



HAL
open science

Modèles physiques de sols meubles et d'interactions avec un mobile. Simulation des empreintes laissées par un véhicule se déplaçant sur des terrains déformables sablonneux

Annie Luciani, Benoît Chanclou

► To cite this version:

Annie Luciani, Benoît Chanclou. Modèles physiques de sols meubles et d'interactions avec un mobile. Simulation des empreintes laissées par un véhicule se déplaçant sur des terrains déformables sablonneux. Colloque de l'Association Française d'Informatique Graphique, 1994, Toulouse, France. pp.12. hal-00910586

HAL Id: hal-00910586

<https://hal.science/hal-00910586>

Submitted on 22 May 2014

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

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

MODELES PHYSIQUES DE SOLS MEUBLES ET D'INTERACTIONS AVEC UN MOBILE

Simulation des empreintes laissées par un véhicule se déplaçant sur des terrains déformables sablonneux

Annie LUCIANI, Benoît CHANCLOU

ACROE - LIFIA

INPG - 46, Avenue Félix Viallet

38031 GRENOBLE

FRANCE

Tél. (33) 76 57 46 69

E-mail : luciani@lifia.imag.fr

Résumé :

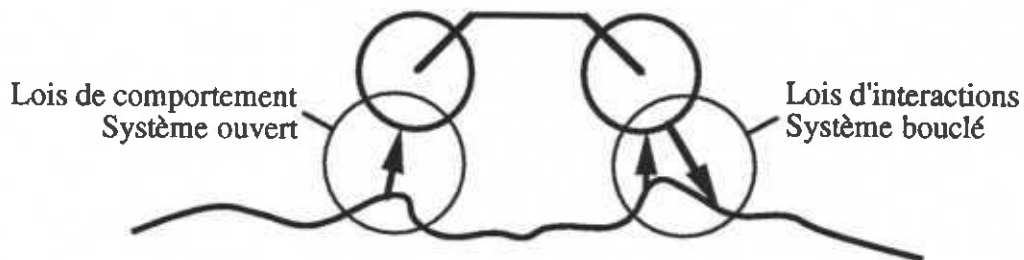
Les sols sont des objets évidemment très fréquents dans toute scène réaliste. Ils sont particulièrement importants en animation. Des objets se meuvent usuellement sur des sols. Nous avons modélisé plusieurs types de sols : sols rigides à profil naturel, sols rigides avec tapis de cailloux mobiles qui se déplacent sous l'action d'un mobile, puis enfin des sols meubles sablonneux ou vaseux, plus généralement plastiques et/ou compressibles avec cisaillement et pénétration relative. Des mobiles de différentes natures évoluant sur ces sols ont été également modélisés (véhicules à roues, à pattes, à péristaltique, à chenilles ...) On montrera des animations illustrant les effets d'empreintes, de tassements, de formation de tas qui apparaissent dans ces situations.

Mots clés : modèle et simulation physiques, sol meuble, animation.

1. Le problème

La modélisation physique des sols est de première importance tant pour la locomotion que pour les objets posés, tombant ou glissant sur le sol. Dans tous ces cas, la nature de l'interaction physique est essentielle pour le caractère du mouvement résultant : nous ne marchons pas de la même manière sur un sol de pierre ou de terre battue, les objets ne se meuvent pas de manière identique sur sol quasi-rigide ou plus ou moins plastique tels que des sables secs ou mouillés.

C'est également un excellent cas d'école pour comprendre ce que signifie "interaction physique". Dans le cas d'interaction d'un marcheur, d'un mobile ou d'un objet quelconque avec une surface plane rigide, il est possible de déterminer la force de réaction du sol sur le solide à partir de la seule détection du point d'application. Dans ce cas extrêmement simple qui est également celui usuellement traité en modèles physiques pour l'animation, on parle uniquement de la force de réaction du sol sur l'objet. Il s'agit d'un système ouvert : l'objet n'agissant pas sur le sol. Le schéma de ce système est donné à la figure 1. On appelle généralement cette approche l'approche par lois de comportements "sols" indiquant par là que connaissant le type de sols, il est possible de calculer la force exercée par celui-ci en intensité et direction sur le mobile, étant connu le point d'application de cette force.



(fig. 1) Lois de comportement et d'interactions dans un système sol-mobile

Ces méthodes ne sont plus suffisantes chaque fois que le système sol-objet, (nous dirons sol-mobile) est déformable. Ce système sol-mobile peut être déformable :

