HAL
open science

Construction d'objets physiques obtenus par assemblage physique : modèles et animation

Annie Luciani, Arnaud Godard

To cite this version:

Annie Luciani, Arnaud Godard. Construction d'objets physiques obtenus par assemblage physique : modèles et animation. AFIG 97 - 5e Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique, Dec 1997, Rennes, France. (19 p.). hal-00491654

HAL Id: hal-00491654

https://hal.science/hal-00491654v1

Submitted on 8 Nov 2013

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.

Construction d'objets physiques obtenus par assemblage physique : modèles et animation

Annie Luciani - Arnaud Godard

ACROE
INPG - 46 av Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex
Tel : 04 76 57 46 48, Fax : 04 76 57 48 89
Email : {Annie.Luciani, Arnaud.Godard}@imag.fr

RÉSUMÉ. Dans ce papier, nous nous intéressons aux propriétés des assemblages et de leurs fractures. Nous présentons une méthode de construction physique, basée sur une simulation de modèles physiques ponctuels à l'aide du modeleur simulateur Cordis-Anima. Dans un premier temps, nous discutons en détail la méthode retenue et sa généralité. Ensuite nous décrivons les atomes, éléments de base de la construction, la manière de les assembler à l'aide d'un modèle de liant et les mécanismes de simulation qui amènent aux destructions et aux fractures des objets obtenus. Enfin, nous analysons la palette de comportement obtenus.

ABSTRACT. In this paper, we firstly assume that the physical properties of a physical object, specially transformations of these objects such as fractures or solidification, are the result of a initial changing of state called "the physical construction process". We secondly assume that the physical behaviour of the final object is better accounted for when the final physical structure of the object is produced by a simulation of this physical construction process, providing more realistic dynamics deformations and transformations. Then, we describe a method for physical construction, based on the simulation of physical model which represents a kind of "instantaneous cement set". We describe the physical models of the rigid or deformable blocks to be assembled. Then, we describe the matter for the assembly and the way of its state changes. Finally, we perform simulations of these objects to produce rigidity, deformations and irreversible fractures.

MOTS-CLÉS : fracture, simulation, modèles physiques, objets déformables, construction physique.

KEY WORDS : fracture, simulation, physical modelling, deformable objects, physically-based construction.

1. Introduction : la construction physique d'éléments physiques

1.1. Pourquoi?

En CAO, on modélise aujourd'hui essentiellement des objets géométriques. Dans ces

objets, la forme est un invariant et les modeleurs travaillent sur des outils de description et de manipulation de formes[RM92]. En animation et simulation, on modélise soit le comportement dynamique d'objets rigides (c'est à dire dont la forme est quasi-invariante dans le temps) [Bar89][Bar90][Bar91], soit le comportement dynamique d'objets déformables. Dans les deux cas, ces objets sont modélisés comme un tout : l'utilisateur construit l'objet ou la scène, et ensuite la machine simule son comportement dynamique par calcul des équations dynamiques du système [LM93]. Ainsi par exemple, une colonne en pierre sera modélisée en considérant la colonne dans sa totalité, en la maillant par des méthodes d'éléments finis ou des méthodes particulaires [Luc91]. Selon les paramètres physiques inertie - viscosité - élasticité, cette colonne aura tel ou tel comportement dynamique.

Mais en fait, d'une manière générale, un objet physique, même naturel, est obtenu par construction physique. Ainsi par exemple, une colonne sera un objet physique hétérogène, constituée d'éléments physiques comme des briques assemblées par un processus également physique (encliquetage par exemple dans les "lego"), ou physico-chimique (colles ou ciments). De même, un caillou peut être modélisé comme un tout, c'est à dire une forme affectée de masses, d'élasticités et de viscosités mais en fait la matière qui le constitue, par exemple le granit, est un ensemble de constituants physiques (les cristaux de quartz, les feuilles de mica et de feldspath) assemblés par un processus physico-chimique de fusion. C'est en fait un agglomérat hétérogène, un "pudding" ayant subi un changement d'état qui le rend plus ou moins cohésif .

La prise en compte de l'hétérogénéité de construction a des incidences considérables sur les comportements dynamiques d'un tel objet. D'une part, chacun des composants de la construction peut être plus ou moins rigide et plus ou moins déformable. Le comportement de l'ensemble est donc différent de celui obtenu par agencement d'objets géométriques. Les micros-déformations, même non - visibles, de ces composants ont des effets sur les déformations visibles de l'ensemble. D'autre part, comme l'assemblage est lui même physique, il peut être de nature différente de celle des constituants. Dans ce cas, le comportement dynamique de l'ensemble est différent de celui de l'objet physique qui aurait été modélisé globalement. Ainsi, la résistance de l'assemblage (de la colle, ou de l'encliquetage) peut être moindre que celle des composants. Cela conduira d'une part à des objets plus ou moins fracturables et à une dynamique spécifique de l'ensemble due à l'hétérogénéité de structure.

Par exemple, une plaque de verre soumise à des vibrations acoustiques peut voler en éclat et nombreux sont les cas de ce type. Un mur s'effondre ou se fissure sous l'effet de contraintes produisant des déformations non visibles. Un mur de pierres sèches a un comportement dynamique très différent d'un mur de pierres cimentées ou bien d'un mur en béton homogène.

1.2. Atomes et assemblages

Le raisonnement que nous venons de faire sur un objet est valable aussi pour un composant de l'objet. Un composant de l'objet peut être vu comme un système physique hétérogène obtenu par assemblage physique de composants plus petits. C'est donc un processus de construction récursif dans lequel on définit le plus bas niveau de non-hétérogénéité et d'insécabilité que l'on désire. Les composants de ce niveau pourront alors être appelées à juste titre des "atomes". Ainsi, si l'on ne s'intéresse pas

à la fracturabilité d'un cristal de quartz (de mica et de feldspath), un bloc de granit sera constitué d'atomes homogènes de quartz, de mica et de feldspath, assemblés par un composant physique (colle ou matériau précédent modifié). Mais si l'on s'intéresse également à la fracturabilité des composants alors ceux - ci seront également modélisés par des sous-composants assemblés physiquement.

