaillement selon x  $\tau_x(\theta)$ , la force de traction nette (Drawbar pull) qui agit dans la direction du sol vers la roue est calculée par l'intégration de l'angle d'entrée  $\theta_f$  jusqu'à l'angle de sortie  $\theta_r$ , et elle est donnée par :

$$F_x = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau_x(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta \quad (2.24)$$

#### 2.9.1.5.2 Force verticale ( $F_z$ )

La condition nécessaire pour cette force est qu'elle doit être égale à la charge normale sur la roue.

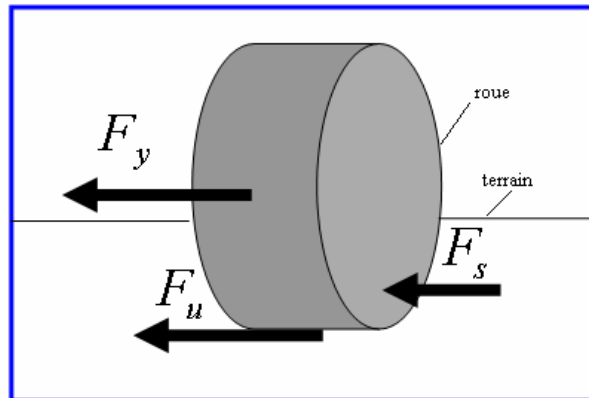
La force verticale est obtenue par la même méthode que celle de la force longitudinale  $F_x$ . Elle est donnée par l'équation suivante :

$$F_z = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau_x(\theta) \sin \theta - \sigma(\theta) \cos \theta \} d\theta \quad (2.25)$$

### 2.9.1.5.3 Force latérale (transversale) $F_y$

Dans [Gén 05], les auteurs ont modélisé la force latérale ; agit le long de la direction latérale de la roue lorsque le véhicule fait une manœuvre de direction ; comme suit :

$$F_y = F_u + F_s \quad (2.26)$$



**Figure 2.17** Forces latérales agissant sur la roue.

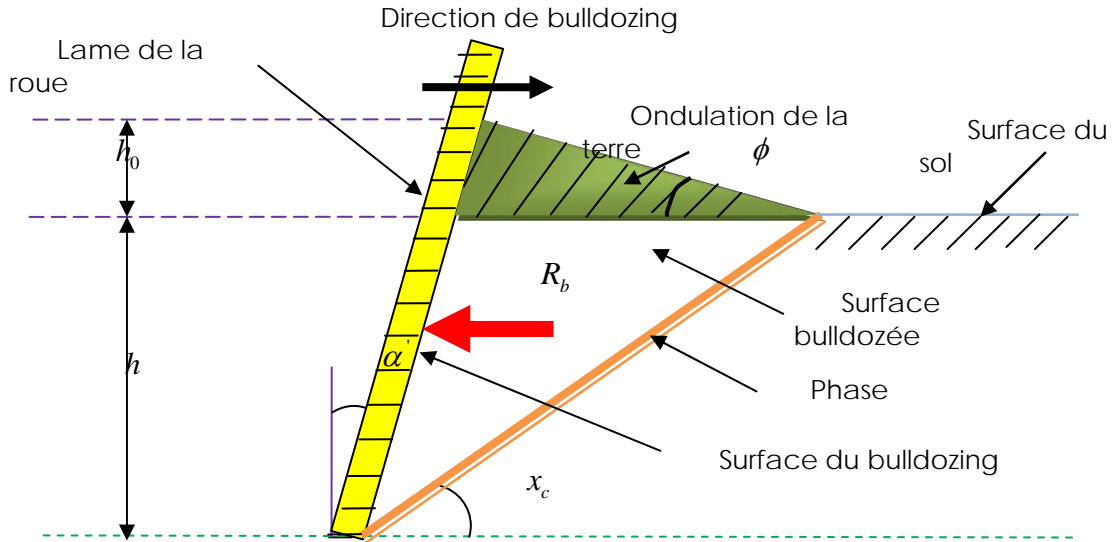
Comme montrent les figures 2.16 et 2.17  $F_u$  est la force produite par  $\tau_y(\theta)$  sous la roue, tant que  $F_s$  est la force de réaction générée par le phénomène de bulldozing sur la face latérale de la roue. Alors, l'équation précédente peut être réécrite comme suite :

$$F_y = \underbrace{\int_{\theta_r}^{\theta_f} rb \cdot \tau_y(\theta) d\theta}_{F_u} + \underbrace{\int_{\theta_r}^{\theta_f} R_b \cdot (r - z(\theta) \cos \theta) d\theta}_{F_s} \quad (2.27)$$

Où :

$R_b$  Est la résistance de bulldozing qui est développée lorsqu'une masse du sol considérable est déplacée par la roue. Ce type de résistance est courant lorsque la roue

comprime les couches de surfaces du sol et pousse le sol comprimé devant et derrière le pneu. Le phénomène du bulldozing est apparu dans le cas d'une roue large (largeur de roue supérieure 34cm environs), traversant des sols très meubles. Ce phénomène est estimé de causer une augmentation importante dans la résistance au mouvement globale pour des valeurs d'enfoncement supérieures à 6% du diamètre de la roue.



**Figure 2.18** Modèle estimant la résistance de bulldozing.

Dans le cas d'une roue horizontalement placée, l'angle d'approche  $\alpha'$  doit être nul.

Donc, la résistance de bulldozing  $R_b$  peut être calculée comme une fonction de  $z(\theta)$

comme suit :

$$R_b(z) = D_1 \left[ c \cdot z(\theta) + D_2 \cdot \frac{\rho_d \cdot z^2(\theta)}{2} \right] \quad (2.28)$$

Où :

$$D_1(X_c, \phi) = \cot X_c + \tan(X_c + \phi) \quad (2.29)$$

$$D_2(X_c, \phi) = \cot X_c + \cot^2 X_c / \cot \phi \quad (2.30)$$

$\rho_d$  est la densité du sol.

L'angle destructrice  $X_c$  est donnée par :

$$X_c = 45^\circ - \frac{\phi}{2} \quad (2.31).$$

On peut finalement aboutir à l'expression de la force latérale  $F_s$  comme suit :

$$\begin{aligned}
F_s &= \int_{\theta_r}^{\theta_f} R_b (r - z(\theta) \cos \theta) d\theta \\
&= \left\{ \cot X_c + \tan(X_c + \phi) \right\} \int_{\theta_r}^{\theta_f} \left\{ z(\theta) + \frac{1}{2} \rho x^2(\theta) \left( \cot X_c + \frac{\cot^2 X_c}{\cot \phi} \right) \right\} (r - z(\theta) \cos \theta) d\theta
\end{aligned} \tag{2.32}$$

### 2.9.1.6 Couple appliqué sur la roue

Le couple nécessaire à la rotation de la roue est donné par [Shib 04] :

$$T = r^2 b \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau(\theta) d\theta \tag{2.33}$$

Cette formule sera utilisée par la suite dans l'évaluation des moments exercés sur les roues du robot. La condition c'est que le couple appliqué doit être supérieur ou égale au couple résistant au roulement de la roue.

### 2.9.1.7 Evaluation de l'effort de résistance au roulement

La source prédominante de la résistance au roulement est la résistance due à la compaction du sol  $R_c$ , la seule solution pour réduire cette résistance est d'augmenter la taille de l'empreinte.

Elle est obtenue par l'intégrale suivant :

$$R_c = b \int_0^{z_{\max}} \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n dz \tag{2.34}$$

Or :

$$R_c = \left( \frac{k}{n+1} \right) z^{n+1} \tag{2.35}$$

Tel que

$$k = k_c + b k_\phi \tag{2.36}$$

Et puisque l'enfoncement  $z$  pour une roue rigide dans un sol meuble est donné par :

$$z = \left( \frac{3W \cdot \cos \theta}{(3-n)(k_c + b k_\phi) \sqrt{d}} \right)^{\frac{2}{(2n+1)}} \tag{2.37}$$

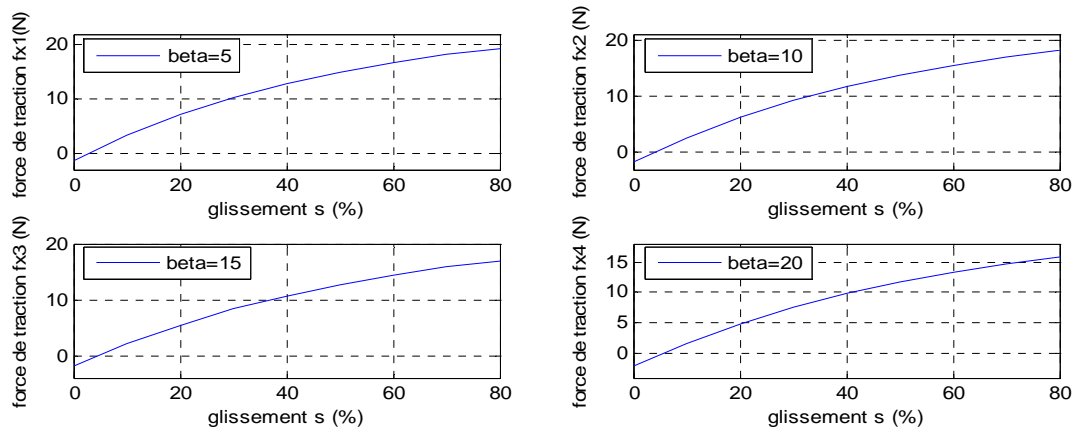
L'expression de la résistance au roulement devient :

$$R_c = \frac{1}{(3-n)^{\frac{2n+2}{2n+1}} (n+1) (k_c + b k_\phi)^{\frac{1}{2n+1}}} * \left( \frac{3W}{\sqrt{d}} \right)^{\frac{2n+2}{2n+1}} \tag{2.38}$$

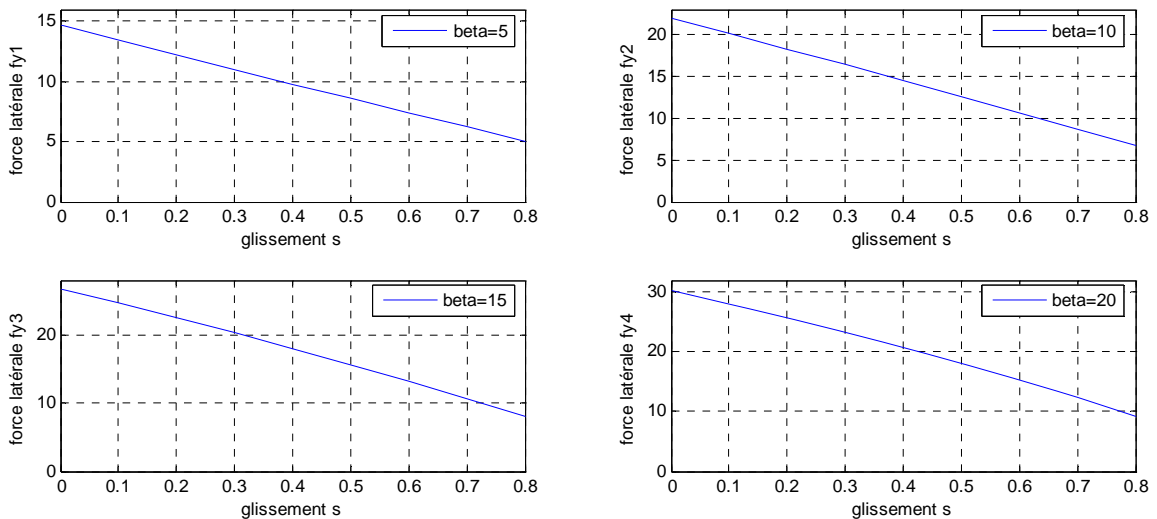
### - Application sur le mini Mirover

Le tableau (2.1) montre les paramètres du mini Mirover et les caractéristiques du sol, qui sont à la suite, un objet de simulation de l'interaction entre eux.

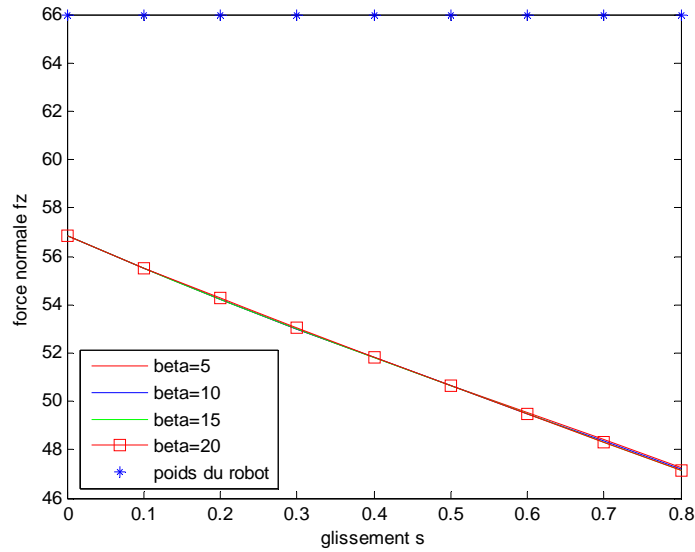
La vitesse de translation du robot est contrôlée de telle façon que le taux de glissement de la roue est mis entre 0.0 à 0.8 avec un pas de 0.1. Le taux de glissement est constant durant chaque marche. Alors que, la valeur de l'angle de glissement de la roue est variée entre  $5^\circ$  et  $20^\circ$  avec un pas de  $5^\circ$ .



**Figure 2.19** Force de traction nette pour différents taux de glissement et différentes valeurs de l'angle de glissement.



**Figure 2.20** Force latérale pour différents taux de glissement et différentes valeurs de l'angle de glissement.

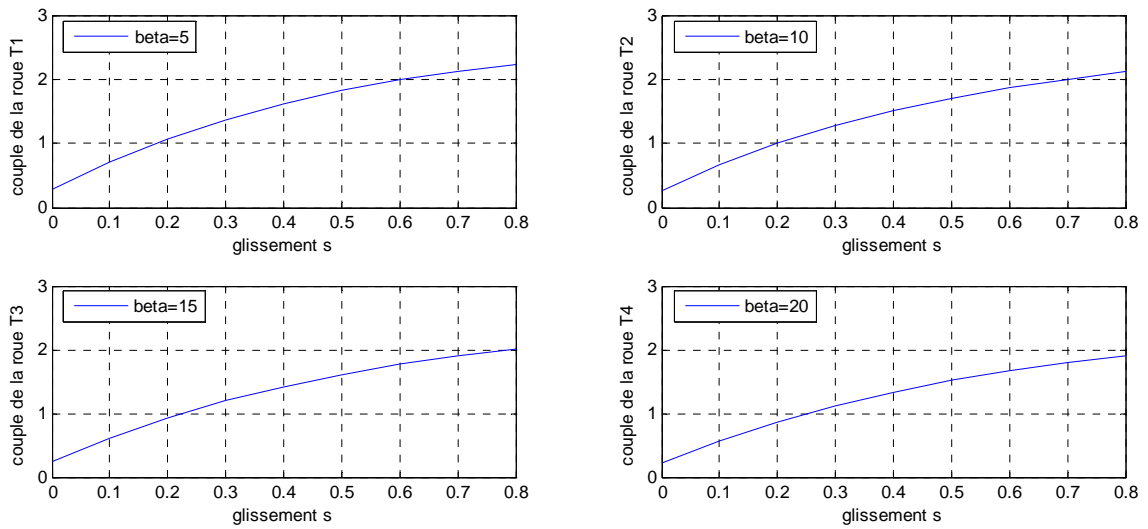


**Figure 2.21** force normale pour différents taux de glissement et différentes valeurs de l'angle de glissement.

De la figure (2.19), il est constaté que la force de traction nette augmente avec le taux de glissement. Ce comportement est du fait que la déformation du sol (effort de cisaillement) dans la direction longitudinale de la roue augmente avec le taux de glissement. Dans l'intervalle du taux de glissement de 0 à 0.3, la force de traction nette devient plus petite avec l'augmentation de l'angle de glissement puisque le mouvement cisailant dans la direction longitudinale décroît lorsque l'angle de glissement décroît.

La figure (2.20) montre que la force latérale décroît avec l'augmentation du taux de glissement et augmente avec l'augmentation de l'angle de glissement.

La figure (2.21) montre l'influence du taux de glissement sur la force normale, avec le glissement longitudinal du mini Minirover, la force appliquée verticalement sur le sol diminue, et le glissement latéral n'a pratiquement aucun effet sur la force verticale. La différence entre la force normale est le poids du robot (étoiles bleues) représente la force d'adhérence ou la force de pénétration (d'enfoncement).