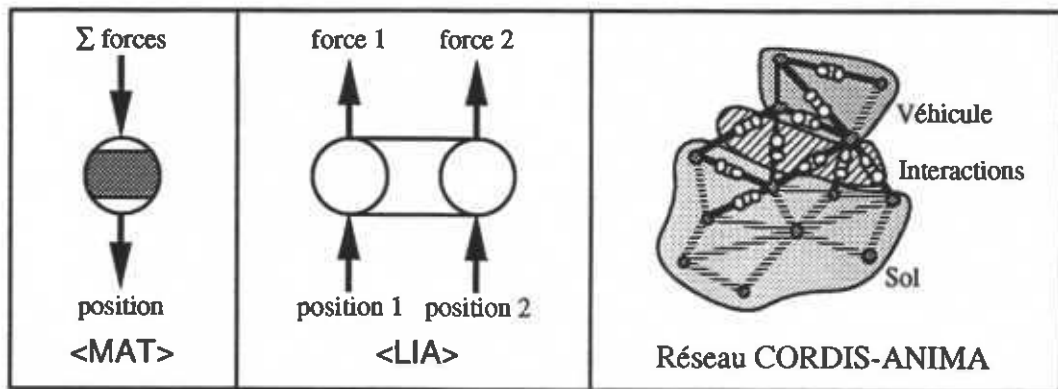
- Soit parce que la dynamique des contacts est complexe : c'est le cas lorsque le profil du sol est complexe et se rapproche d'un profil naturel d'un sol très variable et ayant des aspérités. dans ce cas, la grande variété des couples sol-mobile possible liée à la grande variété du nombre de points de contacts conduit à abandonner la physique du solide trop macroscopique pour aller vers la physique du point, mieux à même de traiter des contacts linéique, surfacique ou volumique multiponctuels à géométrie dynamique très variable; C'est le cas également lorsque le mobile est très déformable (pneu mou par exemple, ou pâte ...); C'est le cas dans le mélange des deux situations : pneu déformable sur sol à profil naturel;

- Soit parce que le sol est déformable. Dans ce cas, à chaque instant, non seulement le sol agit sur le mobile mais de plus le mobile agit et modifie l'état du sol. Il n'est alors plus du tout possible de fonctionner en boucle ouverte. Il faudrait en effet disposer d'autant de lois de comportements du sol que de formes et d'état de celui-ci. Ainsi par exemple, la butte qui se forme sur l'avant d'une roue d'un sol sablonneux modifie la résistance à l'avancement, c'est-à-dire la force appliquée à la roue, selon la forme et l'état de tassement de la butte.

Il en est en fait de même pour des déformations moins visibles telles que, par exemple, les déformations de la terre battue ou de revêtements plus ou moins élastiques qui sont modifiés par le mobile dynamiquement et qui influent donc d'une manière non prédictible sur le mouvement résultant.

Ces cas sont en fait les plus usuels : le sol agit sur le mobile mais le mobile modifie dans le même temps l'état du sol, produisant ainsi un mouvement de mobile bien différent de celui obtenu par la seule action du sol sur le mobile.

Les sols ainsi que les mobiles sont modélisés en CORDIS-ANIMA [CLF90].



(fig. 2) formalisme de CORDIS-ANIMA

Rappelons brièvement que CORDIS-ANIMA décrit tout objet en un réseau de masses ponctuelles reliées par des interactions élastiques ou visqueuses linéaires ou non, dynamiquement modifiables.

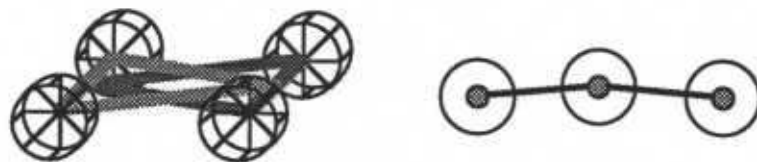
En ce qui concerne les sols, la raison essentielle de l'utilisation de la physique du point est que la complexité des profils de sols, la très grande déformabilité de ces profils ainsi que la grande variété de la dynamique des contacts sol-mobile, impose comme élément géométrique l'élément minimal qui est le point. En effet, c'est dans les cas où la géométrie devient très complexe ou très variable que le point (appelé souvent particule) est choisi comme élément de décomposition (méthodes par particules cinématiques dans Reeves par exemple pour des objets telles que des flammes ou des explosions sans géométrie simple).

2. Mobiles sur Sols Rigides

2.1. Mobiles sur Sols Rigides à profils canoniques

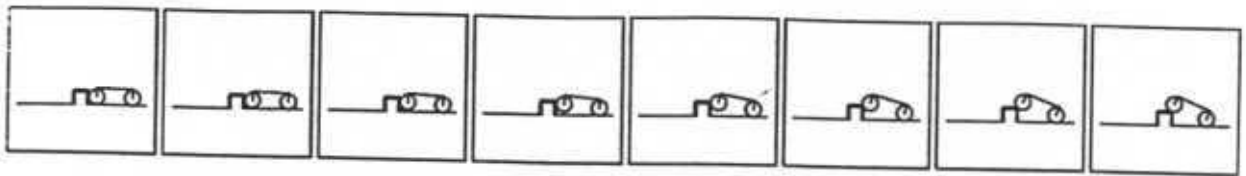
En robotique d'intervention les capacités de franchissement d'un véhicule sont primordiales. Aussi, des tests de franchissement sont effectués sur des profils canoniques de terrain : la marche et la pente.

Lors de nos premiers travaux pour la robotique [JLL91][LJL93], nous avons réalisé des simulations sur ce type de terrains. Plusieurs types de véhicules ont été modélisés, entre autres, le VAP du CNES (Véhicule Autonome Planétaire, un véhicule à quatre roues) et le Marsokhod russe (véhicule à six roues et châssis articulé).