Ce raisonnement est également valable pour l'objet dans sa totalité. Par exemple, une colonne prise comme un tout, est en fait, dans notre raisonnement, un atome, qui pourrait être un constituant d'une construction physique.

L'atome ou le composant élémentaire de l'assemblage physique définit donc l'échelle de travail à laquelle se situe l'usager-constructeur qui modélise.

Nous avons donc là un processus générique de construction d'objet physique de complexité quelconque. C'est pourquoi, un véritable modeleur d'objets physiques se doit intégrer dans ses principes, la notion d'assemblage physique.

1.3. Propriétés du processus d'assemblage physique

1.3.1. L'assemblage physique : un processus dynamique

Le processus d'assemblage physique se caractérise par le fait que l'assemblage est le résultat d'un processus physique. Cela se traduira en modélisation par le fait que l'assemblage entre atomes modélisés est le résultat d'une simulation. L'opérateur ne définit pas l'objet tout assemblé. Il donne les atomes (au sens défini ci-dessus de plus petit élément choisi comme non sécable, quelque soit sa taille) et les liens physiques entre ces atomes (propriétés des colles et ciments, méthodes d'encliquetage ...). L'objet assemblé se constitue donc par simulation. L'opérateur peut participer à des processus d'assemblage comme un maçon ou un "legophile". Il peut aussi être à même d'intervenir dans des processus qui pourraient être difficiles à modéliser de manière complètement automatique comme la fusion tellurique. Mais ce n'est pas lui qui détermine explicitement le résultat de l'assemblage.

1.3.2. L'assemblage physique : un processus dissymétrique

L'assemblage physique se caractérise par l'existence de trois phases distinctes en ce qui concerne la configuration structurelle de l'objet :
- une phase de construction
- une phase stable du point de vue structurel
- une phase de déstructuration possible ou fracture

Phase de construction

La phase de construction est exceptionnelle. Elle met en jeu soit une énergie, soit une intention plus grande que dans les deux autres.
Ainsi, le bloc de granit se constitue sous l'effet de forces importantes et d'un changement d'état - la fusion - mettant en oeuvre des grandes énergies. De la même manière, la construction d'un mur par un artisan met en jeu un savoir faire qui permet d'assembler les pièces en leur conférant d'emblée une configuration stable qu'elles n'auraient pas naturellement. L'artisan peut également avoir recours à des processus mettant également en jeu des énergies plus grandes que celles dont l'objet sera le siège

dans les phases ultérieures, par exemple, assemblage en force, encliquetage ... L'artisan peut également utiliser un matériau spécifique susceptible de changer d'état, comme les ciments, dans lesquels sont en jeu des processus physico-chimiques d'énergie plus importante que celles en jeu dans les phases ultérieures de déplacement ou de déformations de l'objet global ainsi construit.

Cela indique une irréversibilité du processus : supposons qu'une fracture intervienne, l'objet ne peut alors se reconstruire de lui même.

Phase stable
La phase stable du point de vue structurel est celle durant laquelle l'objet existe et présente une certaine invariance de forme. C'est l'état courant de l'objet. Il peut cependant se déformer. Les déformations sont donc, par définition, des changements de la forme de l'objet suffisamment petits par rapport à la forme globale. Les forces tant internes qu'externes sont d'ampleur moindre que celles en jeu dans la phase de construction. Elles peuvent conduire à de changements structurels (micro-fractures, micro-tassements ...) qui seront de même de petite ampleur. Dans ce cas, on appellera "forme" d'un tel objet sa forme au repos, lorsqu'il n'est soumis à aucune contrainte extérieure. Le comportement dynamique d'un tel objet dépend de sa structure physique interne et des paramètres physique, masses, élasticités, viscosités, qui caractérisent le matériau .

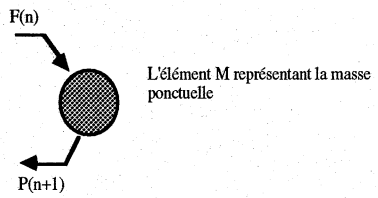
Phase de déconstruction
La phase de déconstruction met en jeu des forces d'intensité intermédiaire entre les forces de construction et les forces s'exerçant durant l'état stable. Ces forces peuvent être internes ou externes. Elles peuvent être fournies soit par un événement exceptionnel dans le temps et/ou dans l'espace tel un choc, soit par la sommation de contraintes diffuses de petites amplitudes (noeuds de vibrations ...) ou bien encore par des changements d'états physiques (écrouissage ...). La structure de l'objet change alors de manière importante et il apparaît des changements de forme qui ne relèvent plus alors de la déformation mais de la transformation : fissures, fractures, éclatements...

2. Présentation de CORDIS - ANIMA

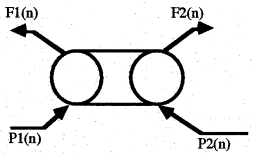
CORDIS - ANIMA est un système formel de construction de modèles physiques, fondé sur une réécriture des principes fondateurs de la physique qui tient compte des contraintes de discrétisation des espaces et d'ordonnancement des calculs existant avec un ordinateur [CLF84][CLFR91]. Les deux éléments de base de Cordis-Anima sont l'élément matériel MAT et l'élément de liaison LIA.

Ils sont dessinés ci-dessous selon leur représentation normalisée : les forces apparaissent en haut, les positions en bas. Il existe d'autres modes de représentation, notamment des diagrammes temporels, qui mettent en évidence l'ordre des calculs. On utilise souvent une représentation simplifiée dans laquelle les éléments MAT sont représentés par des points et les éléments LIA par des traits.

Élément matériel MAT



Élément de liaison LIA



L'élément de liaison L.
F1 = - F2

Un élément MAT dispose d'un point de communication de type M défini par [F -> P]. Un élément LIA dispose de deux point de communication de type L définis par [(P1,P2) -> (F1,F2)]. Les points L vont par paire afin de toujours satisfaire le principe de l'action et de la réaction. Ils lient deux points M et leur fournissent des forces d'égale intensité mais de sens opposés. Sans cela, le modèle ne serait pas physique. Suivant l'algorithme utilisé pour ces points de communication, les éléments peuvent être de nature différente.