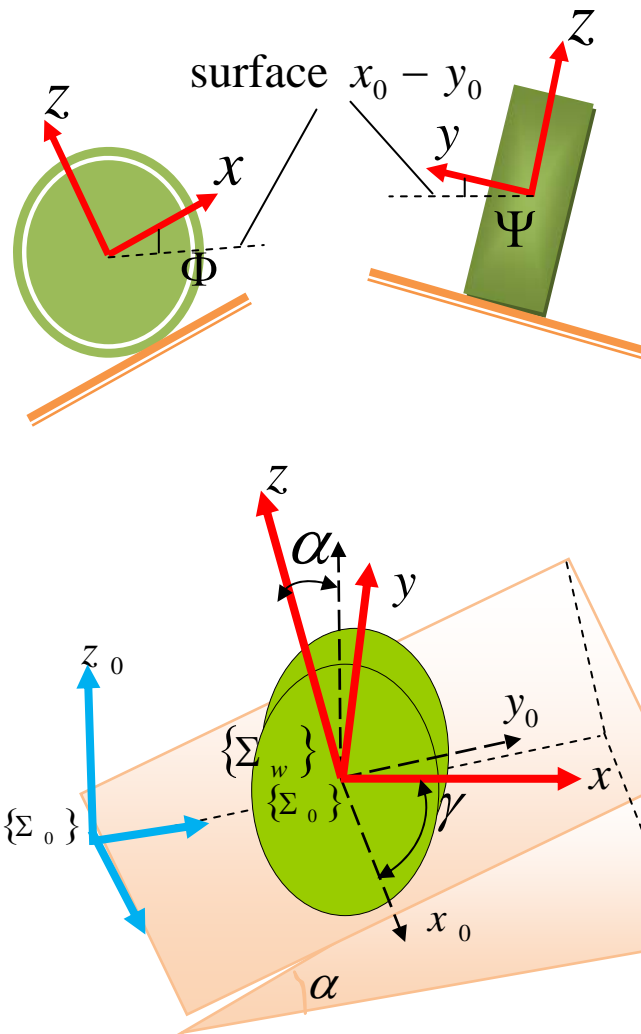


**Figure 2.22** Couple nécessaire à la rotation de la roue pour différents taux de glissement et différents valeurs de l'angle de glissement.

Dans la figure (2.22), le couple du moteur monté à l'intérieur de la roue augmente avec l'augmentation du taux de glissement puisque il s'agit d'une augmentation de la vitesse de glissement, et il diminue avec l'augmentation de l'angle de glissement car ce couple moteur est nécessaire au déplacement longitudinal seulement.

### 2.9.2 Modèle de l'interaction roue/ sol sur un plan incliné

On applique le modèle de l'interaction roue sol sur un sol incliné comme montre la figure (2.23) [Gen 05] :

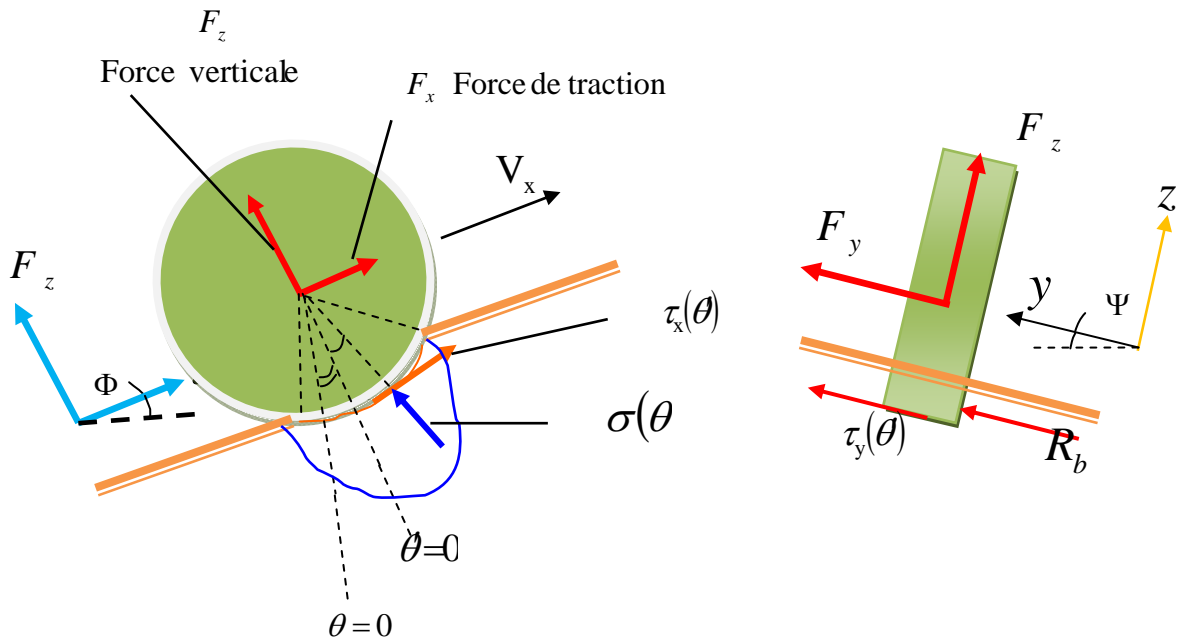


**Figure 2.23** Définition des coordonnées de la roue (surface inclinée).

Dans le cas d'une surface inclinée, la définition de système de coordonnées de la roue  $\{\Sigma_w\}$  est considérée d'être égal au cas horizontal. La surface inclinée est supposée uniforme, et l'angle d'inclinaison est dénoté par  $\alpha$ . Lorsque un système de coordonnées d'inertie est exprimé par  $\{\Sigma_0\}$  comme un système de la main droite, la direction, qui est parallèle à la direction transversale de la pente, est dénotée par  $x_0$ , et la direction verticale par  $z_0$ .

La transformation de coordonnées de  $\{\Sigma_0\}$  à  $\{\Sigma_w\}$  est produite par une rotation de  $\alpha$  autour de  $x_0$  et une autre rotation de  $\gamma$  sur  $z_0$ . L'angle composé entre la surface plane  $x_0 - y_0$  et  $x$  (ou  $y$ ) est déterminé par  $\Phi$  (ou  $\Psi$ ).





**Figure 2.24** Modèle de forces de la roue (surface inclinée).

Comme montre la figure 2.24, l'angle de la roue  $\theta'$  est donné par  $\theta' = \theta - \Phi$ , et aussi  $\theta'$  est supposé être zéro dans la direction normale de la surface inclinée.

On note que, la distribution d'effort est supposée équivalente au cas de la surface horizontale.

Utilisons  $\theta'$  au lieu de  $\theta$ , les forces de la roue dans le cas d'une surface inclinée est dérivées de la même méthode des équations 2.24, 2.25, et 2.27 comme suit :

$$F_x = rb \int_{\theta'_r}^{\theta'_f} \{ \tau_x(\theta') \cos \theta' - \sigma(\theta') \sin \theta' \} d\theta'$$

$$F_y = \int_{\theta'_r}^{\theta'_f} \{ rb \tau_y(\theta') + R_b \cdot (r - h(\theta') \cos \theta') \} d\theta'$$

$$F_z = rb \int_{\theta'_r}^{\theta'_f} \{ \tau_x(\theta') \sin \theta' + \sigma(\theta') \cos \theta' \} d\theta'$$

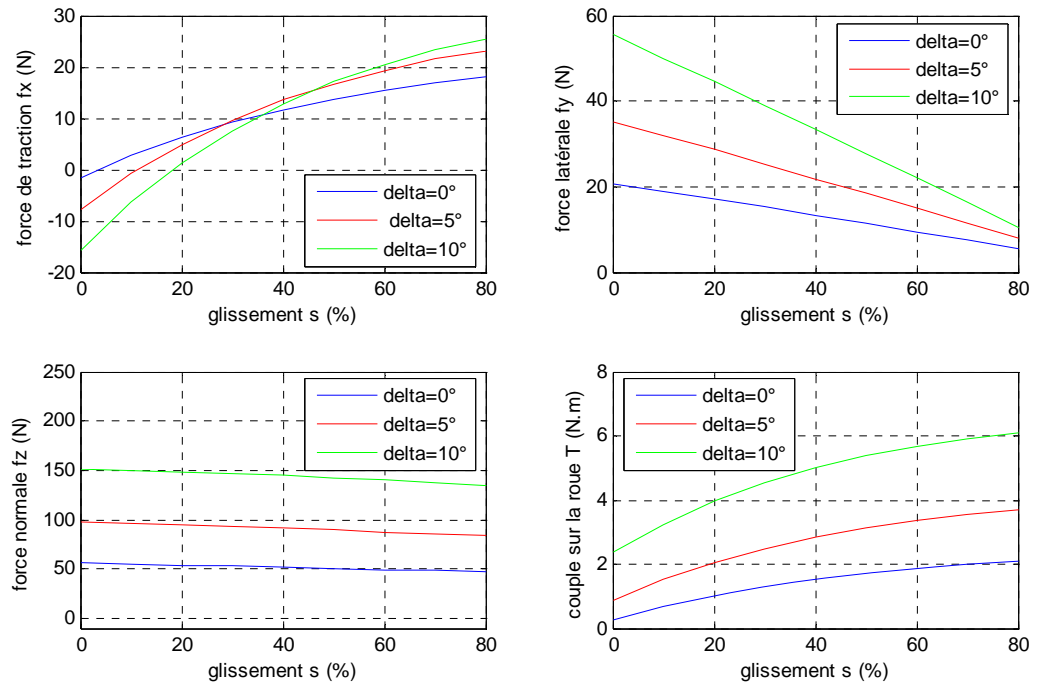
#### - Simulation de l'interaction roue/sol sur un plan incliné

Maintenant, on garde le même sol mais avec trois configurations différentes, en changeant l'angle d'inclinaison comme suit :

- Terrain plat (angle d'inclinaison  $0^\circ$ ).
- Terrain incliné par  $5^\circ$ .

- Terrain incliné par  $10^\circ$ .

L'angle de glissement est mis égal à  $10^\circ$  dans les trois cas étudiés.



**Figure 2.25** Les différentes forces et le couple appliqué sur la roue pour des terrains :

a) plat (bleu)

b) incliné par  $5^\circ$  (rouge)

c) incliné par  $10^\circ$  (vert).

Les résultats sont illustrés sur la figure (2.25) précédente.

Pour les quatre paramètres : force de traction, force latérale, force normale, et couple du moteur, l'inclinaison du terrain fait augmenter leurs valeurs, et c'est logique, parce que le poids du mini Minirover ajoute une force au mouvement, mais dans le cas du terrain plat le mouvement est assuré seulement par la rotation des roues. Pour des petites valeurs de glissement, on constate que les valeurs de la force longitudinale et latérale deviennent négatives, et c'est le phénomène de patinage des roues (rotation des roues sans déplacement), et est dû essentiellement à l'inclinaison du terrain et au couple de démarrage des moteurs.

## 2.10 Conclusion

Après avoir présenté les méthodes classiques de la terramecanique, on a étudié certains aspects concernant la caractérisation semi empirique du comportement des sols.

La connaissance du modèle de liaison détaillé est une étape primordiale dans l'étude et la modélisation de l'interaction roue sol, et puisque la rigidité de la roue influe sur les différents paramètres de comportement du sol ; on a étudié séparément chaque type de roue en donnant les forces générées et les résistances engendrées lors d'un roulement.

Pour les roues rigides on adopte le modèle de l'interaction roue/ sol qui nous permet de calculer les intégrales des efforts de cisaillements et l'effort normal en modélisant la force latérale par une décomposition en deux composantes : l'une est due au bulldozing, alors que l'autre est produite par l'effort de cisaillement dans la direction latérale. Et par la suite l'obtention des forces agissant sur la roue. Ainsi, le cas du modèle de l'interaction roue/ sol sur un terrain incliné a été étudié et analysé pour prévoir le comportement du Minirover dans ce cas particulier qui est d'ailleurs très courant.

# Chapitre03

MODELISATION DU MINIROVER

Dans ce chapitre on traite le modèle géométrique et cinématique pour notre modèle du robot hybride ceci dan l'objectif de contrôle du suivi de trajectoire.

La particularité de ces modèles repose sur l'intégration des phénomènes d'interaction des roues du robot sur les terrains naturels (accidentés).

Nous envisageons de traiter également, le modèle cinématique complet d'un robot mobile articulé avec prise en considération de différentes formes de dérives, à savoir : le glissement latéral, le glissement longitudinal, ces informations s'avèrent très utiles pour éviter les glissements éventuels, dérapage, renversement...enfin c'est aussi utile pour le contrôle du mouvement et de navigation du Minirover.

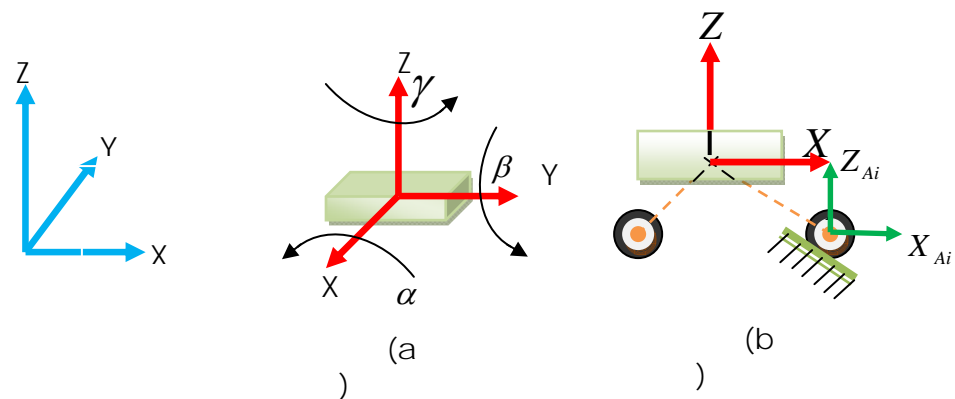
L'accent sera ensuite mis sur les équations de mouvement du Minirover dérivé du modèle cinématique, qui sera utilisé par la suite dans la simulation du mouvement [Mahm 05].

### 3.1. Fondements théoriques

On définit un robot mobile articulé (R.M.A) comme un robot mobile à roues constituant d'un corps principal connecté aux roues à travers des liaisons et des articulations.

Le mini Minirover a une capacité de mouvoir sur des terrains irréguliers avec le roulement des roues et l'ajustement des articulations, et le seul contact avec le sol est à travers la surface de la roue.

La figure 3.1 représente une description géométrique générale d'un R.M.A.



**Figure.3.1** Description géométrique d'un R.M.A (a) vue perspective (b) vue latérale.

On définit également les repères liés à chaque partie du corps du robot, en l'occurrence un repère fixe dit repère de référence  $W(X, Y, Z)$ , un autre repère relatif lié au châssis du

robot  $R(x,y,z)$ , et celui relatif à chaque roue ,et fixé au centre de la roue est  $A_i(X_{Ai}, Y_{Ai}, Z_{Ai})$

Afin d'analyser les propriétés cinématiques de ce type de mécanisme, il est possible de le décomposer en trois sous-ensembles : la plate-forme, les pattes, et les roues avec leur liaisons au sol.

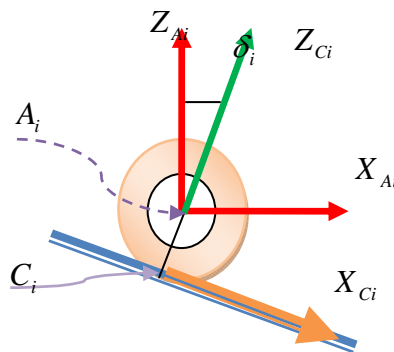
### ➤ Développement du modèle cinématique

A chaque instant  $t$ , le mini Minirover est muni un repère de coordonnées instantané  $R$  attaché à son corps qui se déplace avec lui, qui est relatif par rapport au repère de coordonnées fixe  $W$ .

On définit comme vecteur de coordonnées généralisées par la grandeur :

$$U = [X \ Y \ Z \ \Phi_x \ \Phi_y \ \Phi_z]^T$$

Qui est défini par rapport au repère fixe  $W$ , où  $(X, Y, Z)$  définissent la position, et  $(\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z)$  est le vecteur d'orientation du robot suivant la notion de roulis, tangage, lacet.