(fig. 3) Exemples de modèles 3D du véhicule à quatre roues et 2D du Marsokhod

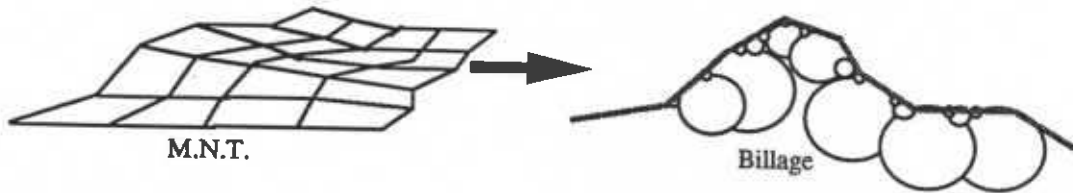
Les simulations nous ont permis d'observer les capacités de franchissement de ces véhicules face à divers obstacles canoniques.



(fig. 4) Franchissement d'un profil canonique de marche par un véhicule simulé

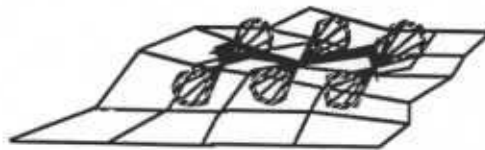
2.2. Mobiles sur sols rigides à profils naturels

L'étape de modélisation suivante a été de modéliser des sols au profil naturel afin d'étudier le comportement des véhicules lors du passage des accidents de terrains. Le sol est alors modélisé par un ensemble de masses fixes ayant chacune une sphère d'interaction avec les roues du véhicule.



(fig. 5) Modèle Numérique de Terrain et sa modélisation par des sphères

Les sphères d'interaction des masses sont moulées contre le profil naturel du terrain numérisé. Cet ensemble de sphères d'interactions juxtaposées forment alors un profil de terrain naturel exploitable pour la simulation.

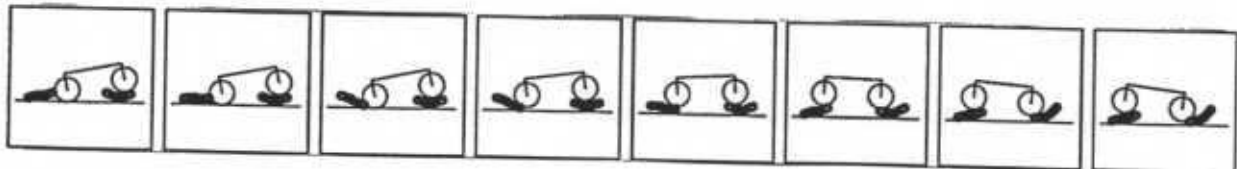


(fig. 6) Marsokhod sur terrain modélisé

2.3. Mobiles sur sols rigides déformables de type "tapis de cailloux mobiles"

Un problème difficile de franchissement pour un robot est celui des obstacles mobiles. En effet la phase de franchissement est alors totalement dynamique. Ainsi, lors d'une glissade le véhicule peut perdre ses repères et dévier de sa trajectoire initiale. Il est donc intéressant de connaître le comportement du véhicule sur de tels obstacles.

Nous avons donc modélisé des cailloux disposés sur un sol. Ils sont constitués comme le sol de sphères agglomérées. Ces cailloux étant en interaction de butée avec le sol et les roues du véhicule, ils sont mobiles et peuvent se déplacer sous l'action du véhicule.



(fig. 7) Véhicule sur sol plat avec cailloux mobiles

Les résultats intéressants que nous avons obtenus nous ont encouragé à continuer cette étude des sols. Or un type de terrain très fréquemment rencontrés sur la Lune et Mars et dans les milieux naturels en général est le terrain meuble. Aussi, la modélisation de ces terrains été l'étape suivante.

3. Mobiles sur sols déformables - la notion de couches de déformabilités

3.1. Caractéristiques physiques d'un sol meuble

Comme tout objet le sol peut être sujet à deux types de contraintes : en compression ou en cisaillement. A la compression, le sol se tasse, les interstices (emplis d'air, d'eau,... entre les particules constitutives du sol) sont réduits et les particules se déplacent. En se déplaçant les fluides ou gaz d'interstices et surtout les particules offrent une résistance. Celle-ci croît de manière exponentielle. Lorsque les particules n'ont plus la possibilité de bouger ce sont les particules elles-mêmes qui sont en compression.

En cisaillement, les plans de matières se décalent les uns par rapports aux autres. La résistance du sol à la contrainte provient du frottement et de la cohésion entre particules. La première est proportionnelle à la charge perpendiculaire au plan de cisaillement, la seconde est une constante. Sa valeur est très variable, très importante pour la glaise elle est nulle pour le sable sec.

L'équation de Mohr-Coulomb prend en compte les deux facteurs frottement et cohésion :

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

où τ est la résistance au cisaillement (kPa)

c est la cohésion (kPa)

σ est la pression normale (kPa)

ϕ est l'angle de friction interne.



(fig. 8) Contraintes de cisaillement et de compression sur une éprouvette

De plus, comme pour tout matériau, on observe trois phases dans le comportement. Tout d'abord, pour les contraintes faibles, il y a la zone élastique : une fois la contrainte supprimée le matériau retrouve son état initial. Puis, la zone plastique pour une contrainte plus élevée, là le matériau ne retrouve pas son état après la suppression de la contrainte. Enfin, il peut y avoir rupture du matériau si la contrainte atteint une certaine valeur, le matériau est alors disloqué.

Bien évidemment, c'est la zone plastique qui nous intéresse, celle où les traces des mobiles restent inscrites dans le sol.