Les réseaux Cordis-Anima sont homéomorphes aux réseaux de Kirshoff, aux réseaux d'automates, ... où tous les éléments de la représentation existent au même niveau d'abstraction que tous les autres constituants. Contrairement à la géométrie CSG (constructive solide geometry) qui hérarchise les éléments de la scènes en plusieurs niveaux, tous les éléments (masses et liaisons) d'un réseau Cordis-Anima sont de niveau d'abstraction équivalent, et s'échangent des variables de force et de position. Le réseau est ainsi simulé "à plat". Notre processus de construction récursif à base d'atomes aboutit donc bien à un réseau à un seul niveau, simulable selon les règles de Cordis-Anima.

Equations utilisées dans le simulateur

Les points matériels suivent l'équation fondamentale de la dynamique :

$$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a_g}$$

d'où après discrétisation :

$$X(n+1) = 2X(n) - X(n-1) + \frac{F}{m} \cdot T^2$$

Les liaisons élastiques pures suivent l'équation :

$$\vec{F}_n^{12} = -k.|d_n - d_0|.\vec{u}_n^{12}$$

et les liaisons visqueuses pure l'équation :

$$\vec{F}_n^{12} = -z.\left(\frac{d_n - d_{n-1}}{T_e}\right).\vec{u}_n^{12}$$

Dans la version standard du modeleur - simulateur basé sur le formalisme CORDIS - ANIMA, les algorithmes de l'élement MAT modélisent des masses ponctuelles 3D, les algorithmes des éléments LIA modélisent diverses interactions physiques : un ressort pur, une viscosité pure, une interaction viscoélastique, plastique avec mémorisation, un contact avec frottement, ... etc. Ainsi, le modeleur - simulateur CORDIS - ANIMA décrit tout objet physique (ou non physique) en terme de masses ponctuelles reliées par des interactions. La masse ponctuelle 3D est l'élément de discrétisation le plus petit possible pour la modélisation d'objets tridimensionnels. Son principe garantit l'accès à la modélisation du plus grand nombre d'objets naturels. En effet, l'agencement de masses ponctuelles permet de modéliser des fluides ou des pâtes ainsi que des solides déformables ou rigides, par le choix d'interactions adéquates.

3. Les atomes physiques

3.1. Typologie des atomes

Le processus de construction d'objets par assemblage physique étant récursif, on appelle "atomes" les composants insécables, homogènes ou non, à partir desquels se construira l'objet.

Les atomes constitués de plusieurs points matériels sont des atomes dans lesquels les fonctions d'interactions relient ces points de manière permanente. Les fonctions d'interaction sont des fonctions d'interaction assurant la cohésion permanente comme par exemple de simples interactions visco -élastiques. La topologie du réseau CORDIS - ANIMA représentant cet objet ainsi que la valeur des paramètres des éléments <MAT> pour les inerties, et <LIA> pour les viscosités et les élasticités déterminent les modes de déformations de l'objet. A noter que cet objet n'est pas nécessairement homogène. Sa seule propriété essentielle est de ne pas présenter de changement d'état et en particulier d'être insécable.

Cet atome peut être de "forme" et de topologie quelconques. Le terme "forme" doit être pris tel que nous l'avons défini ci-dessus dans le sens de "forme au repos", en l'absence de contraintes extérieures.

Dans la mesure où la forme est un critère déterminant du comportement des objets, nous avons intérêt à classifier les formes en formes typiques. Le propos ne perd pas

de sa généralité puisque d'autres formes seront accessibles par construction. En particulier, nous pouvons sommairement distinguer :
- l'atome ponctuel ou point matériel
- l'atome volumique dans lequel les trois dimensions de l'objet sont du même ordre de grandeur. Nous l'appellerons "bloc" (par analogie avec un bloc de granit par exemple),
- l'atome surfacique dans lequel une des dimensions est d'un ordre de grandeur inférieur aux deux autres. Nous l'appellerons "cellule" (par analogie avec les cellules des tissus organiques)
- l'atome linéique dans lequel deux des dimensions (définissant la section) sont d'un ordre de grandeur inférieur à la troisième (la longueur). Nous l'appellerons "tige" (par analogie avec les tissus végétaux).

Entre la cellule et la tige, un cas intermédiaire intéressant est la "latte" qui présente une dimension grande (la longueur) , une dimension moyenne (la largeur) et une dimension petite (l'épaisseur).

4. Modélisation des atomes

Les 3 types d'atomes volumiques, surfaciques et linéiques sont formés à partir de l'assemblage d'atomes ponctuels, liées par des liaisons viscoélastiques non brisables. Ces atomes définissent ainsi les plus petits éléments insécables . Les figures ci-après utilisent la représentation simplifiée décrite dans le paragraphe 2, Les points représentent des masses ponctuelles calculées par l'élément MAT et les traits des interactions physiques calculées par des éléments LIA.

<u>Atomes volumiques</u>

Les blocs ou atomes volumiques correspondent à des structures tridimensionnelles assez rigides. Ils forment une structure spatiale. Parmi les topologies explorées, issues des réseaux étudiés par les cristallographes, citons les réseaux cubiques, hexagonaux compacts [MQ88], et la structure de la molécule de fulrène.

Précontrainte.

Tous ces blocs sont précontraints, c'est à dire qu'il existe une tension interne qui permet de minimiser le nombre de positions d'équilibre du bloc et de rendre leur aspect régulier.

Les figures 1, 2, et 3 montrent des atomes construits sur un réseau cubique. Chaque cube élémentaire comporte 4 liaisons diagonales de précontrainte. Elles ne sont représentée que sur la figure 1.

Les figures 4, 5 et 6 montrent des atomes construits sur un réseau hexagonal compact. La figure 6 montre un bloc formé par l'assemblage de 3 blocs hexagonaux compacts auto-empilables par simulation : les 3 blocs sont liés par des ressorts visco-élastique de longueur nulle, ce qui a pour effet de joindre les blocs. Afin de conserver la même "masse volumique" que les blocs de départ, on retire 8 des masses qui sont dans les zones de contact et le blocs passe de 60 masses à 52).

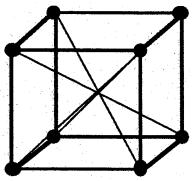


Figure 1. *Bloc cubique*
8 masses, 16 liaisons viscoélastiques de 2 longueurs différentes.