**Figure.3.2** Repères de coordonnées pour le contact de la roue  $i$  sur le sol.

Chaque roue du Minirover est dotée également d'un repère de coordonnées, instantané  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  attaché à l'essieu de la roue et relativement défini au repère de coordonnées du corps du Minirover  $R$ , où  $n$  est le nombre de roues. La transformation entre  $R$  et chaque repère de coordonnées de l'essieu de la roue  $A_i$ , noté par la transformation

homogène  $T_{R,A_i(q)}$ , dépend des liaisons et des articulations spécifiques représentées ici par  $v_q \times 1$  vecteur de variables des articulations  $q$  figure ( ).

La ligne en pointillée dans la figure.1 (b) représente n'importe quelle ensemble de liaisons et d'articulations qui existent entre ces deux repères, y inclut le mécanisme de manœuvre.

Dans une étude préliminaire, on considère pour cette configuration de robot, que chaque roue peut être assimilée à un disque rigide avec supposition d'un contact ponctuel avec la surface du sol.

Afin de produire une évaluation réaliste des modes de déplacement du robot et une réalisation correcte de leur commande, il est nécessaire d'intégrer les modèles d'interaction roue/sol tels que ceux développés dans le cadre de la terramécanique.

Un repère de coordonnées  $C_i(X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci})$  est défini à chaque point de contact de la roue, comme il est représenté dans la figure 3.2. Où son axe  $Z_{Ai}$  ; est tangentiel à la surface du point de contact, et son axe  $Z_{Ci}$  est normal au sol.

L'angle de contact  $\delta_i$  est l'angle entre l'axe  $Z_{Ai}$  de l'*i*ème essieu de roue et  $Z_{Ci}$  de coordonnées de contact, comme montrer la figure.02. Cet angle de contact est la clé de distinction entre les robots mobiles à roues (R.M.R) où il est toujours nul, et les (R.M.A) dont l'angle de contact est variable, Ce dernier joue un rôle important dans l'analyse cinématique des R.M.A.

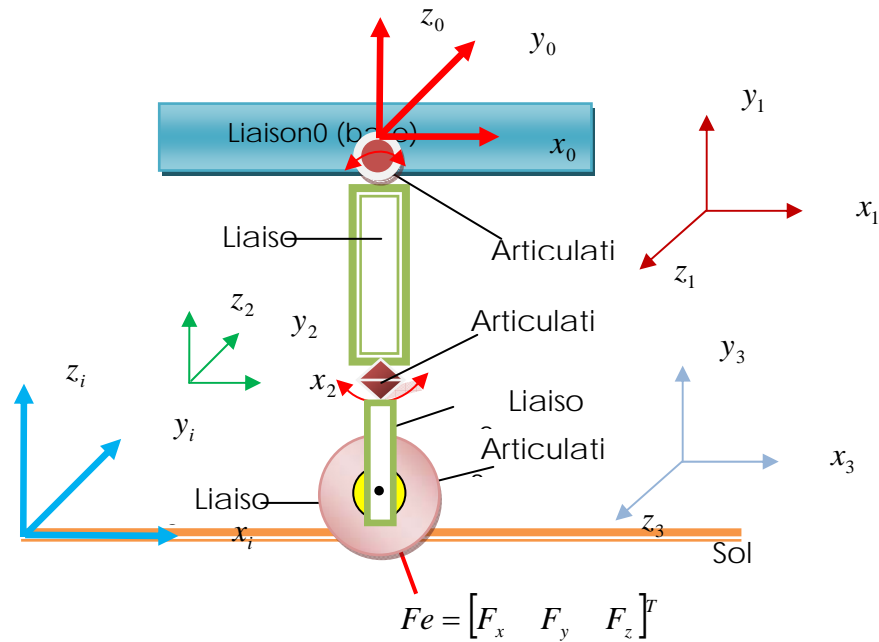
Ainsi le repère de coordonnées de contact  $C_i$  est obtenu à partir du repère de coordonnées d'essieu  $A_i$  en faisant tourner l'essieu par un angle  $\delta_i$ , puis une translation par le rayon de la roue  $r$  dans la direction négative des  $z$ . La matrice de transformation correspondant est  $T_{A_i,C_i}$ , qui correspond aussi à une rotation autour de l'axe  $OY$ , est donnée par :

$$T_{A_i,C_i}(\delta_i) = \begin{bmatrix} c\delta_i & 0 & s\delta_i & -rs\delta_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\delta_i & 0 & c\delta_i & -rc\delta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Où :  $i = 1, \dots, n$  et  $s \equiv \sin$  et  $c \equiv \cos$ .

La matrice de transformation homogène du repère de référence du Mini-over au repère de contact de la roue  $C_i$  est obtenue par :

$$T_{R,C_i}(q, \delta_i) = T_{R,A_i}(q) T_{A_i,C_i}(\delta_i).$$

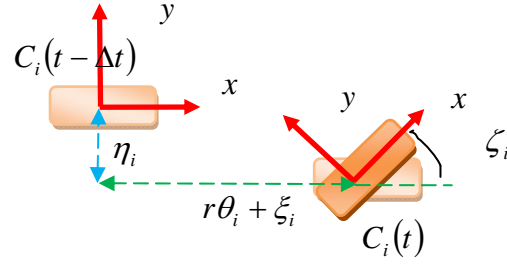


**Figure 3.3** Paramétrage de l'ensemble roue – patte.

Pour décrire le mouvement réel du robot, c'est-à-dire, oublier le modèle idéal non suffisant pour notre actuel, qui ne permet pas d'inclure tous les paramètres mis en jeu pour mettre en évidence ce robot sous une forme plus adéquate et prête a toute forme de contrôle, on est obligé de prendre en considération tous les paramètres liés au facteur de glissement.

On considère alors pour ce cas réel [Mahm 05], les repères de contact instantanés  $C_i(t - \Delta t)$  et  $C_i(t)$ , où  $\Delta t$  est un accroissement qui décrit un temps d'incrément, qui montre l'évolution du mouvement de la roue à des espaces de temps différents, comme montre la figure suivante :





**Figure.3.4** Evolution du Mouvement de la roue.

On note alors par le mouvement de la roue au temps  $(t - \Delta t)$  par  $C_i(t - \Delta t) \equiv \bar{C}_i$  et au temps  $t$  par  $C_i(t) \equiv C_i$  ce qui correspond à une transformation de coordonnées relatif à mouvement de translation de  $(r\theta_i + \xi_i)$  le long de l'axe  $X_{C_i}$ , où  $\theta_i$  est la position angulaire (orientation) de la  $i$ ème roue, et  $\xi_i$  est l'angle de dérive suivant la rotation sur l'axe  $X_{C_i}$  (glissement longitudinal) ;[voir chapitre ].

On note également les dérives suivant  $Y_{C_i}$  (glissement latéral) ; et  $Z_{C_i}$  (le glissement due à l'orientation), respectivement  $\eta_i$ , et  $\beta_i$  [voir chapitre ]. et l'enfoncement de la roue suivant l'axe  $Z_{C_i}$  négatif est  $z_t$  du fait que le saut de la roue n'a pas lieu.

La matrice de passage homogène est alors :

$$T_{\bar{C}_i, C_i} = \begin{bmatrix} c\beta_i & s\beta_i & 0 & r\theta_i + \xi_i \\ s\beta_i & c\beta_i & 0 & \eta_i \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La matrice de transformation du point de contact de la roue, à l'instant  $t - \Delta t$  notée par  $\bar{C}_i$ , au châssis  $R$  du Mini Mirover est :

$$T_{\bar{C}_i, R} = T_{\bar{C}_i, C_i}(\theta_i, \varepsilon_i) T_{C_i, A_i}(\delta_i) T_{A_i, R}(q) \quad (3.3)$$

Où  $\varepsilon_i = [\xi_i \quad \zeta_i \quad \eta_i]^T$  est le vecteur représentant tous les paramètres liés au glissement.

$$T_{C_i, A_i}(\delta_i) = (T_{A_i, C_i}(\delta_i))^{-1} \text{ et } T_{A_i, R}(q) = (T_{R, A_i}(q))^{-1} .$$

Les dépendances des matrices de transformation sont présentées avec des quantités entre crochets.

Nous définissons ainsi le vecteur décrivant le glissement du robot par :

$$\lambda_i = [\xi_i \quad \beta_i \quad \eta_i]^T$$

Pour quantifier le mouvement, on doit calculer le taux de changement du vecteur des coordonnées généralisé du Mini Mirover :

$$\dot{u} = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \dot{\phi}_x \quad \dot{\phi}_y \quad \dot{\phi}_z]^T ,$$

En fonction de la variation des angles des articulations du Mirover, et la variation de l'angle de rotation de la *i*ème roue  $\dot{\theta}_i$ , ainsi que le taux de variation du glissement de la *i*ème roue  $\dot{\beta}_i$ .

Pour cela, on considère la matrice  $T_{\bar{R}, R}$  qui décrit la transformation du repère du Mirover à l'instant  $t - \Delta t$  au même repère à l'instant  $t$ , qui peut être écrite sous la forme :

$$T_{\bar{R}, R} = T_{\bar{R}, \bar{C}_i} T_{\bar{C}_i, R} .$$

Puisque  $T_{\bar{R}, \bar{C}_i}$  est indépendant du temps, la dérivée  $T_{\bar{R}, R}$  par rapport au temps est :

$$\dot{T}_{\bar{R}, R} = T_{\bar{R}, \bar{C}_i} \dot{T}_{\bar{C}_i, R} \quad (3.4)$$

La transformation  $\dot{T}_{\bar{C}_i, R}$  définit le mouvement du repère de référence du Mirover  $R$  relatif de la roue  $i$  au repère  $\bar{C}_i$ .

Pour notre Mini Mirover spécifique,  $T_{\bar{C}_i, R}$  est déjà explicitée dans l'équation (3.3), et sa dérivée peut être calculée comme suit :

$$\dot{T}_{\bar{C}_i, R} = \frac{\partial T_{\bar{C}_i, R}}{\partial q} \dot{q} + \frac{\partial T_{\bar{C}_i, R}}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_i + \frac{\partial T_{\bar{C}_i, R}}{\partial \varepsilon_i} \dot{\varepsilon}_i + \frac{\partial T_{\bar{C}_i, R}}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i \quad (3.5)$$

On évalue les dérivées partielles de (3.5) dans les conditions normales de roulement.

La matrice,  $\dot{T}_{\bar{R},R}$  représente le mouvement combiné de rotation et de translation dans le cas général du mouvement d'un corps, ceci se traduit par la matrice homogène comme suit :

$$\dot{T}_{\bar{R},R} = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\phi}_z & \dot{\phi}_y & \dot{x} \\ \dot{\phi}_z & 0 & -\dot{\phi}_x & \dot{y} \\ -\dot{\phi}_y & \dot{\phi}_x & 0 & \dot{z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

On note que :  $\dot{T}_{\bar{R},R}$  est une matrice antisymétrique, qui correspond aussi au résultat du produit matriciel de l'équation (3.4).

En substituant (3.5) et (3.6) dans (3.4), évaluant la matrice -produit, et égalisant les éléments de la matrice des cotés de l'équation résultante, on peut déterminer le vecteur des taux de configuration du Minirover  $\dot{u}$  en fonction de  $\dot{q}$ ,  $\dot{\delta}_i$ ,  $\dot{\theta}_i$  et  $\dot{\lambda}_i$ .

En outre, ces équations varient linéairement par rapport aux leurs dérivées en fonction du temps  $\dot{q}$ ,  $\dot{\delta}_i$ ,  $\dot{\theta}_i$  et  $\dot{\varepsilon}_i$ , comme apparaît à l'équation (3.5).

Cela conduit à une équation de la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} & \dot{\phi}_x & \dot{\phi}_y & \dot{\phi}_z \end{bmatrix}^T = J_i \begin{bmatrix} \dot{q} & \dot{\theta}_i & \dot{\varepsilon}_i & \dot{\delta}_i \end{bmatrix}^T \quad (3.7)$$

Où  $J_i$  est la matrice Jacobienne de la roue de dimension  $6 \times (v_q + 5)$ , et  $v_q$  est la dimension du vecteur des articulations  $q$ . C'est-à-dire de la forme :

$$\dot{X} = J \cdot \dot{Q}$$

L'équation (3.7) décrit la contribution du mouvement d'une roue individuelle avec ses articulations connectées dans le mouvement du corps du Mini Minirover.

Le mouvement net du robot est le produit du mouvement de l'ensemble de toutes les roues, et peut être obtenue en combinant (3.7) avec une équation d'une matrice singulière comme :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_6 \\ \mathbf{I}_6 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{I}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi}_x \\ \dot{\phi}_y \\ \dot{\phi}_z \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varepsilon} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad E \dot{u} = J \dot{p} \quad (3.8)$$

Où :

$E$  Est une matrice  $[6n \times n]$  qui est obtenue en empilant  $n$   $6 \times 6$  matrices identités,

$\dot{q}$  Est de dimension  $[v_q \times 1]$  vecteur des angles des articulations du Minirover,

$\dot{\theta}$  Est de dimension  $[n \times 1]$  vecteur de rotation des roues,

$\dot{\lambda}$  Est le  $3n \times 1$  vecteur qui regroupe l'ensemble composantes relatives aux glissements c'est à dire, le taux de roulement  $\dot{\xi}$ , le taux de rotation  $\dot{\beta}$ , le taux du glissement latéral  $\dot{\eta}$ ,

$\dot{\delta}$  Est de dimension  $[n \times 1]$  vecteur des taux des angles de contact.

La matrice Jacobienne du Minirover  $J$  est de dimension  $[6n \times (v_q + 5n)]$  formée des matrices Jacobiennes des roues individuelles  $J_i, i = 1, 2, \dots, n$ ,

$\dot{p}$  Est de dimension  $[(v_q + 5n) \times 1]$  vecteur des taux angulaires composites.

Dans ce qui suit, on applique la modélisation cinématique précédente sur un robot mobile articulé (RMA).

### 3.2. Modélisation géométrique et cinématique du mini Minirover

#### 3.2.1 Modélisation géométrique par la méthode de Denavit Hertenberg

On utilise la méthode de D-H pour modéliser géométriquement le Minirover articulé à quatre roues et quatre pattes, en donnant les paramètres géométriques suivants :

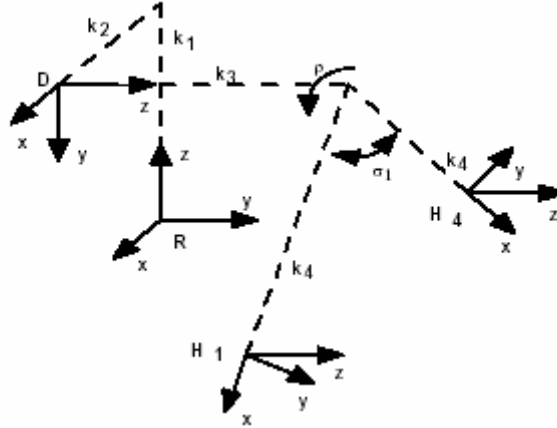
$k_1 = 0$  cm Distance verticale entre la référence du Minirover (R) et le différentiel (D).

$k_2 = 0$  cm Distance antérieure de la référence du Minirover (R) et le différentiel (D).

$k_3 = 20$  cm Moitié de la largeur du Minirover (Distance horizontale du centre de l'essieu).

$k_4 = 30$  cm Longueur des pattes du Minirover à partir des hanches des articulations jusqu'aux essieux.

$k_5 = 6.5$  cm Rayon de la roue (les quatre roues sont identiques).