Le sol est un matériau très complexe et ses caractéristiques dépendent de nombreux facteurs. Elles peuvent être modifiées par la teneur en humidité, la pression capillaire, les mouvements structurels, les fluctuations dans le niveau hydrostatique du sol, les mouvements d'eau souterraine, l'historique des contraintes, le temps, les actions chimiques ou les conditions environnementales [LM93].

L'un des principaux facteurs est le tassement, en effet, les forces de cohésions augmentent avec celui-ci. Pour la Lune ou Mars, cet aspect est très important car les sols y sont pulvérulents, nulle chose (pluie, piétinement,...) n'étant venue tasser les couches successives de poussières [Leo72].

3.2. L'approche par modèles de transports

Dans ce type de modèle, le sol est discrétisé en zones, celles-ci échangent de la matière en fonctions des caractéristiques physiques du sol. Ceci permet de simuler des déplacements de matière de type effondrement, et d'obtenir la formation de tas.



(fig. 9) Modèle de transport de X.Li et J.Mi.Moshell

Dans le modèle proposé par Xin Li et J.Michael Moshell [LM93], le sol est discrétisé en colonnes, chaque colonne échange avec ses voisines de la matière. La quantité de matière échangée est fonction de la hauteur y_i de la colonne et de celle de ses voisines, de l'angle ainsi créé au sommet de la colonne et des caractéristiques physiques du sol modélisé : résistance au cisaillement, frottement interne, densité, inertie,...

Parmi les avantages de ce modèle, on notera l'utilisation de caractéristiques physiques faciles à se procurer et la rapidité de la simulation (proche du temps réel : 6 à 8 images par seconde sur une Silicon Graphics quadri-processeurs).

Cependant, si ce modèle obtient de bons résultats dans le domaine de la manipulation de terrain, il ne permet pas de simuler les traces laissées par un véhicule dans le sol sous l'influence de son poids. En effet, le sol simulé n'est pas plastique et ne peut pas par conséquent "enregistrer" de traces, tout au plus le véhicule peut-il pousser de la matière devant lui. De plus, il paraît difficile de simuler des sols hétérogènes, comme un sol dans lequel se trouve des cailloux.

3.3. L'approche granulaire

Lorsque l'on parle d'approche granulaire pour du sable on pense à modéliser les grains de sable par des masses ponctuelles en interaction de butée. Ces masses forment alors un agglomérat, la plasticité du sol provient du réarrangement des grains du sol. Ceux-ci en se déplaçant changent de position d'équilibre et modifient par là-même la forme du sol.

Cette approche a été utilisée au laboratoire pour modéliser et simuler des écoulements de sable. Cela a permis d'étudier ce "quatrième" état de la matière qu'est l'état granulaire. Nous avons pu observer des tas de sable et les conditions nécessaires à leur formation [HLM94].

Cependant, pour des raisons évidentes de complexité cela n'est utilisable que pour simuler un tas de sable et non un terrain. Toutefois, cette approche est utilisable car il n'est pas nécessaire de discrétiser le sable sur lequel évolue un véhicule au niveau du grain. L'avantage de cette approche est de permettre la simulation d'enlèvement, le véhicule pouvant déplacer les masses du sol et modifier leur arrangement.



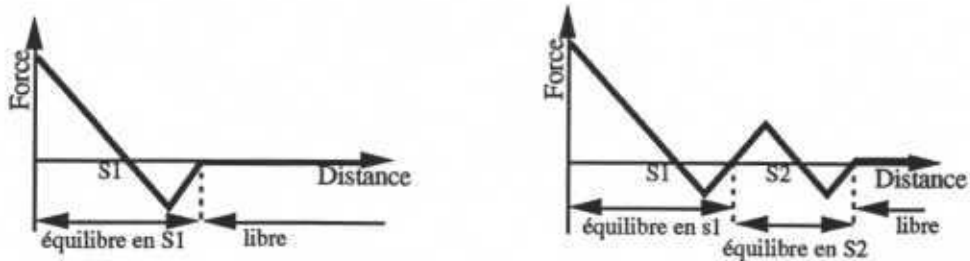
(fig. 10) Sol plastique particulaire et sol à tapis plastique

L'inconvénient de cette première approche granulaire reste un coût de calcul relativement élevé. Mais, dans le cas où le sol n'atteint pas son seuil de rupture, la réorganisation des masses du sol n'est plus

nécessaire. La plasticité du sol provient alors des éléments de liaisons entre masses voisines, les autres interactions, devenues inutiles, sont supprimées.

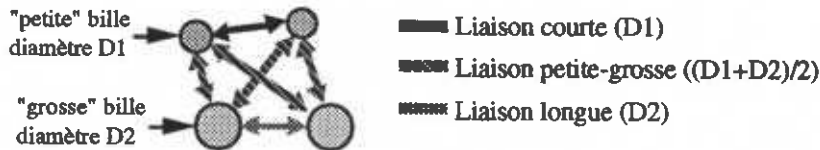
3.4. Éléments d'interactions simples

Le caractère plastique du sol modélisé ne dépend pas uniquement du nombre d'éléments, mais aussi de la fonction d'interaction utilisée entre masses. Ainsi, la cohésion du sol doit être incluse dans la liaison, le frottement provenant des chocs des butées lorsque les masses se déplacent les unes par rapports aux autres. Les différents types d'interactions utilisées sont donc basées sur une interaction de butée cohésive.