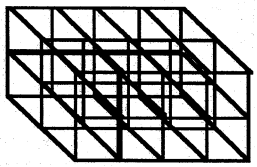


Figure 2. *Bloc parallélépipèdique*
45 masses, 160 liaisons viscoélastiques de 2 longueurs différentes.
(Toutes les liaisons ne sont pas représentées)

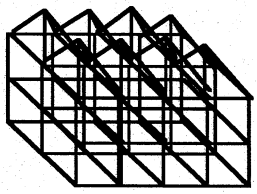


Figure 3. *Bloc "Lego"*
53 masses, 192 liaisons viscoélastiques de 2 longueurs différentes. Ce bloc est "auto-empilable".(Toutes les liaisons ne sont pas représentées)

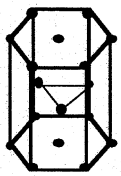


Figure 4. *Bloc hexagonal compact*
17 masses, 61 liaisons viscoélastiques de 3 longueurs différentes.
(Toutes les liaisons ne sont pas représentées)

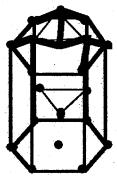


Figure 5. *Bloc hexagonal compact auto-empilable*
20 masses, 70 liaisons viscoélastiques de 3 longueurs différentes.
(Toutes les liaisons ne sont pas représentées.)

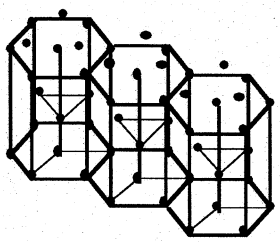


Figure 6. *Bloc hexagonal compact triple auto-empilable*
52 masses, 191 liaisons viscoélastiques de 3 longueurs différentes.
(Toutes les liaisons ne sont pas représentées)

Atomes surfaciques : lattes

La figure 7 montre un exemple d'atome surfacique formé de 12 masses. Ce modèle ne possède pas de haubanage mais présente une forte rigidité et un très bon comportement en flexion.

Les liaisons n'ont pas été toutes tracées sur le premier schéma pour des raisons de lisibilité, mais les liaisons X2 et X4 prennent bien sûr place entre les masses numérotées plus haut.

Les liaisons X1 sont des diagonales de longueur $\sqrt{2}$.longueur des cotés.

Les liaisons X2 sont des diagonales de longueur $\sqrt{5}$.longueur des cotés.

Les liaisons X4 sont des diagonales de longueur $\sqrt{17}$.longueur des cotés.

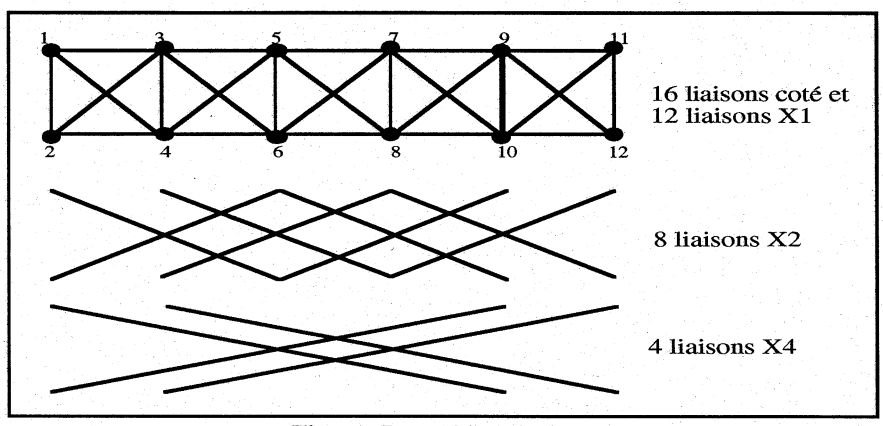


Figure 7. *Modèles de latte*
12 masses, 38 liaisons viscoélastiques de 4 longueurs différentes.
Schéma vu "de dessus".

Atomes linéiques : tiges ou hélices

Cette structure (voir fig. 9) qui s'appuie sur un maillage triangulaire est définie par récurrence. On peut ainsi créer par programme des hélices composées d'un nombre quelconque de masses.

Base de récurrence : 3 masses 1, 2, 3 reliées par des liaisons de longueur c.

Relation de récurrence : soit une structure de type hélice à n masses, $n \geq 3$. On obtient une structure hélice à n+1 masses en liant une n+1 ième masse aux masses n, n-1, n-2 par des liaisons de longueur c.

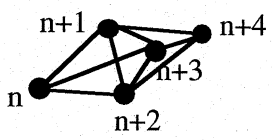


Figure 8. *Relation de récurrence pour la construction des hélices.*

On utilise une précontrainte entre les masses i et i+4 pour $i \in [1, N-4]$ pour lever l'ambiguïté de la position d'équilibre des éléments en placant entre elles une liaison de longueur $c.\frac{2.\sqrt{6}}{3}$ (N étant le nombre de masses de l'hélice).

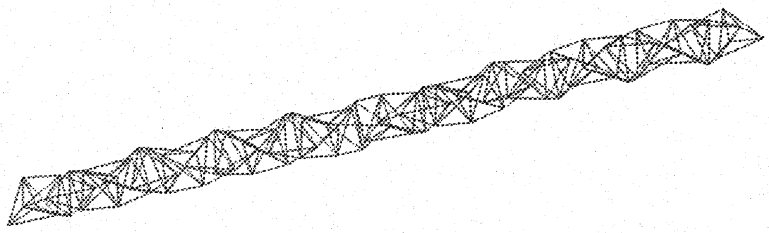


Figure 9. *Hélice de 100 masses.*

5. Assemblage des blocs

La création et la destruction des objets correspondent à deux processus distincts :
- le premier processus est une véritable *construction* physique itérative morceau par morceau. Tout au long de la construction, la simulation a lieu et garantit que l'assemblage est dans une position d'équilibre en permanence. L'assemblage physique aboutit ainsi à une configuration stable lors de la seconde phase, par principe, puisque le simulateur est en fonctionnement pendant la construction.
- le second processus, la destruction totale ou partielle de l'assemblage des objets, découle de la *simulation*. Ici, ce n'est pas la volonté du concepteur qui détermine ce qui se passe, tout l'avenir de la scène étant présent potentiellement dans son état initial. Les objets virtuels présents dans la machine interagissent entre eux (collisions, chocs, vibrations, ...) ou avec l'extérieur par l'intermédiaire de transducteurs gestuels.