**Figure 3.4** Repères : de référence R, différentiel D, des hanches H

L'exécution du programme donne la matrice de Denavit Hertenberg suivante:

➤ première roue, première patte :

$$T_{R,C1} = (T_{R,D})(T_{D,H1})(T_{S1,A1})(T_{A1,C1}) \quad (4.1)$$

$$T_{R,C1} = \begin{bmatrix} (c\rho c\psi_1 c\delta_1 + s\rho s\delta_1) & -c\rho s\psi_1 & (c\rho c\psi_1 s\delta_1 + s\rho c\delta_1) & T_{14} \\ s\psi_1 c\delta_1 & c\psi_1 & s\psi_1 s\delta_1 & T_{24} \\ (-s\rho c\psi_1 c\delta_1 - c\rho s\delta_1) & s\rho s\psi_1 & (s\rho c\psi_1 s\delta_1 + c\rho c\delta_1) & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$T_{14} = 0.3 \cdot \sin(\sigma_1 - \rho) - 0.065 \cdot (\cos(\rho) \cdot \cos(\psi_1) \cdot \cos(\delta_1) + \sin(\rho) \cdot \sin(\delta_1))$$

$$T_{24} = 0.2 - 0.065 \cdot \sin \psi_1 \cdot \sin \delta_1$$

$$T_{34} = -0.3 \cdot \cos(\sigma_1 - \rho) - 0.065 \cdot (\sin \rho \cdot \cos \psi_1 \cdot \sin \delta_1 + \cos \rho \cdot \cos \delta_1).$$

➤ deuxième roue, deuxième patte :

$$T_{R,C2} = (T_{R,D})(T_{D,H2})(T_{S2,A2})(T_{A2,C2})$$

$$T_{R,C2} = \begin{bmatrix} (c\rho c\psi_2 c\delta_2 - s\rho s\delta_2) & -c\rho s\psi_2 & (c\rho c\psi_2 s\delta_2 - s\rho c\delta_2) & T_{14} \\ s\psi_2 c\delta_2 & c\psi_2 & s\psi_2 s\delta_2 & T_{24} \\ (s\rho c\psi_2 c\delta_2 - c\rho s\delta_2) & -s\rho s\psi_2 & (-s\rho c\psi_2 s\delta_2 + c\rho c\delta_2) & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tel que:

$$T_{14} = 0.3 \cdot \sin(\sigma_2 + \rho) - 0.065 \cdot (\cos \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \cos \delta_2 - \sin \rho \cdot \sin \delta_2)$$

$$T_{24} = -0.2 - 0.065 \cdot \sin \psi_2 \cdot \sin \delta_2$$

$$T_{34} = -0.3 \cdot \cos(\sigma_2 + \rho) - 0.065 \cdot (-\sin \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \sin \delta_2 + \cos \rho \cdot \cos \delta_2).$$

➤ troisième roue, troisième patte :

$$T_{R,C3} = (T_{R,D})(T_{D,H3})(T_{S3,A3})(T_{A3,C3})$$

$$T_{R,C3} = \begin{bmatrix} (c\rho c\psi_3 c\delta_3 - s\rho s\delta_3) & -c\rho s\psi_3 & (c\rho c\psi_3 s\delta_3 - s\rho c\delta_3) & T_{14} \\ s\psi_3 c\delta_3 & c\psi_3 & s\psi_3 s\delta_3 & T_{24} \\ (s\rho c\psi_3 c\delta_3 - c\rho s\delta_3) & -s\rho s\psi_3 & (-s\rho c\psi_3 s\delta_3 + c\rho c\delta_3) & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$T_{14} = 0.3 \cdot \sin(-\sigma_3 + \rho) - 0.065 \cdot (\cos(\rho) \cdot \cos(\psi_3) \cdot \cos(\delta_3) + \sin(\rho) \cdot \sin(\delta_3))$$

$$T_{24} = -0.2 - 0.065 \cdot \sin \psi_3 \cdot \sin \delta_3$$

$$T_{34} = -0.3 \cdot \cos(-\sigma_3 + \rho) - 0.065 \cdot (-\sin \rho \cdot \cos \psi_3 \cdot \sin \delta_3 + \cos \rho \cdot \cos \delta_3).$$

➤ Quatrième roue, quatrième patte :

$$T_{R,C4} = \begin{bmatrix} (c\rho c\psi_4 c\delta_4 + s\rho s\delta_4) & -c\rho s\psi_4 & (c\rho c\psi_4 s\delta_4 + s\rho c\delta_4) & T_{14} \\ s\psi_4 c\delta_4 & c\psi_4 & s\psi_4 s\delta_4 & T_{24} \\ (-s\rho c\psi_4 c\delta_4 - c\rho s\delta_4) & s\rho s\psi_4 & (s\rho c\psi_4 s\delta_4 + c\rho c\delta_4) & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$T_{14} = 0.3 \cdot \sin(-\sigma_4 + \rho) - 0.065 \cdot (\cos(\rho) \cdot \cos(\psi_4) \cdot \cos(\delta_4) + \sin(\rho) \cdot \sin(\delta_4))$$

$$T_{24} = -0.2 - 0.065 \cdot \sin \psi_4 \cdot \sin \delta_4$$

$$T_{34} = -0.3 \cdot \cos(-\sigma_4 + \rho) - 0.065 \cdot (-\sin \rho \cdot \cos \psi_4 \cdot \sin \delta_4 + \cos \rho \cdot \cos \delta_4).$$

### 3.2.2 Modélisation cinématique du Minirover

La matrice Jacobienne est trouvée en exécutant le même programme, en Matlab, précédent et en respectant l'algorithme de l'annexe.01.

On calcule la matrice Jacobienne pour la première roue, et les autres sont pratiquement de la même forme.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ 0 & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ 0 & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ 0 & J_{42} & 0 & J_{44} & 0 & J_{46} \\ -1 & 0 & 0 & J_{54} & 0 & J_{56} \\ 0 & J_{62} & 0 & J_{64} & 0 & J_{66} \end{bmatrix}}_{J_1} \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\xi}_1 \\ \dot{\zeta}_1 \\ \dot{\eta}_1 \\ \dot{\delta}_1 \end{bmatrix}$$

Les contributions des différents angles du Minirover sur le mouvement (la vitesse) en avant du Minirover sont données la première et la deuxième ligne de la matrice Jacobienne, et qui sont :

$$J_{12} = -0.2 \cdot \cos \rho.$$

$$J_{13} = 0.065 \cdot \cos \rho \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \delta_1 - 0.065 \cdot \sin \rho \cdot \sin \delta_1.$$

$$J_{14} = 0.2 \cdot \cos \rho \cdot \cos \delta_1 - 0.2 \cdot \sin \rho \cdot \cos \psi_1 \cdot \sin \delta_1 + 0.3 \cdot \cos(\sigma_1 - \rho) \cdot \sin \psi_1 \cdot \sin \delta_1.$$

$$J_{15} = -\cos \rho \cdot \sin \psi_1.$$

$$J_{16} = -0.2 \cdot \sin \rho \cdot \sin \psi_1 - 0.3 \cdot \cos(\sigma_1 - \rho) \cdot \cos \psi_1.$$

$$J_{22} = 0.3 \cdot \sin \sigma_1.$$

$$J_{23} = 0.065 \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \delta_1.$$

$$J_{24} = -0.3.\sin \sigma_1.\cos \delta_1 - 0.3.\cos \sigma_1.\cos \psi_1.\sin \delta_1 .$$

$$J_{25} = \cos \psi_1 .$$

$$J_{26} = -0.3.\cos \sigma_1.\sin \psi_1 .$$

Les contributions des différents angles sur le mouvement vertical du Minirover sont données par la troisième ligne de la matrice, tel que :

$$J_{32} = 0.2.\sin \rho .$$

$$J_{33} = 0.09.\sin \rho.\cos \psi_1.\cos \delta_1 - 0.09.\cos \rho.\sin \delta_1 .$$

$$J_{34} = -0.2.\sin \rho.\cos \delta_1 - 0.2.\cos \rho.\cos \psi_1.\sin \delta_1 + 0.3.\sin(\sigma_1 - \rho).\sin \psi_1.\sin \delta_1 .$$

$$J_{35} = \sin \rho.\sin \psi_1 .$$

$$J_{36} = -0.2.\cos \rho.\sin \psi_1 - 0.3.\sin(\sigma_1 - \rho).\cos \psi_1 .$$

Les trois dernières lignes déterminent les contributions des articulations du Minirover dans l'orientation du Minirover, et sont données par :

$$J_{42} = -\sin \rho .$$

$$J_{44} = \sin \rho.\cos \delta_1 + \cos \rho.\cos \psi_1.\sin \delta_1 .$$

$$J_{46} = \cos \rho.\sin \psi_1 .$$

$$J_{54} = \sin \psi_1.\sin \delta_1 .$$

$$J_{56} = -\cos \psi_1 .$$

$$J_{62} = -\cos \rho .$$

$$J_{64} = \cos \rho.\cos \delta_1 - \sin \rho.\cos \psi_1.\sin \delta_1 .$$

$$J_{66} = -\sin \rho.\sin \psi_1 .$$

Pour la deuxième roue :



$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ 0 & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ 0 & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ 0 & J_{42} & 0 & J_{44} & 0 & J_{46} \\ 1 & 0 & 0 & J_{54} & 0 & J_{56} \\ 0 & J_{62} & 0 & J_{64} & 0 & J_{66} \end{bmatrix}}_{J_2} \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\theta}_2 + \dot{\xi}_2 \\ \dot{\zeta}_2 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{\delta}_2 \end{bmatrix}$$

$$J_{12} = 0.2 \cdot \cos \rho .$$

$$J_{13} = 0.09 \cdot \cos \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \cos \delta_2 + 0.09 \cdot \sin \rho \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{14} = -0.2 \cdot \cos \rho \cdot \cos \delta_2 - 0.2 \cdot \sin \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \sin \delta_2 + 0.3 \cdot \cos(\sigma_2 + \rho) \cdot \sin \psi_2 \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{15} = -\cos \rho \cdot \sin \psi_2 .$$

$$J_{16} = -0.2 \cdot \sin \rho \cdot \sin \psi_2 - 0.3 \cdot \cos(\sigma_2 + \rho) \cdot \cos \psi_2 .$$

$$J_{22} = 0.3 \cdot \sin \sigma_2 .$$

$$J_{23} = 0.09 \cdot \sin \psi_2 \cdot \cos \delta_2 .$$

$$J_{24} = -0.3 \cdot \sin \sigma_2 \cdot \cos \delta_2 - 0.3 \cdot \cos \sigma_2 \cdot \cos \psi_2 \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{25} = \cos \psi_2 .$$

$$J_{26} = -0.3 \cdot \cos \sigma_2 \cdot \sin \psi_2 .$$

$$J_{32} = 0.2 \cdot \sin \rho .$$

$$J_{33} = 0.09 \cdot \sin \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \cos \delta_2 - 0.09 \cdot \cos \rho \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{34} = -0.2 \cdot \sin \rho \cdot \cos \delta_2 + 0.2 \cdot \cos \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \sin \delta_2 + 0.3 \cdot \sin(\sigma_2 + \rho) \cdot \sin \psi_2 \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{35} = -\sin \rho \cdot \sin \psi_2 .$$

$$J_{36} = 0.2 \cdot \cos \rho \cdot \sin \psi_2 - 0.3 \cdot \sin(\sigma_2 + \rho) \cdot \cos \psi_2 .$$

$$J_{42} = \sin \rho .$$

$$J_{44} = -\sin \rho \cdot \cos \delta_2 + \cos \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{46} = \cos \rho \cdot \sin \psi_2 .$$

$$J_{54} = \sin \psi_2 \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{56} = -\cos \psi_2 .$$

$$J_{62} = -\cos \rho .$$

$$J_{64} = \cos \rho \cdot \cos \delta_2 + \sin \rho \cdot \cos \psi_2 \cdot \sin \delta_2 .$$

$$J_{66} = \sin \rho \cdot \sin \psi_2 .$$

Pour la troisième roue:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ 0 & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ 0 & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ 0 & J_{42} & 0 & J_{44} & 0 & J_{46} \\ 1 & 0 & 0 & J_{54} & 0 & J_{56} \\ 0 & J_{62} & 0 & J_{64} & 0 & J_{66} \end{bmatrix}}_{J_3} \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\psi}_3 \\ \dot{\theta}_3 + \dot{\xi}_3 \\ \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\eta}_3 \\ \dot{\delta}_3 \end{bmatrix} \quad J_{12} = 0.2 \cdot \cos \rho .$$

$$J_{13} = 0.09 \cdot \cos \rho \cdot \cos \psi_3 \cdot \cos \delta_3 + 0.09 \cdot \sin \rho \cdot \sin \delta_3 .$$

$$J_{14} = -0.2 \cdot \cos \rho \cdot \cos \delta_3 - 0.2 \cdot \sin \rho \cdot \cos \psi_3 \cdot \sin \delta_3 + 0.3 \cdot \cos(\sigma_3 - \rho) \cdot \sin \psi_3 \cdot \sin \delta_3 .$$

$$J_{15} = -\cos \rho \cdot \sin \psi_3 .$$

$$J_{16} = -0.2 \cdot \sin \rho \cdot \sin \psi_3 - 0.3 \cdot \cos(\sigma_3 - \rho) \cdot \cos \psi_3 .$$

$$J_{22} = -0.3 \cdot \sin \sigma_3 .$$

$$J_{23} = 0.09 \cdot \sin \psi_3 \cdot \cos \delta_3 .$$

$$J_{24} = 0.3 \cdot \sin \sigma_3 \cdot \cos \delta_3 - 0.3 \cdot \cos \sigma_3 \cdot \cos \psi_3 \cdot \sin \delta_3$$

$$J_{25} = \cos \psi_3 .$$

$$J_{26} = -0.3 \cdot \cos \sigma_3 \cdot \sin \psi_3 .$$

$$J_{32} = 0.2 \cdot \sin \rho .$$

$$J_{33} = 0.09 \cdot \sin \rho \cdot \cos \psi_3 \cdot \cos \delta_3 - 0.09 \cdot \cos \rho \cdot \sin \delta_3 .$$

$$J_{34} = -0.2 \cdot \sin \rho \cdot \cos \delta_3 + 0.2 \cdot \cos \rho \cdot \cos \psi_3 \cdot \sin \delta_3 - 0.3 \cdot \sin(\sigma_3 - \rho) \cdot \sin \psi_3 \cdot \sin \delta_3 .$$

$$J_{35} = -\sin \rho \cdot \sin \psi_3 .$$

$$J_{36} = 0.2 \cdot \cos \rho \cdot \sin \psi_3 + 0.3 \cdot \sin(\sigma_3 - \rho) \cdot \cos \psi_3 .$$

$$J_{42} = \sin \rho .$$

$$J_{44} = -\sin \rho \cdot \cos \delta_3 + \cos \rho \cdot \cos \psi_3 \cdot \sin \delta_3 .$$

$$J_{46} = \cos \rho \cdot \sin \psi_3 .$$

$$J_{54} = \sin \psi_3 \cdot \sin \delta_3 .$$

$$J_{56} = -\cos \psi_3 .$$

$$J_{62} = -\cos \rho .$$

$$J_{64} = \cos \rho \cdot \cos \delta_3 + \sin \rho \cdot \cos \psi_3 \cdot \sin \delta_3 .$$

$$J_{66} = \sin \rho \cdot \sin \psi_3 .$$

Pour la quatrième roue :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ 0 & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ 0 & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ 0 & J_{42} & 0 & J_{44} & 0 & J_{46} \\ -1 & 0 & 0 & J_{54} & 0 & J_{56} \\ 0 & J_{62} & 0 & J_{64} & 0 & J_{66} \end{bmatrix}}_{J_4} \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\psi}_4 \\ \dot{\theta}_4 + \dot{\xi}_4 \\ \dot{\zeta}_4 \\ \dot{\eta}_4 \\ \dot{\delta}_4 \end{bmatrix}$$

$$J_{12} = -0.2 \cdot \cos \rho .$$

$$J_{13} = 0.09 \cdot \cos \rho \cdot \cos \psi_4 \cdot \cos \delta_4 - 0.09 \cdot \sin \rho \cdot \sin \delta_4 .$$

$$J_{14} = 0.2 \cdot \cos \rho \cdot \cos \delta_4 - 0.2 \cdot \sin \rho \cdot \cos \psi_4 \cdot \sin \delta_4 + 0.3 \cdot \cos(\sigma_4 + \rho) \cdot \sin \psi_4 \cdot \sin \delta_4 .$$

$$J_{15} = -\cos \rho \cdot \sin \psi_4 .$$

$$J_{16} = -0.2 \cdot \sin \rho \cdot \sin \psi_4 - 0.3 \cdot \cos(\sigma_4 + \rho) \cdot \cos \psi_4 .$$

$$J_{22} = -0.3 \cdot \sin \sigma_4 .$$

$$J_{23} = 0.09 \cdot \sin \psi_4 \cdot \cos \delta_4 .$$

$$J_{24} = 0.3 \cdot \sin \sigma_4 \cdot \cos \delta_4 - 0.3 \cdot \cos \sigma_4 \cdot \cos \psi_4 \cdot \sin \delta_4$$

$$J_{25} = \cos \psi_4 .$$

$$J_{26} = -0.3 \cdot \cos \sigma_4 \cdot \sin \psi_4 .$$

$$J_{32} = 0.2 \cdot \sin \rho .$$

$$J_{33} = -0.09 \cdot \sin \rho \cdot \cos \psi_4 \cdot \cos \delta_4 - 0.09 \cdot \cos \rho \cdot \sin \delta_4$$

$$J_{34} = -0.2 \cdot \sin \rho \cdot \cos \delta_4 - 0.2 \cdot \cos \rho \cdot \cos \psi_4 \cdot \sin \delta_4 - 0.3 \cdot \sin(\sigma_4 + \rho) \cdot \sin \psi_4 \cdot \sin \delta_4 .$$

$$J_{35} = \sin \rho . \sin \psi_4 .$$

$$J_{36} = -0.2 . \cos \rho . \sin \psi_4 + 0.3 . \sin(\sigma_4 + \rho) . \cos \psi_4 .$$

$$J_{42} = -\sin \rho .$$

$$J_{44} = \sin \rho . \cos \delta_4 + \cos \rho . \cos \psi_4 . \sin \delta_4 .$$

$$J_{46} = \cos \rho . \sin \psi_4 .$$

$$J_{54} = \sin \psi_4 . \sin \delta_4 .$$

$$J_{56} = -\cos \psi_4 .$$

$$J_{62} = -\cos \rho .$$

$$J_{64} = \cos \rho . \cos \delta_4 - \sin \rho . \cos \psi_4 . \sin \delta_4 . \quad J_{66} = -\sin \rho . \sin \psi_4$$

### 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a développé une méthode de modélisation géométrique, du Minirover basée sur la convention de Denavit Hertenberg, et qui, par la suite, a conduit à un modèle cinématique qui peut être utilisé pour analyser la cinématique de navigation, la cinématique de glissement, et la cinématique d'actionnement, et qui ne sont pas dans notre étude.