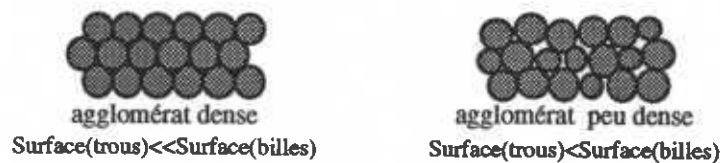
(fig. 11) Fonctions d'interaction de type butée cohésive à un ou deux états de stabilités

Plusieurs modèles ont été développés. Les deux premiers modèles réalisés sont composés pour le premier de "billes" toutes identiques (i.e. des interaction possédant le même seuil entre toutes les masses de l'agglomérat) et pour le deuxième de "billes" de deux tailles différentes (i.e. trois seuils pour les interactions : petite-petite, petite-grosse et grosse-grosse).



(fig. 12) Répartition des liaisons pour obtenir deux diamètres apparents de "billes"

La densité des agglomérat ainsi obtenus est différente. Dans le premier cas, les billes se rangent de manière très régulière comme les atomes dans un cristal. Dans le second cas, les irrégularités de diamètres créent des interstices de plus grandes dimensions qui rendent plus aisée la réorganisation des billes.



(fig. 13) Densité d'un agglomérat

Le troisième modèle est basé sur une interaction de cohésion à deux distances de stabilité (fig. 11). Ces deux stabilités permettent de créer des billes avec deux volumes apparents et une plasticité naturelle. En effet, si des masses stabilisées à grande distance subissent une contrainte les faisant se rapprocher, elles se stabilisent à petite distance, ceci les fait apparaître plus petites. Et une fois la contrainte supprimée, elles restent à cette distance offrant ainsi une plasticité. Il est possible de régler la raideur de la première stabilité pour donner un agglomérat plus ou moins fragile.

En outre, les billes une fois tassées offrent une plus grande cohésion et donc une plus grande résistance. Ce comportement est assez réaliste pour les sols pulvérulents.

Pour tester la pénétrabilité des agglomérats, nous avons posé une bille de poids variable sur les agglomérats, les différents états du sol ont été observés :

- Pour un poids faible, l'agglomérat est dans sa limite élastique. Il est juste en compression sous la bille. Si la bille est retirée l'agglomérat revient dans l'état initial ;
- Pour un poids important, la pression dépasse la limite de rupture de l'agglomérat. La bille s'enfonce complètement ;
- Entre ces deux états, la bille pénètre dans l'agglomérat sans s'y ensevelir, il s'agit de l'état plastique. Une fois, la charge supprimée l'agglomérat ne revient pas à sa position initiale.

Pour tester la plasticité, à partir de la position de stabilité de l'agglomérat lorsque la bille est de poids moyen, nous avons supprimé la bille. Ceci a permis d'observer l'évolution de l'agglomérat une fois la contrainte supprimée et de déterminer sa plasticité, i.e. sa capacité à retrouver son état initial.

Ces essais nous ont permis de classer les modèles selon le type de sol que l'on souhaite modéliser. Pour un sol pulvérulent extrêmement friable et fragile, on choisira plutôt le troisième modèle, pour un sol sablonneux le deuxième modèle.

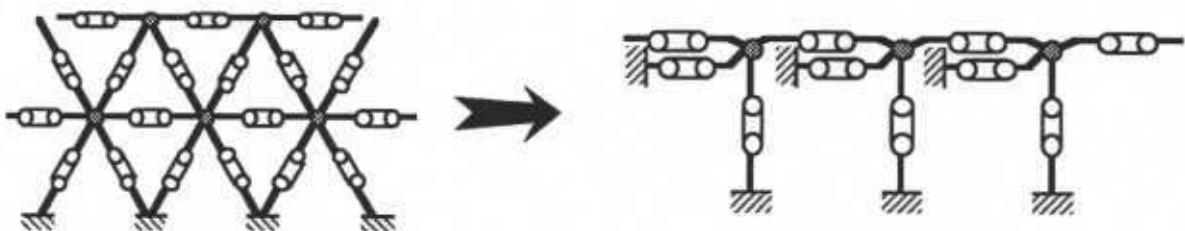
Les résultats généraux sont les suivants :

- Premier modèle : pénétrabilité faible, plasticité moyenne
- Deuxième modèle : pénétrabilité élevée, plasticité faible
- Troisième modèle : pénétrabilité moyenne, plasticité élevée

3.5. Éléments d'interactions composites

Ici, le propos est de diminuer le nombre d'interactions à calculer. Comme nous l'avons dit, si le seuil de rupture du sol n'est pas atteint, la structure du sol n'a pas besoin d'être modifiée. La plasticité du sol ne provient plus que de la composante plastique des interactions. La structure du sol s'inspire directement du premier modèle précédent, elle est triangulaire et régulière. Nous n'avons gardé que les interactions entre masses voisines, les autres, devenues inutiles, sont tout simplement éliminées.