Nous allons présenter les deux processus. Le premier par la description des propriétés et de la mise en place de l'assemblage des atomes. Le deuxième par la description du fonctionnement du simulateur.

5.1. Phase de construction : ciment immatériel "à prise immédiate".

Le procédé d'assemblage doit satisfaire les 3 propriétés suivantes :
P1 : dans le modèle produit, les blocs “cimentés” gardent les mêmes positions relatives.
P2 : la longueur au repos de la liaison ciment doit être égale à la distance entre les masses qu'elle lie lorsque celles-ci sont dans un empilement en équilibre.
P3 : deux blocs qui étaient liés par le ciment et qui se sont séparés ne se réassemblent pas.

On pourrait modéliser explicitement le changement d'état temporel du ciment par le changement progressif du profil d'une interaction au cours du temps. Dans le modèle développé, l'assemblage des blocs a lieu à l'aide de ce que nous appellerons "un ciment à prise instantanée". Cela signifie que nous pourrons modéliser le ciment par des systèmes mécaniques où le changement d'état dépend uniquement de la distance entre les blocs à assembler. Cela signifie que le changement d'état se fera entre deux pas de simulation. Une autre simplification consiste à effectuer cette liaison entre les

blocs uniquement par fonction d'interaction physique : à un instant les deux blocs à lier seront liés par une interaction d'un certain type et à un autre instant par une interaction d'un autre type. Cela signifie qu'il n'y a pas de composant d'inertie dans la liaison entre blocs et donc que ce "ciment" est immatériel. Cette hypothèse ne limite pas la généralité du procédé car rien n'empêche d'enrichir le composant "ciment" en le considérant en sous partie de type "atomes" reliées par des interactions "immatérielles".

Etant donné les simplifications et hypothèses ci-dessus, l'interaction reliant les masses de deux blocs à assembler peut se décrire par un automate d'état dans lequel les conditions portent uniquement sur les distances. Un tel automate peut se décrire de manière algébrique par une fonction linéaire par morceaux. La fonction donnée à la figure 10 satisfait les trois propriétés nécessaires et suffisantes de l'assemblage décrites ci-dessus [God94].

L'axe des abscisses est divisé en 4 parties aux rôles distincts :
Zone 1 : la force créée par la liaison repousse les deux masses. Il s'agit d'un comportement de butée.
Zone 2 : la force créée par la liaison attire les deux masses, créant une cohésion.
Zone 3 : le rôle de cette zone répulsive est de s'opposer au réassemblage des masses après une cassure, c'est à dire un passage en zone 4.
Zone 4 : la liaison ne crée aucune force si bien que les deux masses sont libres l'une par rapport à l'autre.

La résistance de la liaison à la rupture dépend des pentes de chaque zone, des seuils définissant les frontières entre les zones et des rapports entre ceux-ci.

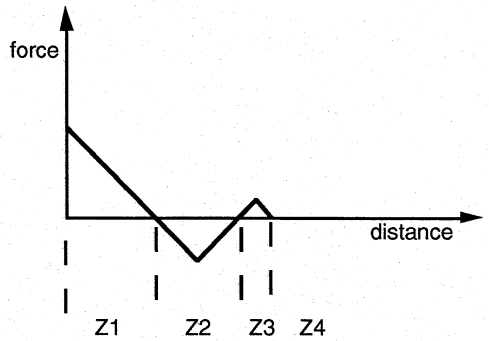


Figure 10. *Profil de la fonction d'interaction "ciment".*

L'élément de liaison standard de CORDIS - ANIMA correspondant cette interaction fournira deux forces égales et opposées aux deux masses ponctuelles qu'il relie, en fonction des distances entre ces deux masses ponctuelles , l'intensité de la force étant calculée par cette fonction.

L'assemblage des blocs consiste à placer des liaisons de ce type entre chaque masse constituant les blocs insécables. L'état initial du système est tel qu'il corresponde à l'état assemblé. : les positions des masses sont telles que les liaisons sont dans les zones 1 ou 2.

5.2. Phase de simulation : rupture des liaisons.

Lors de la simulation, une liaison peut être amenée à se briser ou non. La cassure se produit lorsque l'on passe des zones 1 ou 2 à la zone 4. La zone 3 apporte de l'énergie à la rupture, mais de manière très faible. Le rôle de la zone 3 est d'éviter le réassemblage des masses donc des objets, comme par un phénomène de capillarité, si les masses revenaient à proximité l'une de l'autre.

Généralités sur la simulation :
Dans les simulations effectuées, la scène nest pas constituée uniquement de l'objet assemblé fracturable. Cet objet (i.e. ses atomes insécables et le "ciment" qui les lie) est plongé dans un milieu de très faible viscosité (voisine de celle de l'air) et comprenant une gravité. De plus, les objets sont posés ou tombent sur un sol. Celui-ci est modélisé d'une seule masse, placé très loin au dessus des objets. Chaque masse des objets est relié à la masse représentant la terre par deux interactions : une interaction de collision de type "sphère-creuse" (application de forces attractives entre les masses lorsqu'elles s'éloignent de plus d'une distance donnée) et une interaction de frottement sec [Jim93].
Les interactions de type "ciment" ne sont pas les seules interactions entre les blocs. Les collisions entre blocs sont gérées par des interactions de type butée visco-élastique (application de forces répulsives entre les masses lorsqu'elles sont distantes de moins d'une distance donnée). Tous les atomes des objets construits sont en interaction de butée 2 à 2 [JL93]. Ainsi il leur est impossible de se trouver en moyenne à des distances inférieures à ce seuil d'interaction. Ce type d'interaction est largement décri dans [LJR91] et largement utilisée aujourd'hui.

Le fonctionnement du simulateur est basé sur le formalisme Cordis-Anima. Chaque pas de simulation comporte deux étapes : algorithme associé aux masses, algorithmes associés aux liaisons. Les modèles sont échantillonnées à une fréquence voisine de 1KHz, ce qui permet de lier ces objets à des simulations auditives et tactilo-proprio-kinéstésique.