Après l'observation des matrices Jacobiennes des quatre roues, on déduit que l'angle de suspension ne contribue que dans le mouvement en avant, le mouvement vertical et la dérivée de l'angle tangage du Minirover. Et que les éléments du vecteur de glissement n'ont aucun effet sur l'orientation du Minirover sauf l'angle de glissement de tournement suivant l'axe vertical.

# Chapitre04

SIMULATION DU MOUVEMENT DU MINIROVER

Lors de la simulation du mouvement du Minirover, on fait appel aux programmes de Spacedyn, c'est une méthode développée par les auteurs de [Spacedyn 00] dédiés aux systèmes articulés à base mobile, et exploitée puis appliquée sur notre Minirover prototype [Gén 07] qui nous a aidé, par la suite, à résoudre l'équation du mouvement de ce robot, et de générer sa trajectoire parcourue.

On va donner, d'abord, la théorie adoptée par cet outil mathématique qui a été utilisé au début dans les applications spatiales puis elle a été généralisée pour tout système polyarticulé à base mobile.

## **4.1 Algorithme de calcul [Spacedyn]**

### **4.1.1 Système de coordonnées**

On note le repère de coordonnées de référence d'inertie par  $\{\Sigma_i\}^1$ , qui est stationnaire ou linéairement mobile avec la vitesse constante dans l'espace d'inertie. Il n'est pas physiquement précis mais on considère, généralement, le repère orbital fixe comme le repère d'inertie dans le sens pratique.

On définit aussi les repères de coordonnées mobiles fixés à chaque liaison. Pour définir les coordonnées de liaison, une règle simple et flexible doit être introduite, et est donnée par :

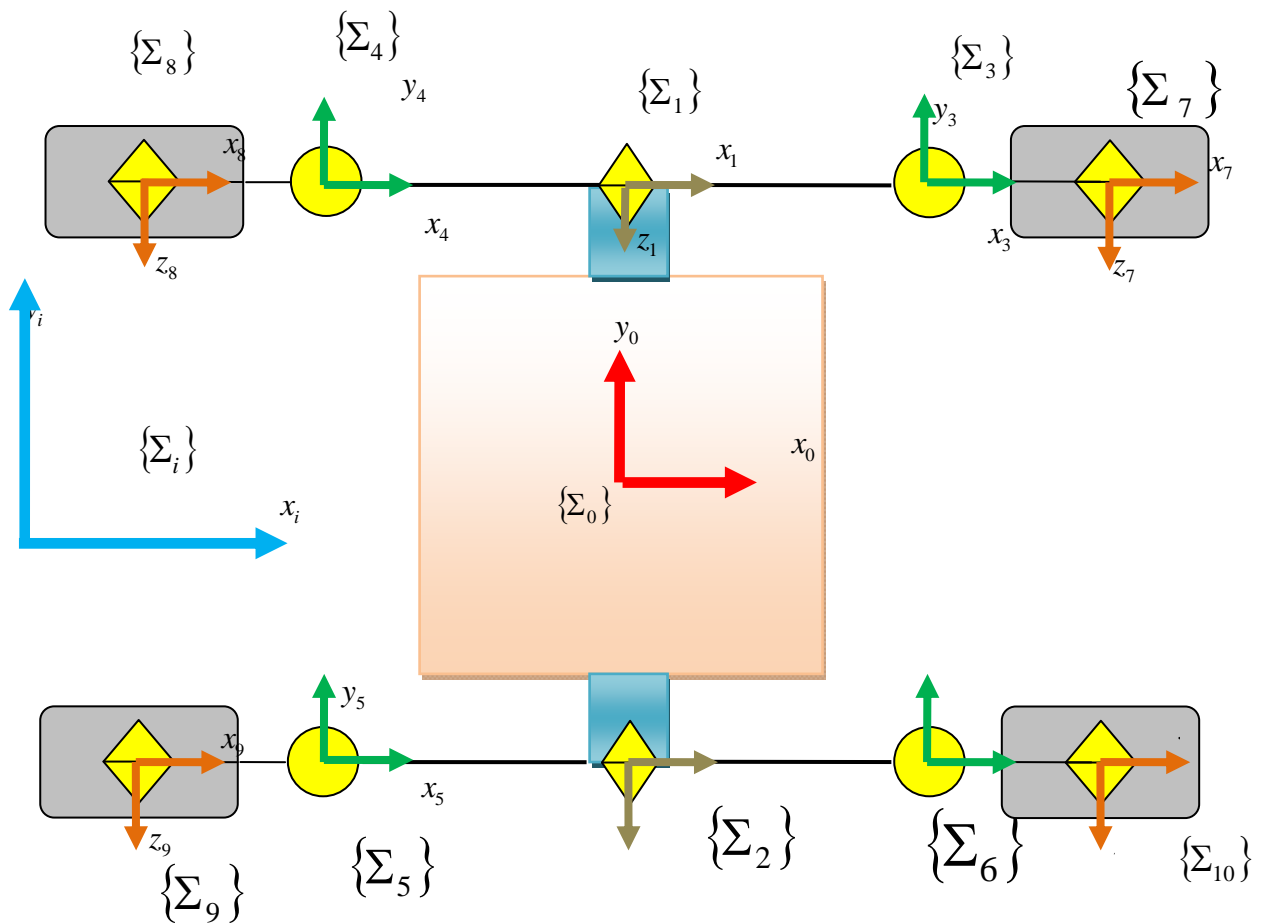
1. si l'articulation est rotoïde, alors, on fait une :
  - Localisation de l'origine du système de coordonnées  $\{\Sigma_i\}$  sur l'articulation  $i$ , et on le fixe sur la liaison  $i$ .
  - Position de son axe  $z$  tel qu'il coïncide avec l'axe de rotation de l'articulation.
  - Orientation de son axe  $x$  vers l'articulation  $i+1$  ou la direction dans laquelle le tenseur d'inertie est exprimé plus facile.
  
2. si l'articulation est prismatique, alors, on fait une :
  - Localisation de l'origine du système de coordonnées  $\{\Sigma_i\}$  sur la place lorsque l'articulation  $i$  a un déplacement nul et on le fixe sur l'articulation  $i-1$ .

- Position de son axe  $z$  tel qu'il coïncide avec l'axe du déplacement de l'articulation, avec une direction positive.
- Orientation de son axe  $x$  vers l'articulation  $i + 1$  ou la direction dans laquelle le tenseur d'inertie est exprimé plus facile.

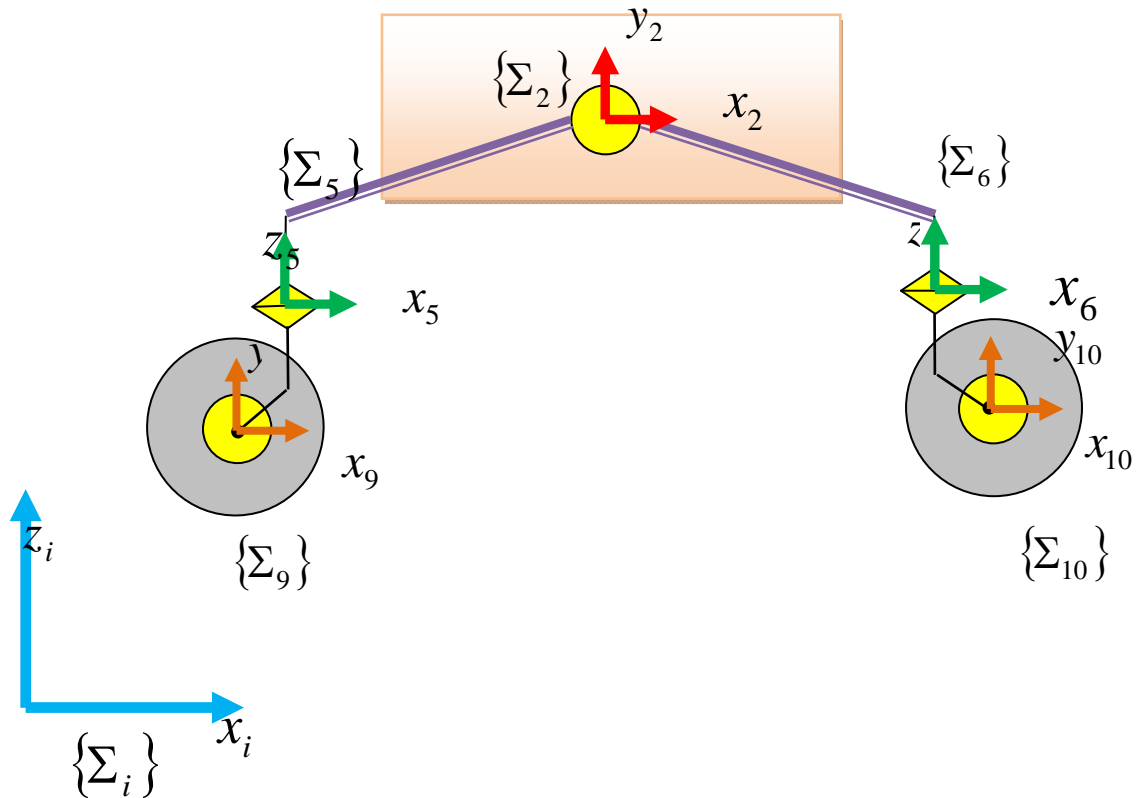
On est aussi besoin d'un système de coordonnées localisé sur le centre de gravité de la liaison.

Dans ce cas, on définit la coordonnée du C.G da la liaison  $i$  parallèlement à la coordonnée localisée sur l'articulation  $i$ .

- **Application sur le Minirover [Gén 07]**



a) Vue de dessus



**b) vue latérale (coté droit).**

**Figure 4.2** Système de coordonnées du modèle du Minirover étudié.

Dans les schémas précédents, les zones en jaune sont des articulations rotoides numérotées de 1 à 10, les repères sont construits suivant la règle du paragraphe 4.1.1.

#### 4.1.2. Matrice de transformation de coordonnées

Dans le domaine de la robotique, on note  ${}^I A_i$  les matrices de transformation de coordonnées qui sont éventuellement les mêmes que celles représentées dans le domaine de l'ingénierie de l'aérodynamique spatiale par  $C_i^T$ , alors  $C_i^T = {}^I A_i$ .

Puisque on définit le système de coordonnées de liaison comme montre la figure 4.1, on a besoin généralement de trois axes de rotations pour coïncider  $\{\Sigma_{i-1}\}$  avec  $\{\Sigma_i\}$



$C_1(\alpha_i), C_2(\beta_i), C_3(\gamma_i)$  Sont les transformations de coordonnées autour de chaque axe principal et  $C_3(q_i)$  représente la transformation de coordonnées par un angle  $q_i$  autour de l'articulation  $i$ , puis on obtient la relation suivante :

$$\begin{aligned} \{\Sigma_i\} &= {}^i C_{i-1} \{\Sigma_{i-1}\} \\ &= [C_3(q_i)C_3(\gamma_i)C_2(\beta_i)C_1(\alpha_i)]^T \{\Sigma_{i-1}\} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Où  $C_3(\gamma_i)$  et  $C_3(q_i)$  semblent doublées, mais  $\gamma_i$  correspond à un angle compensé et doit être séparé d'un angle de rotation net  $q_i$ .

On note que la représentation *RPY* de l'attitude de la liaison 0 est :

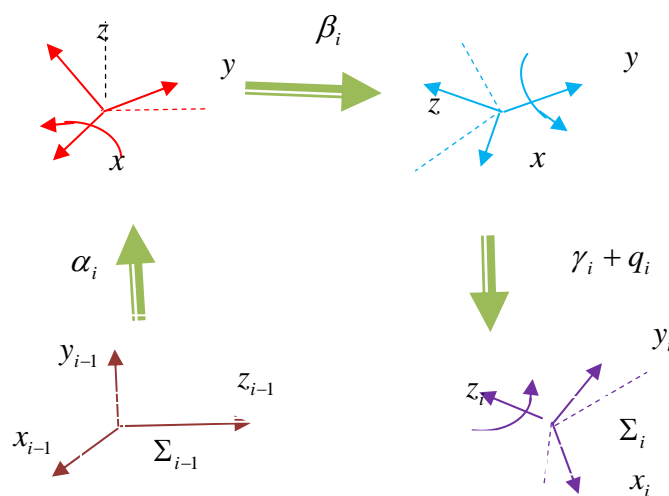
$$\begin{aligned} \{\Sigma_0\} &= C_0 \{\Sigma_I\} \\ &= {}^0 A_I \{\Sigma_I\} \\ &= C_3(\gamma_0)C_2(\beta_0)C_1(\alpha_0) \{\Sigma_I\} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Où  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  sont les angles Lacet, Tangage et Roulis

On peut aussi exprimer l'attitude et la vitesse angulaire dans une équation de la forme :

$$\dot{C}_0 = -\tilde{\omega}_0 C_0 \quad (4.3)$$

Où  $\dot{C}_0$  est la dérivée par rapport au temps de  $C_0$  et  $\tilde{\omega}_0$  est la forme antisymétrique de la vitesse angulaire  $\omega_0$ . Cette relation est utilisée pour l'intégration systématique de la vitesse angulaire à l'attitude.



**Figure 4.1.** Transformation de coordonnées.

### 4.1.3 Vecteurs de liaisons

Les vecteurs de liaisons, de la liaison  $i$ , sont définis comme suit:

$c_{ij}$  : Vecteur liant le centre de gravité de la liaison  $i$  à l'articulation  $j$ .

$l_{ij}$  : Vecteur entre l'articulation  $i$  à l'articulation  $j$ .

$$l_{ij} = c_{ij} - c_{ii} \quad (4.4)$$

$c_{ie}$  : Vecteur liant le centre de gravité de la liaison  $i$  au point terminal de l'articulation  $i$  si la liaison  $i$  est un point terminal.