Ce premier type de structure ne nous donnant pas satisfaction pour créer des profils naturels de terrains, nous nous sommes attachés à le simplifier et à le rendre plus facilement paramétrable. Le nouveau modèle développé ne reprend pas la structure triangulaire qui pose problème pour dissocier les efforts transversaux (cisaillement) des efforts longitudinaux (tassement). De plus, les couches inférieures du sol n'ayant plus d'utilité, nous les avons supprimées.



(fig. 14) Sol stratifié et tapis d'épingles plastiques

Chaque masse de la surface de contact est en relation avec les masses qui l'environnent. Avec les autres masses de la couche de contact il existe une résistance à la dislocation (étirement du sol), avec les couches inférieures il existe une résistance au cisaillement et au tassement.

De ces caractéristiques découlent directement les interactions nécessaires :

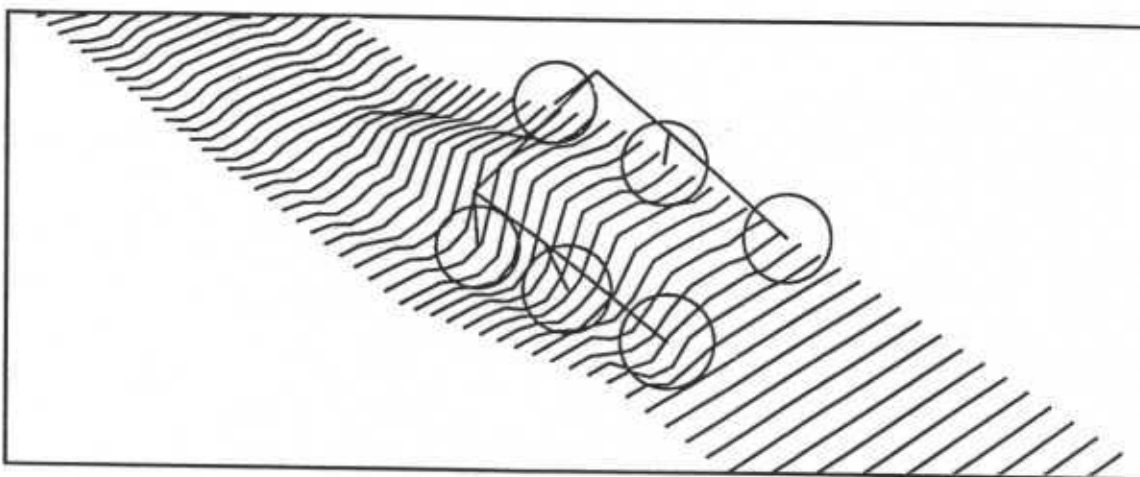
- Cohésion de la couche de surface (plasticité avec les masses voisines) ;
- Résistance au cisaillement avec le sous-sol (plasticité horizontale avec un point fixe) ;
- Résistance au tassement avec le sous-sol (plasticité verticale avec un point fixe).

Ce modèle donne de très bon résultats. Il permet de créer toute sorte de profils naturels de terrains. Il est possible de placer le sous-sol à une profondeur plus ou moins importante pour modéliser un terrain meuble sur une grande épaisseur ou au contraire un terrain où les roches affleurent. La paramétrisation en est aisée. Et, il est facile de modifier les interactions pour en améliorer les caractéristiques. Ainsi, on peut "asservir" les plasticités horizontales aux plasticités verticales pour augmenter la résistance au cisaillement en fonction du tassement.

4. Les véhicules et simulations

Un travail important de modélisation a porté sur les véhicules. Ceux-ci, tout comme les sols, ont été modélisés grâce à CORDIS-ANIMA. L'étude a plus particulièrement porté sur des véhicules à roues ou chenilles.

Les modèles utilisés sont pour la plupart bidimensionnels car notre principal sujet d'intérêt est l'étude des capacités de franchissement des véhicules. Cependant, des modèles tridimensionnels ont été réalisés pour observer le comportement en roulis et en lacet des véhicules ou leur trajectoire.