6. Résultats et interprétations

Avec le système Cordis-Anima (élaboré tout au long d'une dizaine d'année de réflexion environ) composé des interactions déjà existantes, et les outils développés spécifiquement pour ce type de modèles (quelques mois de travail), nous sommes en mesure de créer la structure d'une scène comportant des objets empilés en position stable en quelques minutes. Le gros du travail consiste alors à ajuster les paramètres du milieu, des liaisons internes aux atomes, des liaisons de frottement avec le sol. Il faut de l'ordre de 4 ou 5 simulations pour obtenir le processus de convergence paramétrique. La durée d'une simulation est variable et s'étend des situations en temps réels pour les scènes comportant environ 3 milliers de liaisons à des temps de

plusieurs minutes par image pour les simulations les plus lourdes, comme celles présentées à la fin de cet article. Dans ce dernier cas, de nombreuses optimisations restent possibles.

La part de compétence propre à l'utilisateur-concepteur dans la réalisation de tels modèles est certe importante. Une sensibilité particulière à la physique est un plus pour la compréhension et l'ajustement des paramètres. Cette part est modérée par le fait que Cordis-Anima est un système auto-pédagogique : par son utilisation, l'utilisateur acquiert très rapidement une certaine connaissance intuitive de la physique.

Note sur la visualisation :
Dans les simulations présentées ici, nous avons choisi de tracer un cercle de diamètre L/2 autour des certaines masses, L étant la valeur de seuil de la butée. Dans d'autres parties des atomes, les masses ne sont par représentées mais elles sont liées par des traits. Pour cette raison, les blocs superposés sont distants de L/2, et donne l'impression d'un vide entre les blocs. L'interprétation de la forme des objets obtenus est un travail de recherche à part entière. Dans les figures faisant apparaître des colonnes, le bloc supérieur est lié à un bloc invisible, simulant le plafond d'une salle. Le destructeur est un pendule à l'extrémité duquel se trouve une masse pesante. Le fil du pendule n'est pas représenté.

6.1. Exemples de colonnes

Un large ensemble de comportements de fractures, de bris, de cassures ont été obtenus. Les figures ci-dessous montrent des colonnes soumises au choc d'un pendule. Selon les cas, c'est à dire selon les paramètres utilisés de masse et d'interaction, la solidité des assemblages est plus ou moins grande, et l'on obtient des comportements différents malgré les mêmes conditions initiales du point de vue des positions. Les figures 11, 12 et 13 montrent une colonne de blocs hexagonaux triples soumis au même choc mais avec un ciment différent dans chaque cas.

Figure 11 : la colonne se déforme et résiste au choc.
Paramètres de la liaison ciment : longueur de la zone attractive Z2 = 20% de la longueur de la zone butée Z1, longueur de la zone de non réassemblage Z3 = 2% de la longueur de la zone butée Z1. Pentes 500 N/m.

Figure. 12 : La colonne se brise en 3 parties dès l'impact et chaque partie reste entière lors du contact avec le sol.
Paramètres de la liaison ciment : longueur de la zone attractive Z2 = 10% de la longueur de la zone butée Z1, longueur de la zone de non réassemblage Z3 = 2% de la longueur de la zone butée Z1. Pentes 500 N/m.

Figure 13 : le choc initial détache un des éléments de la colonne qui se brise en 3 parties. Au contact du sol, certaines parties se séparent en éléments plus petits alors que d'autres restent entiers.
Paramètres de la liaison ciment : longueur de la zone attractive Z2 = 10% de la longueur de la zone butée Z1, longueur de la zone de non réassemblage Z3 = 2% de la longueur de la zone butée Z1. Pentes 100N/m.

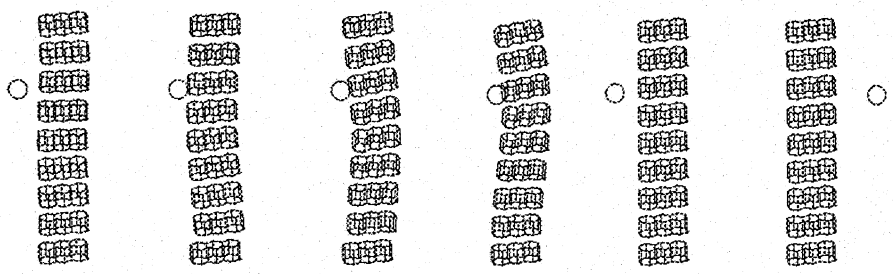


Figure 11. *Colonne de blocs hexagonaux triples résistant à un choc. Images 76, 83, 86, 91, 96 et 250 de la simulation.*

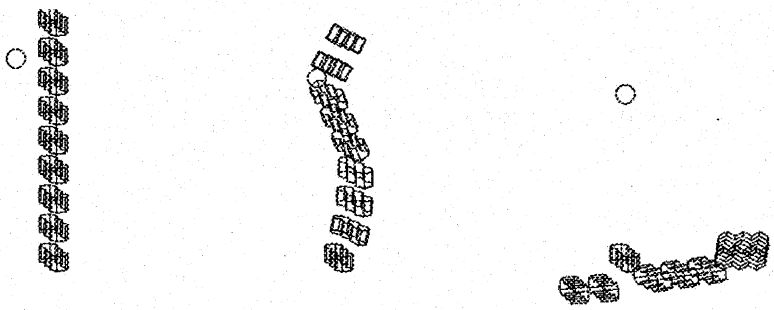


Figure 12. *Colonne de blocs hexagonaux triples se brisant en plusieurs morceaux. Images 70, 95 et 190 de la simulation.*

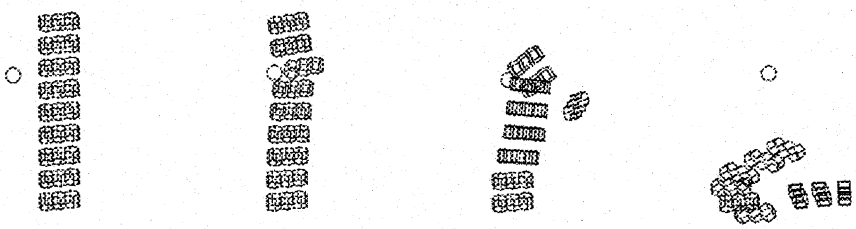


Figure. 13. *Colonne de blocs hexagonaux triples se brisant en éléments de base. Images 75, 83, 102 et 199 de la simulation.*

6.2. Exemples de murs

Les figures 13 et 14 montrent deux exemples de murs détruits par une masse projetée contre ceux-ci.