$l_{ie}$  : Vecteur de l'articulation  $i$  au point terminal.

$$l_{ie} = c_{ie} - c_{ii} \quad (4.5)$$

### 4.1.4 Articulation rotoïde

Pour une série successive de liaisons connectée par une articulation rotoïde, vitesse linéaire  $v_i$  et une vitesse angulaire  $\omega_i$  sont calculés récursivement. Où  $v_0$  et  $\omega_0$  sont donnés comme suit :

$$\omega_i = \omega_{B_i} + A_i^i k_i \dot{\phi}_i \quad (4.6)$$

$$v_i = v_{B_i} + \omega_{B_i} \times c_{B_i} - \omega_i \times c_{ii} \quad (4.7)$$

Et les accélérations sont calculées comme suit :

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{B_i} + \omega_i \times (A_i^i k_i \dot{\phi}_i) + A_i^i k_i \ddot{\phi}_i \quad (4.8)$$

$$\dot{v}_i = \dot{v}_{B_i} + \dot{\omega}_{B_i} \times c_{B_i} + \omega_{B_i} \times (\omega_{B_i} \times c_{B_i}) - \dot{\omega}_i \times c_{ii} - \omega_i \times (\omega_i \times c_{ii}) \quad (4.9)$$

### 4.1.5 Articulation prismatique

Si l'articulation est prismatique, la relation cinématique devient, pour les vitesses :

$$\omega_i = \omega_{B_i} \quad (4.10)$$

$$v_i = v_{B_i} + \omega_{B_i} \times c_{B_i} - \omega_i \times c_{ii} + \omega_i \times (A_i^i k_i \dot{\phi}_i) + A_i^i k_i \dot{\phi}_i \quad (4.11)$$

Et pour les accélérations:

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{B_i} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_i = & \dot{v}_{B_i} + \dot{\omega}_{B_i} \times c_{B_i} + \omega_{B_i} \times (\omega_{B_i} \times c_{B_i}) \\ & - \dot{\omega}_i \times c_{ii} - \omega_i \times (\omega_i \times c_{ii}) + \dot{\omega}_i \times (A_i^i k_i \phi_i) \\ & + \omega_i \times (\omega_i \times (A_i^i k_i \phi_i)) + 2^l \omega_i \times (A_i^i k_i \phi_i) \\ & + A_i^i k_i \ddot{\phi}_i \end{aligned} \quad (4.13)$$

#### 4.1.6 Cinématiques du point terminal

La relation cinématique au tour du point terminal est exprimée comme suit :

$$\dot{x}_h = J_m \dot{\phi} + J_b \dot{x}_b \quad (4.14)$$

$$\ddot{x}_h = J_m \ddot{\phi} + \dot{J}_m \dot{\phi} + J_b \ddot{x}_b + \dot{J}_b \dot{x}_b \quad (4.15)$$

$x_b \in \mathbb{R}^6$  : Position / orientation de la base.

$x_h \in \mathbb{R}^6$  : Position / orientation du point terminal.

$\phi \in \mathbb{R}^n$  : Variables des articulations.

$J_b \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  : matrice Jacobienne des variables de base.

$J_m \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  : matrice Jacobienne des variables des articulations.

#### 4.2 Equation du mouvement d'un système articulé à base mobile

L'équation du mouvement du système est exprimée en la forme suivante [spacedyn 00] :

$$\begin{bmatrix} H_b & H_{bm} \\ H_{bm}^T & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_b \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_b^T \\ J_m^T \end{bmatrix} f_h \quad (4.16)$$

Où

$$H_b \in R^{6 \times 6} \equiv \begin{bmatrix} \omega E & \omega \tilde{r}_{0g}^T \\ \omega \tilde{r}_{0g} & H_\omega \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$H_{bm} \in R^{6 \times n} \equiv \begin{bmatrix} J_{T\omega} \\ H_{\omega\phi} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$H_\omega \in R^{3 \times 3} \equiv \sum_{i=1}^n (I_i + m_i \tilde{r}_{0i}^T \tilde{r}_{0i}) + I_0 \quad (4.19)$$

$$H_{\omega\phi} \in R^{3 \times n} \equiv \sum_{i=1}^n (I_i J_{Ri} + m_i \tilde{r}_{0i} J_{Ti}) \quad (4.20)$$

$$H_m \in R^{n \times n} \equiv \sum_{i=1}^n (J_{Ri}^T I_i J_{Ri} + m_i J_{Ti}^T J_{Ti}) \quad (4.21)$$

$$J_{T\omega} \in R^{3 \times n} \equiv \sum_{i=1}^n m_i J_{Ti} \int \omega \quad (4.22)$$

$$J_{Ti} \in R^{3 \times n} \equiv [k_1 \times (r_i - p_1), k_2 \times (r_i - p_2), \dots, k_i \times (r_i - p_i), 0, \dots, 0] \quad (4.23)$$

$$J_{Ri} \in R^{3 \times n} \equiv [k_1, k_2, \dots, k_i, 0, \dots, 0] \quad (4.24)$$

$$r_{0g} \in R^3 \equiv r_g - r_0 \quad (4.25)$$

$$r_{0i} \in R^3 \equiv r_i - r_0 \quad (4.26)$$

$m_i$  : Masse de la liaison  $i$  du bras  $k$ .

$\omega$  : Masse totale du système ( $\omega = \sum_{i=1}^n m_i$ ).

$r_i$  : Vecteur de position du centre de gravité de la liaison  $i$ .

$k_i$  : Vecteur unité indiquant la direction de l'axe d'articulation de la liaison  $i$ .

$p_i$  : Vecteur de position de l'articulation  $i$ .

$r_0$  : Vecteur de position du centre de gravité de la base du corps.

$r_g$  : Vecteur de position du centre de gravité total du système.

$c_b, c_m$  : Termes non linéaires de la vitesse.

$f_b$  : Force / couple extérieur sur la base.

$\tau$  : Couple de l'articulation du bras.

$f_h$  : Force / couple appliqués sur le C.G du point terminal.

$E : 3 \times 3$  Matrices d'identité.

Le terme  $\tilde{r}a$  indique le produit vectoriel de  $r$  et  $a$

$$\tilde{r}a = r \times a \quad (4.27).$$

Tous les vecteurs de position et de vitesses sont définis en ce qui concerne le repère de référence d'inertie.

### 4.3 Equation dynamique : procédure de simulation

La procédure de calculer les solutions de la dynamique du mouvement en avant est résumée comme suit :

- A l'instant  $t$ , on calcule les positions et les vitesses, récursivement de la liaison 0 à  $n$ .
- On calcule les matrices d'inertie en utilisant les équations (4.18) à (4.28).
- On met les accélérations  $\ddot{x}_b$  et  $\ddot{\phi}$  à zéro, et les forces extérieures  $f_b$  et  $f_h$  à zéro, puis on calcule les forces d'inertie récursivement de  $n$  à 0. Les forces résultantes sur les coordonnées  $x_b$  et  $\phi$  sont égales aux forces non linéaires  $c_b$  et  $c_m$  respectivement.
- On détermine les forces du contrôle des articulations  $\tau$  et les forces appliquées sur la base  $f_b$  de la loi de commande.
- On calcule les accélérations à partir de :

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_b & H_{bm} \\ H_{bm}^T & H_m \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} f_b \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_b^T \\ J_m^T \end{bmatrix} f_h - \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix} \right\} \quad (4.28)$$

- On intègre les accélérations précédentes pour trouver les vitesses et les positions à l'instant  $t + \Delta t$ .
- Aller à 1. et continuer.

### 4.4 Dynamique inverse

Le calcul de la dynamique inverse est utile pour une commande du couple, et aussi pour le calcul des forces et du couple appliqué sur la base, ou pour le calcul des termes non linéaires de la vitesse  $C_b, C_m$ , qui seront décrits prochainement.

On utilise l'approche récursive de Newton- Euler, d'ordre  $n$ , pour le calcul de la dynamique inverse.

Les équations d'Euler Newton pour une liaison  $i$  sont exprimées comme suit :

$$F_i = m_i \dot{v}_i \quad (4.29)$$

$$N_i = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i) \quad (4.30)$$

Où  $F_i, N_i$  sont la force et le moment d'inertie exercés sur la liaison du centre de gravité, avec la force et le moment exercés sur l'articulation ou le point terminal tel que :

$f_i, n_i$  : Force et moment sur l'articulation  $i$ .

$f_{ei}, n_{ei}$  : Force et moment sur le point terminal (si la liaison  $i$  est une liaison terminale).

L'équilibre de la dynamique est exprimé sous la forme suivante :

Pour une articulation rotoïde :

$$f_i = F_i + \sum_{j=i-1}^n S_{ij} f_j + S_{ei} f_{ei} \quad (4.31)$$

$$n_i = N_i + \sum_{j=i-1}^n S_{ij} (l_{ij} \times f_j + n_j) + S_{ii} c_{ii} \times F_i + S_{ei} (l_{ie} \times f_{ei} + n_{ei}) \quad (4.32)$$

Et autour d'une articulation prismatique :

$$f_i = F_i + \sum_{j=i-1}^n S_{ij} f_j + S_{ei} f_{ei} \quad (4.33)$$

$$n_i = N_i + \sum_{j=i-1}^n S_{ij} (l_{ij} \times f_j + n_j) + S_{ii} (c_{ii} - \phi_i) \times F_i + S_{ei} (l_{ie} \times f_{ei} + n_{ei}) \quad (4.34)$$

Après le calcul de l'ensemble de  $f_i$  et  $n_i$  pour  $i = 1 \dots n$ , on peut obtenir le couple de l'articulation comme suit :

Pour une articulation rotoïde :

$$\tau_i = n_i^{T'} k_i \quad (4.35)$$

Et pour une articulation prismatique :

$$\tau_i = f_i^{T'} k_i \quad (4.36)$$

Et la force et moment de réaction sur le centre de gravité de la base sont obtenus comme suit :

$$F_0 = \sum_{i=1}^n S_{0i} f_i \quad (4.37)$$

$$N_0 = \sum_{i=1}^n S_{0i} (c_{0i} \times f_i + n_i) \quad (4.38)$$

#### 4.5 Equation du mouvement du Minirover

D'après la procédure utilisée dans les paragraphes précédents, on peut donner l'équation du mouvement d'un Minirover articulé ; et elle est de la même forme que l'équation (3.37), comme suit :

$$H \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{\omega}_0 \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + C = \begin{bmatrix} F_0 \\ N_0 \\ \tau \end{bmatrix} + J^T \begin{bmatrix} F_e \\ N_e \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Où les symboles utilisés dans cette équation sont listés comme suit :

$H$  : Matrice d'inertie du Minirover.

$C$  : Termes non linéaires dépendant de la vitesse.

$v_0$  : Vitesse de translation de la base.

$\omega_0$  : Vitesse angulaire de la base autours de son C.G.

$q$  : Angle de chaque articulation du Minirover (ici toutes les articulations sont rotoides).

$F_0$  : Forces agissant sur le C.G de la base.

$N_0$  : Couples appliqués sur le C.G de la base.

$\tau$  : Couples agissant sur chaque articulation du Minirover.

$J$  : Matrice Jacobienne du Minirover.

$F_e = [f_{\omega 1}^T, \dots, f_{\omega m}^T]^T$  : Forces extérieures agissant sur le centre de gravité de chaque

roue.

$N_e$  : Couples extérieurs agissant sur le C.G de chaque roue.

On note que, chaque force extérieure  $f_{oi}$  ( $i = 1, \dots, m$ ), pour notre cas  $m = 4$  c'est le nombre des roues, est dérivée à partir du modèle de l'interaction roue sol décrit dans le chapitre 02.

$$\text{C'est-à-dire : } f_{oi} = [f_{xi}, f_{yi}, f_{zi}]$$

L'application de l'équation (4.39) est possible pour n'importe quel véhicule avec n'importe quelle configuration, sans prise en compte de la gravité.

La résolution successive de l'équation (4.39) nous donne ; après l'intégration (algorithme du paragraphe 4.4) ; la position, l'orientation et la vitesse du Minirover, et aussi pour les articulations du Minirover. Et par la suite, on peut générer la trajectoire, en sachant les positions suivant x et suivant y du Minirover.

#### 4.6 Simulation du mouvement du Minirover

En se basant sur l'annexe.02, on peut résoudre l'équation du mouvement (équation 4.39).

Les paramètres cinématiques du Minirover sont mentionnés sur le tableau (4.1) suivant :

Les coordonnées	Axe des x (m)	Axe des y (m)	Axe des z (m)
$\{\Sigma_0\} \rightarrow \{\Sigma_1\}$	0.0	0.172	0.032
$\{\Sigma_0\} \rightarrow \{\Sigma_2\}$	0.0	-0.172	0.032
$\{\Sigma_1\} \rightarrow \{\Sigma_3\}$	0.248	-0.064	0.0
$\{\Sigma_1\} \rightarrow \{\Sigma_4\}$	-0.248	-0.064	0.0
$\{\Sigma_2\} \rightarrow \{\Sigma_5\}$	-0.248	-0.064	0.0
$\{\Sigma_2\} \rightarrow \{\Sigma_6\}$	0.248	-0.064	0.0
$\{\Sigma_3\} \rightarrow \{\Sigma_7\}$	0.0	0.0	-0.195
$\{\Sigma_4\} \rightarrow \{\Sigma_8\}$	0.0	0.0	-0.195
$\{\Sigma_5\} \rightarrow \{\Sigma_9\}$	0.0	0.0	-0.195
$\{\Sigma_6\} \rightarrow \{\Sigma_{10}\}$	0.0	0.0	-0.195

**Tableau 4.1** Paramètres cinématiques du Minirover.



Et ses paramètres dynamiques sont mentionnés dans le tableau (4.2) suivant :

Nom de liaison	Numéro de liaison	Masse (Kg)	$I_x$	$I_y$	$I_z$
Base du Minirover	0	11.02	0.100	0.111	0.138
Bras de suspension	1,2	3.81	0.008	0.146	0.147
Bloc de direction	3,6	1.20	0.005	0.005	0.001
Roues	7,10	2.30	0.008	0.008	0.008

**Tableau 4.2** Paramètres dynamiques du Minirover.

Dans le schéma précédent, les zones en jaune sont les articulations qui sont numérotées de 1 à 10, associées par des repères construits suivant la règle de Denavit de Hertenberg. Toutes les articulations du Minirover sont rotoides.

L'algorithme de l'annexe 02 décrit la procédure de simulation du mouvement du Minirover.

Dans l'état initial, on tourne les roues avant (roue1 et roue 4) par un angle de direction  $\psi_1 = 0.26 \text{ rad}$ , et  $\psi_4 = 0.26 \text{ rad}$ , tandis que les autres roues derrières restent rectilignes ( $\psi_2 = \psi_3 = 0$ ) pour avoir une trajectoire courbée (demi cercle) qui nous permet d'étudier l'effet de la force latérale et par conséquent le glissement latéral nettement.

Les vitesses angulaires des quatre roues sont maintenues constantes, et sont égales à  $\omega = 1.26 \text{ rad/s}$ .

Le programme principal nécessite la déclaration des vecteurs et matrices suivants :

- Vecteur de l'indice de connexion  $B$  qui prend les valeurs des numéros de liaisons les plus inférieurs qui lie l'articulation en question :

$$B = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6]$$

Ex : Articulation 1  
est liée à la liaison 0  
et la liaison 3 et 4  
tant que  $0 < 3 < 4$  donc  
 $B(1) = 0$

Articulation 10 est liée  
seulement à 6  
donc  
 $B(10) = 6$

- Matrice d'incidence  $S_{ij}$  qui est utilisée pour trouver la connexion la plus supérieure de la liaison, chaque élément de cette matrice est défini comme suit :

$$S_{ij} = \begin{cases} +1 & (\text{si } i = B_j) \\ -1 & (\text{si } i = j) \\ 0 & (\text{ailleurs}) \end{cases}$$

Dans notre cas :

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

- Vecteur d'incidence de la base  $S_{oj}$ , c'est un critère de juger si la liaison  $i$  a une connexion avec la base ou non, et qui est défini par :

$$S_{oj} = \begin{cases} +1 & (\text{si } B_j = 0) \\ 0 & (\text{ailleurs}) \end{cases}$$

Et donc égale à :

$$S_{oj} = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

- Vecteur d'incidence du point terminal (roue ici)  $S_{ej}$ , c'est un critère de vérifier si la liaison  $i$  est un point terminal, et est donné par :

$$S_{ej} = \begin{cases} +1 & \text{(si la liaison } j \text{ est un point terminal)} \\ 0 & \text{(ailleurs)} \end{cases}$$

Ici :

$$S_{ej} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1].$$

- Matrice tridimensionnelle  $cc(k,i,j)$  : entre le centre de gravité de liaison  $i$  est l'articulation  $j$  sa dimension est (3,10,10).
- Matrice  $ce(k,i)$  entre le centre de gravité de la liaison  $i$  est le point terminal (centre de gravité de la roue) c'est le même point, donc :

$$ce = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

- Matrice  $c0(k,i)$  entre le centre de gravité de la base et l'articulation  $j$  :

$$c0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.172 & -0.172 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.032 & 0.032 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

- Matrice  $Qi(k,i)$  angles (roulis, tangage, lacet) pour représenter le passage de  $\{\Sigma_{B(i)}\}$  à  $\{\Sigma_i\}$  :

$$Qi = \begin{bmatrix} \pi/2 & \pi/2 & -\pi/2 & -\pi/2 & -\pi/2 & -\pi/2 & \pi/2 & \pi/2 & \pi/2 & \pi/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

- Matrice  $Qe(k,h)$  représente l'orientation des points terminaux :

$$Qe = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi/2 & \pi/2 & \pi/2 & \pi/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

On peut extraire aussi les matrices d'inertie du tableau 4.3 comme suit :

Pour la base :

$$I_0 = \begin{bmatrix} 0.100 & 0 & 0 \\ 0 & 0.111 & 0 \\ 0 & 0 & 0.138 \end{bmatrix}.$$

Pour les articulations :

$$I = \begin{bmatrix} 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 & 0.005 & \dots \\ 0 & 0.146 & 0 & 0 & 0.146 & 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0.147 & 0 & 0 & 0.147 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & \dots \\ 0.005 & 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 & 0.008 & \dots \\ 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & \dots \\ 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & 0 & 0 & 0.008 & \dots \end{bmatrix}$$

On met à zéro les vecteurs : de variables des articulations et de leurs premières et secondes dérivées, de vitesse translatrice et angulaire de la base et leurs dérivées, des vitesses translatoires et angulaires des articulations et leurs dérivées, de la position et de l'orientation de la base, et des forces et couples appliquées sur la base.