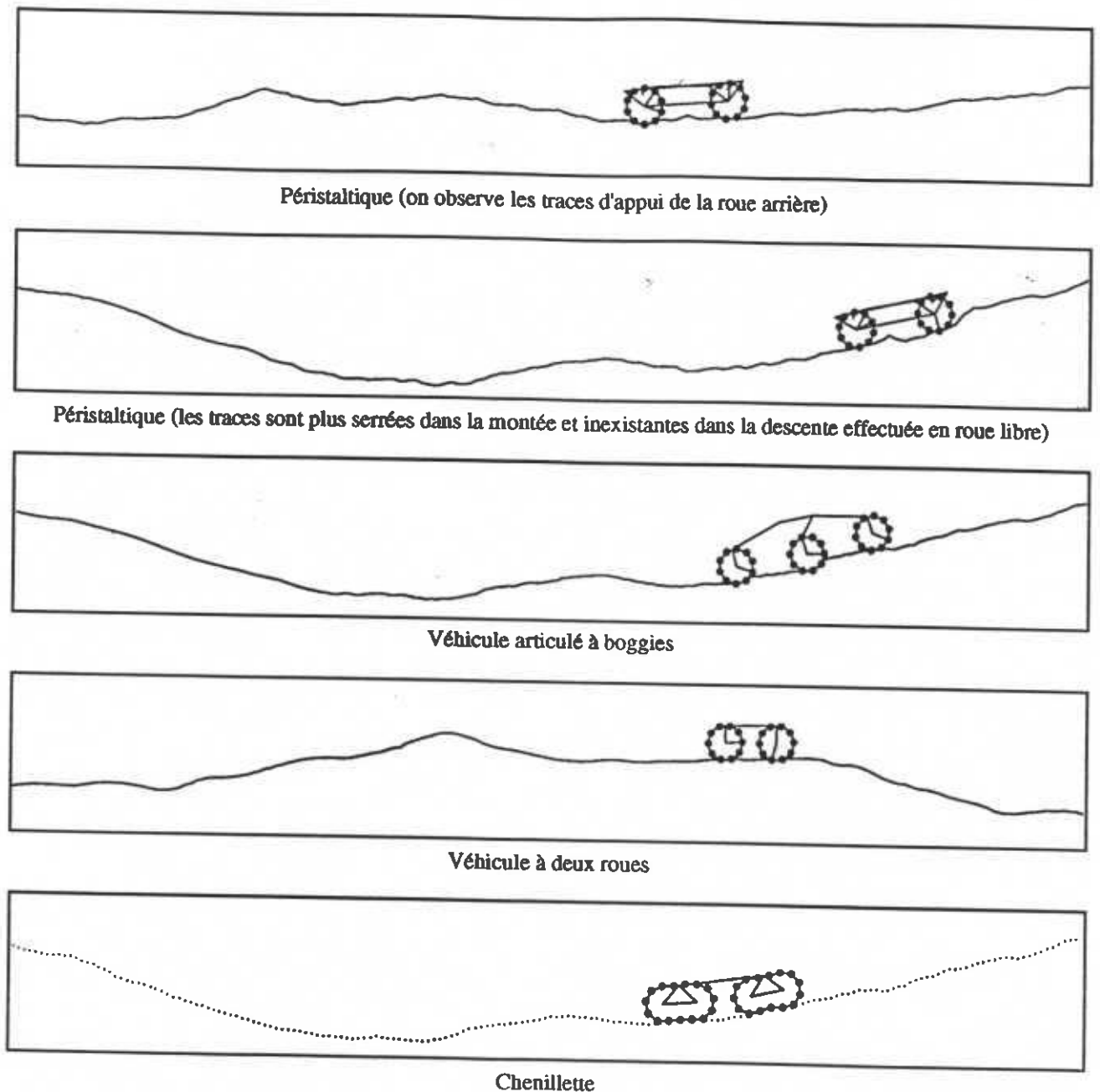
(fig. 15) Exemple de simulation d'un véhicule : Rocky IV

Le châssis des véhicules est constitué de modules de masses liés par des élasticités de grande raideur. Ce mode de construction est naturel, il est similaire à la construction d'un châssis tubulaire où les liaisons seraient les tubes et les masses seraient les soudures connectant ces tubes. Les contraintes de rigidité sont les mêmes, il faut trianguler et haubanner pour assurer la résistance. Les châssis articulés sont réalisables, en effet, tout couple de masses (une seule masse suffit en 2D) définit un axe de rotation. Ainsi sont définis les axes de roues et de bogies.



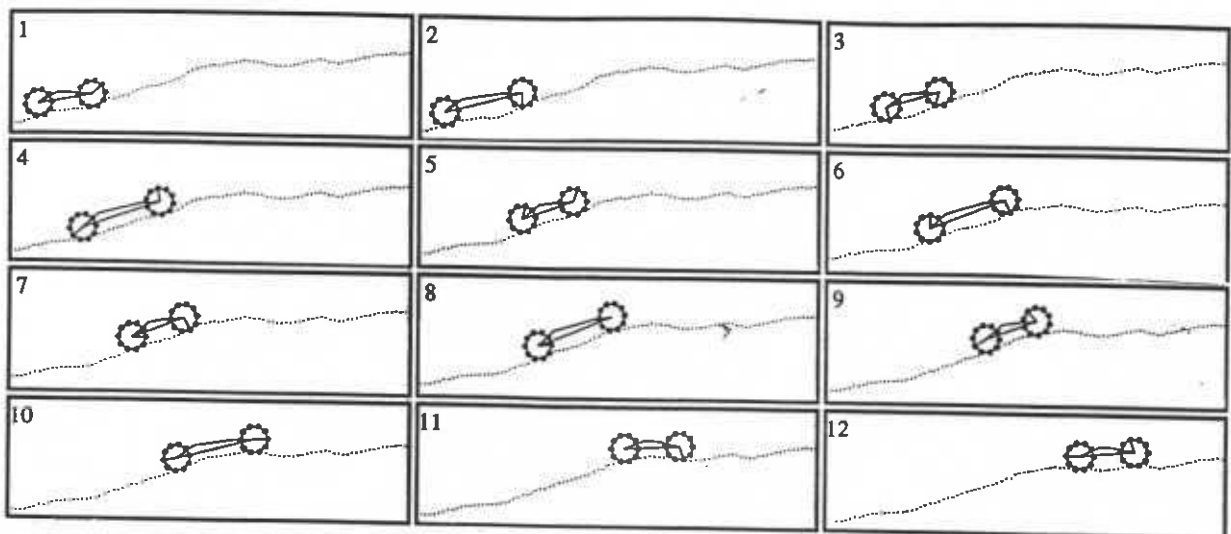
(fig. 16) Exemples de charnières en 2D et en 3D

La motorisation des véhicules est basé sur l'élément actionneur de base de CORDIS-ANIMA [DLC93] : le muscle. Il peut être utilisé directement pour motoriser les membres d'un véhicule à pattes. Il peut aussi alternativement, allonger et rétrécir un châssis, ainsi, le véhicule muni de roues libres (identiques à celle d'une bicyclette) est animé d'un mouvement péristaltique, comme une chenille arpentuse.