Figure 14 : le mur hexa est formé de 30 atomes hexagonaux triples auto-empilables. Le mur n'est pas fixé au sol, et la liaison blocs/sol ne comporte pas de frottement sec, d'où un glissement des blocs sur le sol et une rotation du mur lors de l'impact.

Figure 15 : le mur lego comporte 24 atomes "lego". La rangée inférieure est fortement liée au sol à l'image des fondations du mur. La liaison blocs/sol contient une composante de frottement sec [Jim93], d'où l'arrêt rapide et la rotation des blocs au contact du sol.

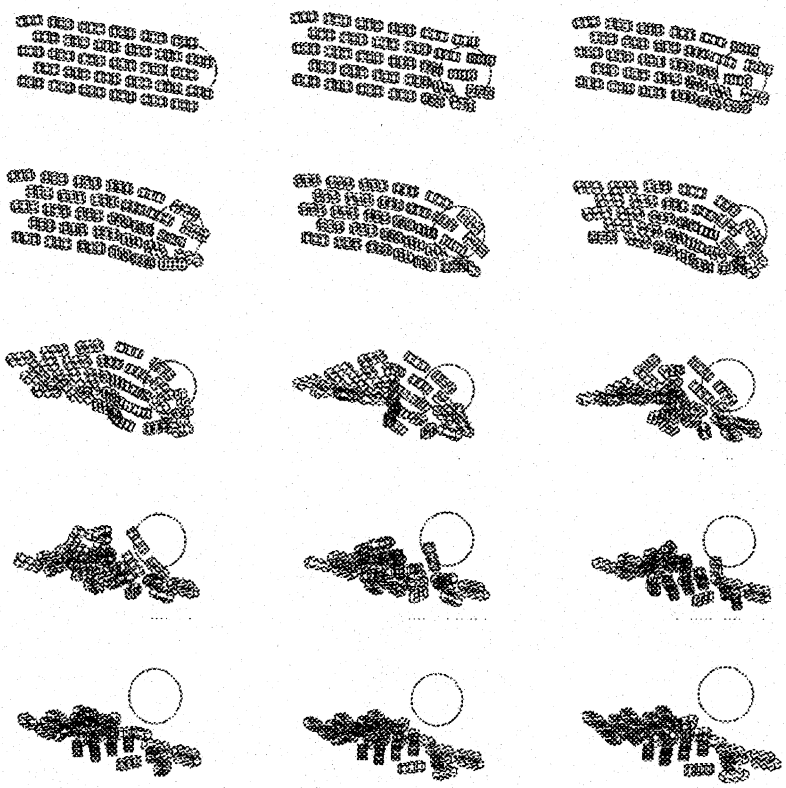


Figure 14. *Mur hexa : 1563 masses.*
5/25ème de sec. entre chaque image.