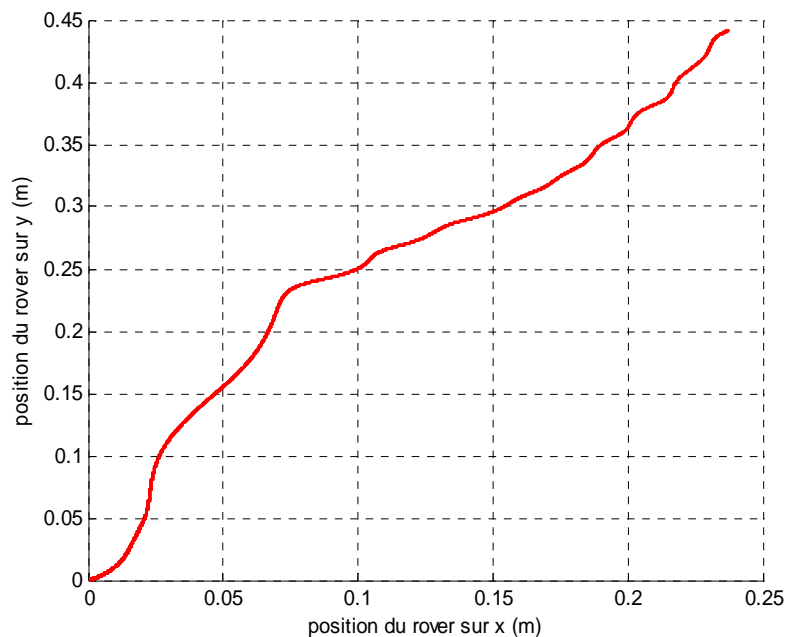
Le programme principal qui résout l'équation du mouvement et génère la trajectoire est constitué d'un sous-programme qui calcule les forces et les couples agissant sur les roues, puis l'introduction de leurs valeurs dans les sous programmes de Spacedyn.

#### 4.7 Résultats de simulation

Les couples des articulations sont commandés par un simple PID, en donnant les valeurs des variables articulaires désirées ainsi leurs dérivées (vitesses).

Premièrement, on laisse le Minirover déplacer librement sans aucune commande, seules les forces agissant sur les roues et les moments associés qui sont pris en considération.

La trajectoire parcourue dans un temps de simulation  $t = 10$  s est dans la figure 4.3 suivante :



**Figure 4.3** Trajectoire du Minirover sans commande pour  $t = 10$  s.

L'allure de trajectoire apparue dans la figure 4.3 ne reflète pas le mouvement désiré du Minirover, car la direction des roues avant du Minirover étaient d'un angle  $15^\circ$  au coté gauche, et puisque notre programme inclut les forces de contact roue sol, la force latérale

augmente énormément durant le mouvement, ce qui provoque une déviation indésirable des roues.

Un déplacement de 23 cm sur l'axe x, et de 44 cm sur l'axe y dans un temps 10 s du mouvement, nécessite une commande que soit conventionnelle telle que les PID ou moderne, pour contrôler les couples appliqués sur les différentes articulations du Minirover, notamment les couples appliqués sur les quatre articulations qui provoquent le déplacement des roues.

Maintenant, on applique une commande PID de la forme suivante :

$$\tau = kp(q - qd) + kd(\dot{q} - \dot{q}d) + ki * \int (q - qd) dt$$

Tel que :

$q$  : Valeurs réelles des angles des articulations.

$qd$  : Valeurs désirées des angles des articulations.

$\dot{q}$  : Valeurs réelles des vitesses angulaires des articulations.

$\dot{q}d$  : Valeurs désirées des vitesses angulaires des articulations.

$kp$  : Constante de proportionnalité.

$kd$  : Constante de dérivation.

$ki$  : Constante d'intégration.

On met:

$$qd = [\rho_l \quad \rho_r \quad \psi_1 \quad \psi_2 \quad \psi_3 \quad \psi_4 \quad \omega * t \quad \omega * t \quad \omega * t \quad \omega * t]^t$$

$$\dot{q}d = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \omega \quad \omega \quad \omega \quad \omega]^t$$

Les valeurs initiales des variables des articulations sont données par :

$$q = [0 \quad 0 \quad \psi_1 \quad \psi_2 \quad \psi_3 \quad \psi_4 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^t$$

Tel que :

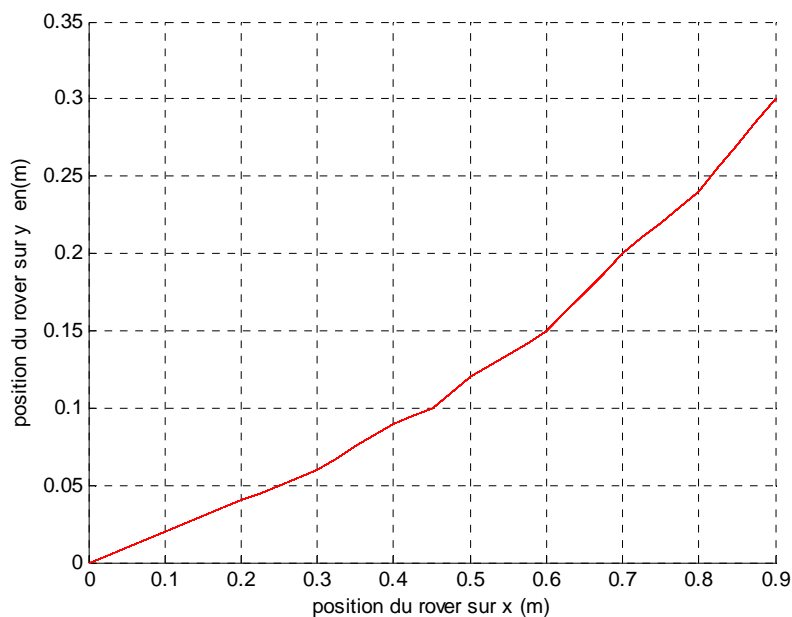
$\rho_l$  : Angle de suspension coté gauche, supposé nul durant la simulation.

$\rho_r$  : Angle de suspension coté droit, il est, aussi, supposé nul durant la simulation.

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$  : Angles de direction des quatre roues du Minirover respectivement.

$\omega$  : Vitesse de rotation des roues du Minirover ; elle est constante est égale à 1.25 rad/s.

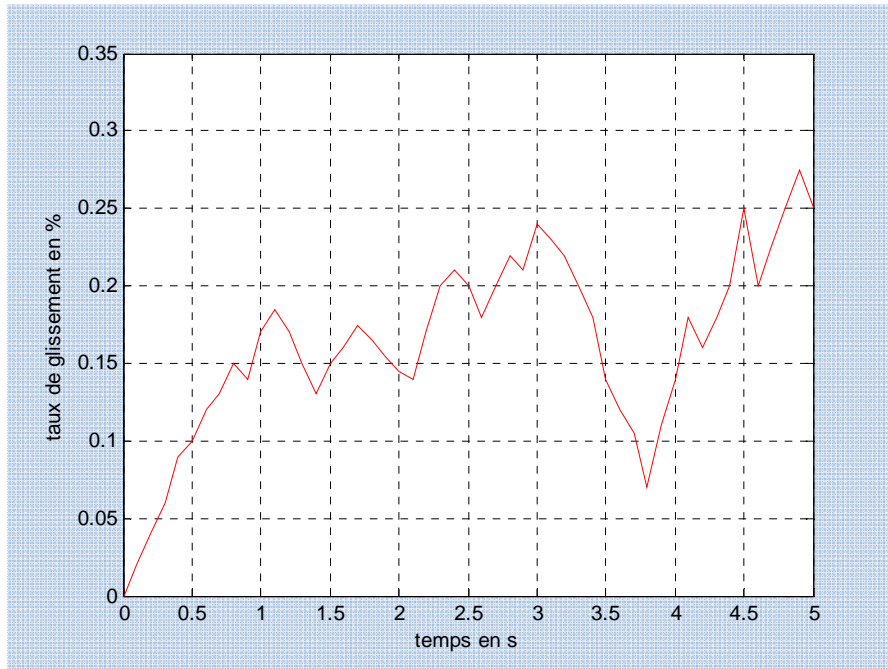
La figure 4.4 représente l'allure de la trajectoire formée par le CG de la base du Minirover, et pour les mêmes conditions de simulations (même terrain, et même temps de simulation) :



**Figure 4.4** Trajectoire du Minirover avec une commande PID pour  $t = 5$  s.

Sable très fin.

Cette fois-ci, l'allure de la trajectoire devient sensiblement concrète, le mini Minirover traverse une distance de 90 cm sur l'axe x, et 30 cm sur l'axe y, c'est à cause de la commande PID des couples appliqués sur les articulations y inclut les couples des quatre roues, ils sont asservis aux valeurs désirées.



**Figure 4.5** Allure du taux de glissement avec une commande PID pour  $t = 5$  s. Sable très fin.

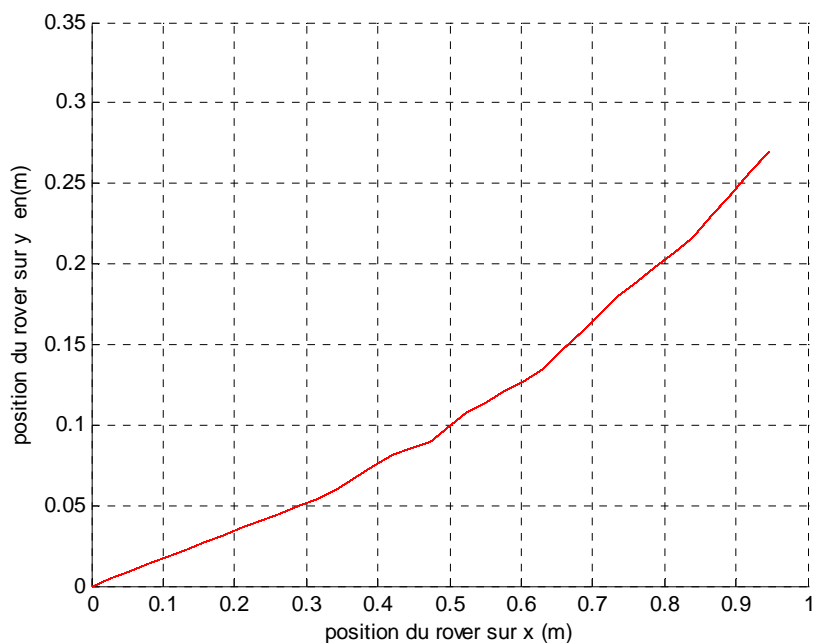
Le taux de glissement varie entre 0 et 0.3, Figure 4.5, et d'une valeur moyenne de 0.15, cette variation est due aux caractéristiques du terrain franchi, ce qui implique apparemment le contrôle du taux de glissement autour d'une valeur prédéfinie. Cet intervalle du taux de glissement est considéré acceptable dans le domaine de la robotique mobile.

Maintenant, on garde les mêmes constantes du régulateur des couples, et on fait changer le terrain, c'est un sable sec, qui est caractérisé par sa cohésion  $c$ , et son angle de frottement  $\phi$ , ainsi les modules de pression – enfoncement  $k_c$ , et  $k_\phi$ . Tel que :

$$c = 10^3 \text{ Kpa}, \phi = 30^\circ, k_c = 0.9 \frac{\text{Kpa}}{\text{m}^{n-1}}, k_\phi = 1523.4 \frac{\text{Kpa}}{\text{m}^{n-2}}.$$

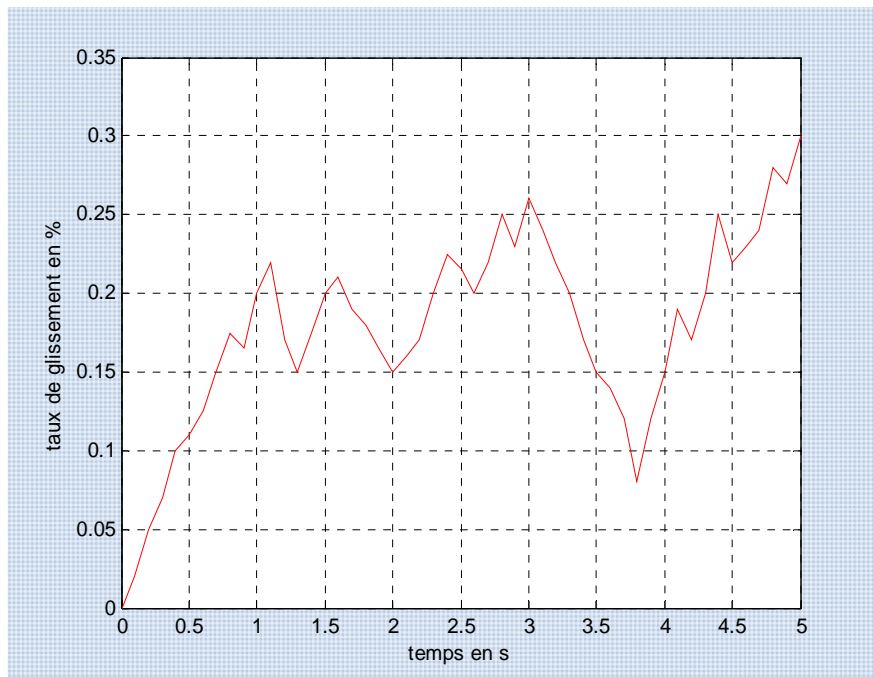
L'allure de la trajectoire du Minirover sous les conditions précédentes est montrée sur la figure 4.5 suivante :





**Figure 4.6** Trajectoire du Minirover avec une commande PID pour  $t = 5$  s.  
Sable sec.

Il n'y a pratiquement pas de différence entre la première et la deuxième courbe des trajectoires, sauf que le deuxième sol est apparu plus cohésif et qu'il a une traction plus élevée que le premier sol (sable fin), ce qui provoque une diminution de l'angle de glissement latérale, et donc la diminution de la force latérale agissant sur le mini Minirover, ce qui en résulte une diminution de la coordonnée du mini Minirover sur l'axe Y (ici 27 cm). Et puisque les couples appliqués restent constants, la force latérale augmente, ce qui provoque l'augmentation de la coordonnée du mini Minirover sur l'axe X.



**Figure 4.7** Allure du taux de glissement pour une commande PID pour  $t = 5$  s.

Les valeurs du taux de glissement sont sensiblement plus grandes que celles du premier terrain (a une valeur moyenne de 0.18), car le Minirover perd facilement sa traction, donc, ses roues glissent considérablement durant le mouvement, mais les valeurs du glissement restent toujours dans la plage de variation acceptable (0-0.3)

L'obtention d'une trajectoire similaire que la première nécessite un ajustement des constantes du régulateur afin de contrôler les couples des articulations, et donc, contrôler la position et l'orientation du Minirover.

#### 4.8 Conclusion

La méthode de [spacedyn 00] a été exploitée en succès dans l'étude du comportement dynamique et cinématique du Minirover, et par la suite, dans la résolution de l'équation du mouvement et de la génération de trajectoire.

D'autre part, l'utilisation d'une commande classique PID pour contrôler les couples des différentes articulations qui constituent le mini Minirover, en associant les valeurs désirées

des coordonnées généralisées et de leurs dérivées, nous a amené à une meilleure configuration du Minirover, de sa position et de son orientation.