(fig. 17) Exemples de véhicules et de profils de terrains simulés

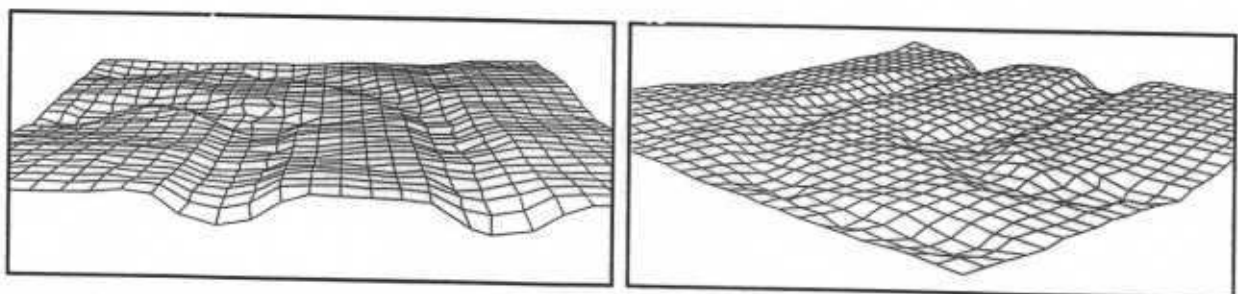
Plus classiquement, pour motoriser les roues, nous avons réalisé un moteur rotatif asservi en vitesse. Celui-ci est lui aussi constitué de muscles. Ceux-ci fonctionnent à l'instar des pistons d'un moteur en étoile des avions à hélice. Le module de commande auquel ils sont connectés contrôle la vitesse en agissant sur la force générée par les pistons.



(fig. 18) Progression d'un véhicule avec l'aide d'un mouvement péristaltique dans la montée
(l'intervalle entre chaque image est d'une seconde)

5. Conclusions

Les modèles réalisés grâce aux tapis plastiques nous ont permis de simuler de nombreux véhicules sur différents profils de terrains, dans des situations de franchissement variées. La discrétisation du sol étant assez fine (200 à 300 masses pour les sols 2D de la figure 17, environ 800 masses pour le sol 3D de la figure 19), les déformations du sols sont très réalistes. On voit bien les différentes traces laissées par les différents types de véhicules sur des profils de terrains auparavant identiques (péristaltique, véhicule articulé et chenillette de la figure 17). Ces traces sont aussi modifiées si les paramètres des moteurs sont différents, les véhicules n'ayant pas alors le même comportement.



(fig. 19) Exemple de traces laissées par un véhicule à quatre roues sur un sol 3D

Selon, le type de simulation à réaliser, on choisira une approche granulaire avec des éléments d'interaction simples ou composites, sachant que l'on peut mélanger les deux. En effet, comme ils sont basés sur les mêmes principes, la simulation de l'un ou de l'autre fait appel aux mêmes fonctions programmées en langage C.

L'une des étapes suivantes de nos travaux va consister à modéliser des terrains 3D de grande dimension, où les véhicules pourront effectuer des manoeuvres, tout en améliorant la finesse de comportement des interactions sol-mobile.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [Leo72] A.K. LEONOVICH & al, "Investigations of the Mechanical Properties of the Lunar Soil along the Path of Lunokhod 1", in *Space Research XII*, Akademie-Verlag, Berlin 1972.
- [CLF90] C. CADOZ, A. LUCIANI & J.L. FLORENS, "CORDIS-ANIMA système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et la création d'images", Colloque international sur les modèles physiques, Grenoble 90, *Edition Maison des sciences de l'homme*, Paris 1994.
- [JLL91] S.JIMENEZ, A.LUCIANI, and Ch.LAUGIER - "Simulating physical interactions between an articulated mobile vehicle and a terrain" - in *Robotics and Autonom System*, 11 , pp.97-107, (Elsevier 1993).
- [LJL93] A. LUCIANI, S. JIMENEZ, and Ch. LAUGIER - "Physical Modeling and Dynamic simulator of planet vehicles, Application to motion planning" - in *Missions, Technologies and Design of Planetary Mobile Vehicle* (CNES) - CÉPADUES-EDITIONS, janvier 93.
- [LM93] X. LI & J.M. MOSHELL, "Modelling Soil : Realtime dynamic Models for Soil Slipping and Manipulation", *COMPUTER GRAPHICS Proceeding, Siggraph 93*.
- [DLC93] Y. DELNONDEDIEU, A. LUCIANI & , "Physical Elementary Component for Modeling the Sensory-Motricity : the Primary Muscle", *4th Eurographics Animation and Simulation Workshop*, EG93.
- [HLM94] A. HABIBI, A. LUCIANI & E. MANZOTTI, "Modeling, Simulating and Visualizing Granular Material", *5th Eurographics Animation and Simulation Workshop*, EG94.