Le changement de terrain lors de déplacement du Minirover nécessite une actualisation des constantes du contrôleur pour avoir une trajectoire homogène, pour cela la mise à jour des paramètres de terrain est un outil important dans la simulation du mouvement des Minirovers.

# Conclusion Générale



## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les modèles d'interaction roue sol sont nombreux. Il y a les modèles analytiques dont la plupart découlent de la relation pression enfoncement de Bekker, mais qui nécessite des caractérisations expérimentales pour pouvoir être utiles à l'évaluation des performances d'un véhicule tout-terrain. Les méthodes empiriques sont, elles, surtout utilisées pour déterminer les conditions de praticabilité bien que certains modèles les utilisent à des fins prédictives. Ce sont principalement ces deux types de méthodes qui devraient être utilisés pour caractériser les performances réelles du Minirover. La MEF reste cantonnée au domaine de la simulation, mais actuellement beaucoup<sup>P</sup> de recherches sont faites pour la rapprocher le plus possible des conditions réelles. Cependant, une réserve doit être émise car il est difficile dans un domaine tel que l'interaction roue sol d'extrapoler des résultats provenant de recherches ayant eu lieu sur des machines structurellement assez éloignées des caractéristiques du Minirover. Reste à savoir si une branche de la terra mécanique va se former autour de l'étude des performances des robots d'exploration planétaire.

L'étude de cas qui a été menée dans le cadre de ce sujet permet de se rendre compte de l'intérêt réel que peut représenter l'utilisation de telles modélisations, au moins d'un point de vue qualitatif. Il demeure évident que pour obtenir des prédictions quantitatives valables et exploitables, il est indispensable de mener des campagnes d'expérimentations et de fournir des données plus précises quant au véhicule (en particulier sa roue) et l'environnement dans lequel des dérouleront les éventuelles missions.

Dans ce travail, les modèles analytiques issus de l'étude de l'interaction roue sol sont étudiés pour enquêter les manœuvres de direction des roues qui, sont considérées rigides, des rovers d'exploration planétaires sur des sols meubles. Sur ce dernier type de sol, les roues du rover glissent facilement et perdent leurs tractions. Par conséquent, l'étude de la mécanique de contact et de traction entre la roue et le sol est nécessaire pour mieux comprendre le comportement du mouvement du rover sur un sol déformable.

Or, ces modèles analytiques sont basés sur les approches de la terramécanique, où les forces de traction et la résistance au mouvement sont évaluées

pour des différentes conditions de glissement. Ces forces de traction sont décomposées en : force longitudinale dans la direction longitudinale de la roue et force latérale dans sa direction latérale. La dernière composante a une influence majeure sur la caractérisation des manœuvres de direction des roues du rover, et elle lui-même, décomposée en deux forces : l'une est la force de cisaillement sous la roue, et l'autre est la force de résistance au bulldozing localisée sur la face latérale de la roue

D'autre part, la modélisation géométrique du rover par la méthode de Denavit Hertenberg et sa dérivée qui donne le modèle cinématique est faite pour savoir la contribution des différentes articulations de ce rover sur sa position, son orientation dans l'espace opérationnel, et par la suite l'étude différentes cinématiques du rover telle que: la cinématique de glissement... et cette étude n'a pas lieu dans ce travail.

L'objectif principal de ce mémoire est d'introduire le modèle de l'interaction roue sol dans le modèle entier du rover (toutes les roues), et d'étudier l'effet des forces d'interaction résultantes sur le modèle dynamique du rover décrit par son équation du mouvement. Cela est fait par une simulation du mouvement du rover sur un espace opérationnel virtuel. La résolution de l'équation du mouvement en utilisant les programmes de Spacedyn en Matlab nous a donné les coordonnées du rover à chaque instant, et sa vitesse et son accélération, dans ces conditions, la trajectoire parcourue par le rover peut être dérivée. Autre simulation du même Minirover sur un autre terrain identifié par les paramètres de cohésion et de frottement est faite, pour comparer les deux trajectoires parcourues. Les allures des trajectoires montrent que le type de terrain caractérisé par sa cohésion et son frottement influe directement sur le parcours du rover, cela est du essentiellement à l'augmentation ou la diminution de l'angle de glissement, et partiellement à la variation du taux de glissement.

L'introduction d'une commande telle que la commande PID pour le contrôle des couples appliqués aux articulations est nécessaire pour aboutir à une trajectoire voulue, en donnant les valeurs désirées des positions et des vitesses des différentes articulations du rover en question.

Dans les travaux ultérieurs, on essaie d'améliorer davantage notre commande pour contrôler simultanément le glissement latéral et le glissement longitudinal, en faisant varier la vitesse de rotation des roues qui est considérée

constante dans ce travail et autres changements susceptibles, ainsi on devra penser à l'utilisation des techniques d'apprentissage pour l'adaptation des paramètres de locomotion en fonction des conditions locales du terrain, car la mécanique du sol varie d'un lieu à l'autre, il est nécessaire de mettre à jour les paramètres du sol et de traction en fonction des variations des paramètres du terrain. Donc, la détermination en ligne des paramètres du terrain sera une future direction de recherche.

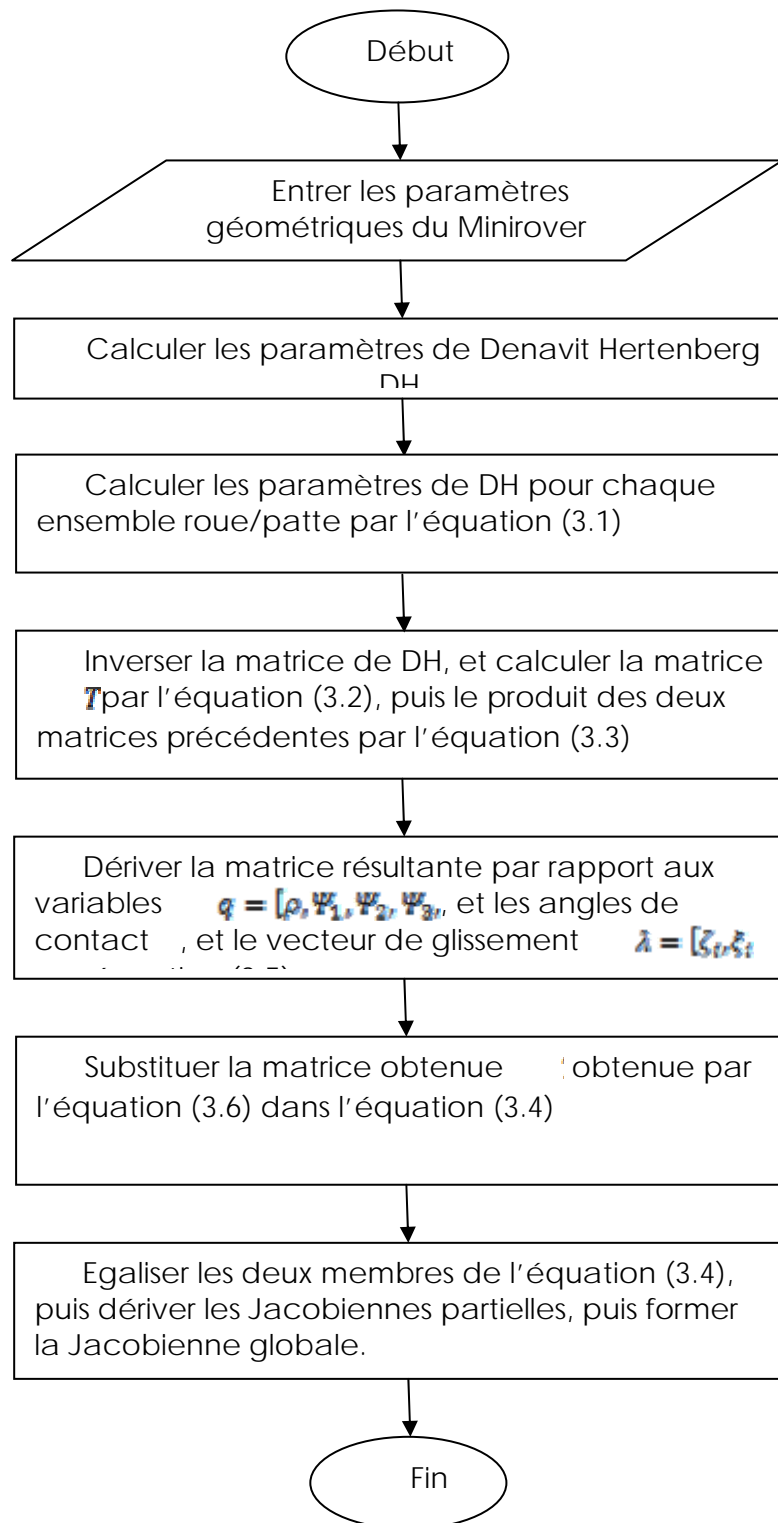
## ANNEXE 01

TYPE	MINIROVER D'EXPLORATION PLANETAIRE
Dimensions	0.68m (longueur) ×0.44m (largeur) ×0.32m (hauteur)
Poids	35Kgs au total
Nombre et type de roues	04 roues rigides fabriquées en Aluminium
Rayon de la roue	0.09m
Largeur de la roue	0.11m
Nombre d'articulations	10
Type des articulations	Toutes les articulations sont rotoïdes



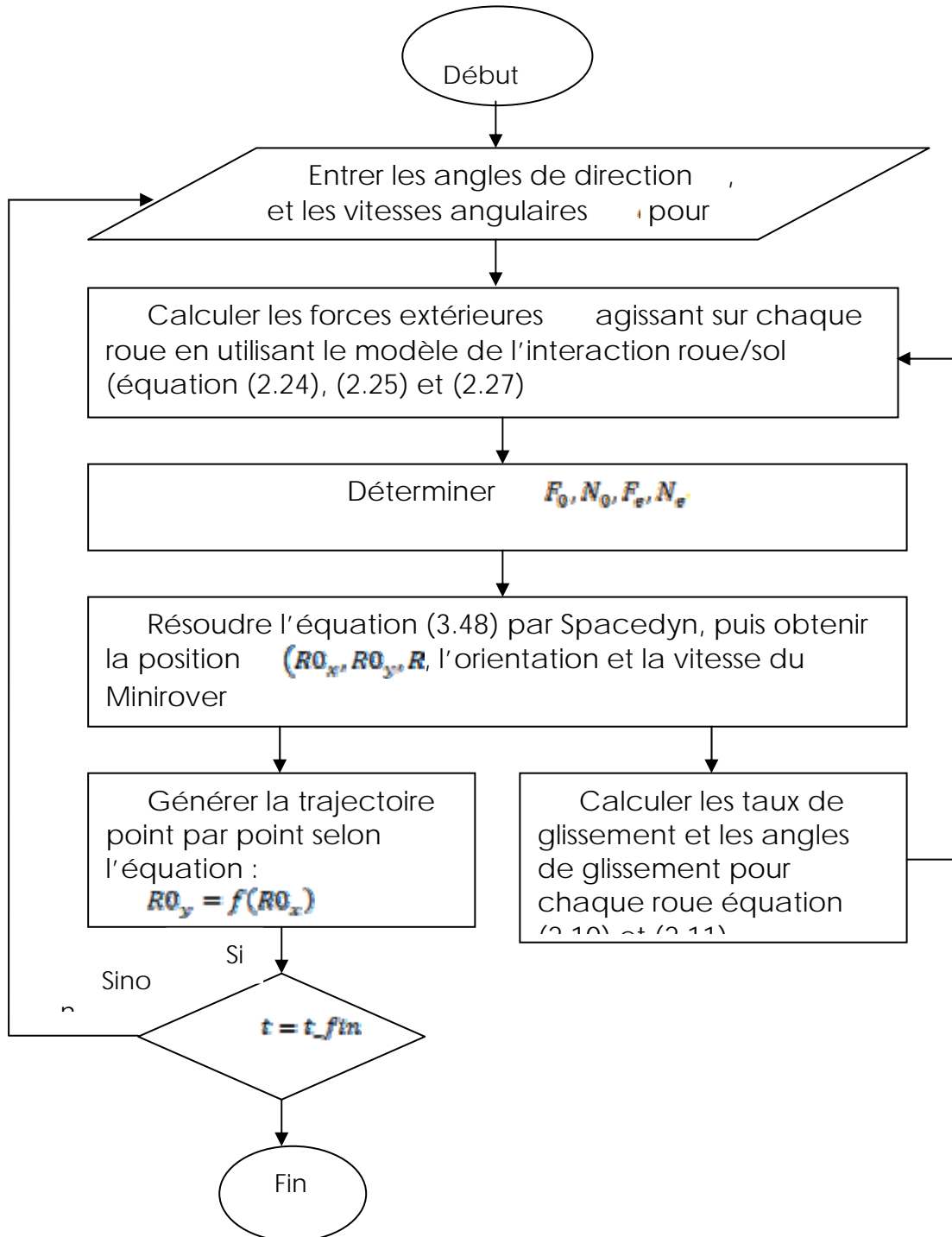
## ANNEXE 02

### Algorithme donnant le modèle cinématique du robot articulé



### ANNEXE 03

Algorithme qui permet de résoudre l'équation du mouvement du Minirover, et de générer la trajectoire parcourue.





# BIBLIOGRAPHIE



# BIBLIOGRAPHIE

[Bekker 69] M.G. Bekker. Introduction to terrain-vehicle systems. The university of Michigan Press, 1969.

[Dimi 01] Dimitrios S. Apostolopoulos. Analytical configuration of wheeled robotic locomotion. Phd thesis, the robotics institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 15213, April 2001.

[Gén 05] Genya Ishigami, Kazuya Yoshida, Steering Characteristics of a Rigid Wheel for Exploration on Loose Soil, Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, September 28 - October 2, 2004.

[Gén 07] Genya Ishigami, Akiko Miwa, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Terramechanics-Based Model for Steering Maneuver of Planetary Exploration Rovers on Loose Soil, Department of Aerospace Engineering Tohoku University Aoba 6-6-01, Sendai, 980-8579, Japan, 2007.

[Grand 04] Ch. Grand. Optimisation et commande des modes de déplacement des systèmes locomoteurs hybrides roues/pattes. Application au robot Hylos. Thèse de doctorat, Université de Paris6, Paris, 2004.

[Kara 78] L.L Karafiath et E.A. Nowatzki. Soil mechanics for off-road vehicle engineering. Trans tech publications, 1978.

[Lau 03] M.Lauria. Nouveaux concepts de locomotion pour véhicules tout terrain robotisés. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL, 2003.

[Le 99] A.T.Le. Modeling and control of tracked vehicles. Thèse de doctorat (phd), Université de Sydney, 1999.

[Mahm 04] Mahmoud Tarokh and Gregory McDermott. Kinematics modeling and analysis of articulated rovers, Departement of computer science, San Diego state University, San Diego, CA92182-7720, 2004.

[Mahm 05] Mahmoud Tarokh, Laurena Mireles and Gregory McDermott. Two approaches to kinematics modeling of articulated rovers, research report N° CSRR-02-October 2005, Departement of computer science, San Diego state University, San Diego, 2005.

[Ojeda 05] L. Ojeda, J. Borenstein, G. Witus. Terrain trafficability characterization with a mobile robot. In proc of the SPIE defense and security conference. Unmanned ground vehicle technology 7, Orlando, FL, March 28 th to April 1<sup>st</sup>, 2005.

[Saar 02] M.Saarilahti. Modeling of the wheel and tyre. Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. Project deliverable D2 (Work package N°1) on soil Interction model, University of Helsinki, Departement of forest resource management, May 2002.

[Shib 04] H.Shibli, K.Iagnemma, S.Dubowsky. An aquivalent soil mechanics formulation for rigid wheel in deformable terrain, with application to planetary exploration rovers, Journal of terramechanics 42 1-3, 2005.

[Spacedyn 00] K.Yoshida “ The Spacedyn: A Matlab toolbox for space and mobile robots”, Journal of robotics and mecatronics, Vol.12.N°4, pp. 411-416, 2000.

<http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/spacedyn>

[steph 01] J. Stephan, A.Charara et D. Meizel. Contact roue/sol: comparaison de modèles d’efforts. Journées « Automatiques et automobile », 2001.

[Terz 43] K.Terzaghi. Theoretical soil mechanics. Chapman and Hall. 1943.

[Wong 89] J.Y.Wong. Terramechanics and off-road vehicles. Elsevier. 1989.