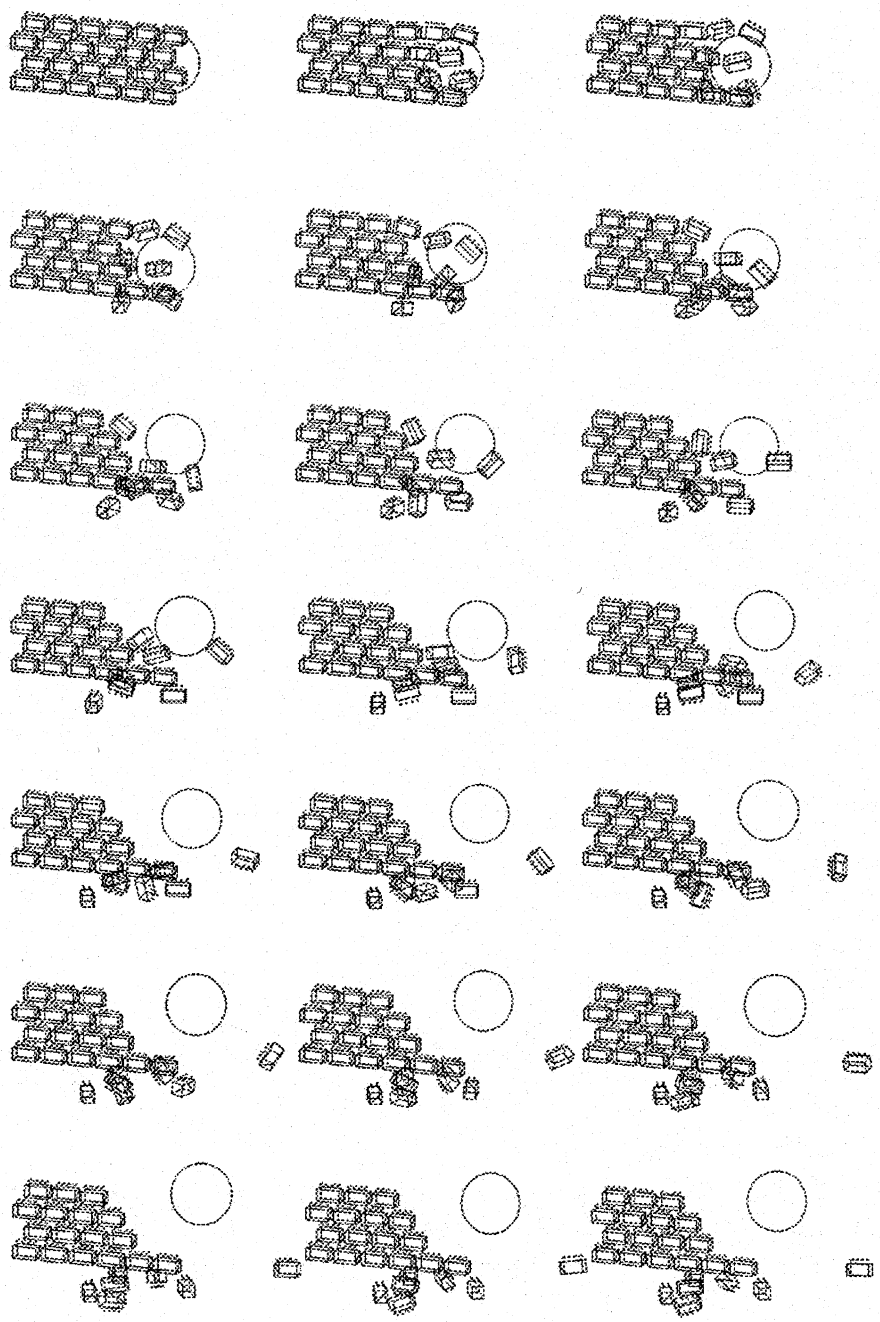


Figure 15. *Mur lego avec frottement sec : 1275 masses.*
3/25ème de sec. entre chaque image.

Notons que tous les assemblages présentés sont homogènes du point de vue de la masse (chaque masse ponctuelle a la même valeur et le même diamètre apparent, c'est à dire la même interaction de butée avec les autres masses) et de la solidité des assemblages (toutes les liaisons ciment ont les mêmes paramètres dans une simulation donnée). Ainsi les zones de fractures ne sont en aucun cas privilégiées ou prédéterminées. L'apparition d'une fracture viens de l'émergence d'un comportement macroscopique dans le modèle. L'entrée en résonance du matériau provoque des noeuds et des ventres d'oscillation non visibles par l'oeil, mais nécessaire à la simulation de l'objet. Lorsque l'amplitude d'une déformation atteint le seuil défini dans la liaison "ciment", il y a bris dans l'objet. On pourrait imaginer de fragiliser un matériau en un point donné ou de le renforcer. Avec le mode de modélisation que nous utilisons, on contrôle donc bien l'objet par la description de ses caractéristiques propres et non par le comportement que l'on souhaite obtenir de lui.

7. Conclusion

La méthode présentée permet la construction physique d'objets déformables, fracturables et brisables. La construction est basée sur des éléments insécables appelés atomes, hiérarchiquement agencés pour former des objets plus complexes qui eux sont brisables. La phase de construction comme la phase de simulation proprement dite sont toutes deux physiques, et utilisent le simulateur Cordis-Anima.

Un des avantages de cette méthode est de se situer à la frontière entre les systèmes de CAO géométrique (aspect construction) et l'approche utilisée en calcul de structures mécaniques ou en résistance des matériaux (aspect simulation physique), devrait permettre d'évaluer grossièrement mais apidement la qualité d'un renforcement de l'assemblage de matériaux ou d'une structure (nervure, haubanage), soit dans un modeleur du type CAO, soit dans un simulateur physique plus spécialisé. On peut ainsi associer rapidement et de manière transversale, une esquisse de construction et une esquisse de solidité. Une fois que la convergence sur les deux aspects a donnée des schémas d'assemblage plausibles géométriquement et physiquement , à la suite de quoi, des constructions géométriques plus détaillées et des simulations physiques plus localisées et plus spécifiques peuvent être réalisées.

8. Bibliographie

[Bar89] D. BARAFF - “Analytical methods for Dynamics Simulation of Non-Penetrating Rigid Bodies.” - Computer Graphics, 23 (3) july 1989, pp. 223-232 (Proceedings of SIGGRAPH’89).

[Bar90] D. BARAFF - “Curved Surfaces and Coherence for Non-penetrating Rigid Body Simulation.” - Computer Graphics, 24 (4) august 1990, pp. 19-28 (Proceedings of SIGGRAPH’90).

[Bar91] D. BARAFF - “Coping with Friction for Non-penetrating Rigid Body Simulation” - Computer Graphics, Volume 25, Number 4, July 1991, p. 31-40 (Proceedings of SIGGRAPH’91).

[CLF84] C. CADOZ, A. LUCIANI, J.L. FLORENS - "Responsive Input Device and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms : The Cordis System" -

Computer Music Journal, 8, N°3, pp. 60-73. M.I.T. Press, Cambridge Mass. 1984.
[CLFR91] C. CADOZ, A. LUCIANI, J.L. FLORENS, O. RAOULT - "Physique discrète, discrétisation du temps et de la matière" - 1er Colloque Géométrie en Imagerie: Fondement et Application, Strasbourg, 26-27 septembre 1991.
[God94] A.GODARD - "Construction d'objets manufacturés déformables et brisables, modèles pour l'animation et la synthèse d'image" - Mémoire de DEA Informatique, Université Joseph Fourier - Grenoble, juin 1994.
[Jim93] S.JIMENEZ -" Modélisation et simulation physique d'objets volumiques déformables complexes" - Thèse INPG 1993.
[JL93] S. JIMENEZ, A. LUCIANI - "Animation of Interacting Objects with Collisions and Prolonged Contacts" - Modeling in Computer Graphics (IFIP series on Computer Graphics), pp.129-141 - Springer Verlag 1993.
[LJR91] A. LUCIANI, S. JIMENEZ, O. RAOULT, C. CADOZ, J.L. FLORENS - "An unified view of multitude behavior, flexibility, plasticity and fractures Balls, Bubbles and Agglomerates" - Modeling in Computer Graphics (IFIP series on Computer Graphics), pp. 54-74 - IFIP 1991 (Springer Verlag Ed.)
[LM93] X. LI, J.M. MOSHELL - "Modeling Soil: Realtime Dynamic Models for Soil Slippage and Manipulation" - Computer graphics proceedings, Annual Conference Series, 1993, p.361-368 (Proceedings of SIGGRAPH 93).
[Luc91] A. LUCIANI - "Les catégories de modèles en animation et simulation du mouvement" - Sénimaire Animation et Simulation, Grenoble. 15, 16 Octobre 1991.
[MQ88] J. MESPLEDE, J.L. QUEYREL. - "Précis de chimie" - Eds Bréal 1988.
[RM92] F. RACHEL MARTY - "Contribution à l'étude d'un modeleur géométrique pour la CAO des systèmes mécaniques" - Thèse de physique et informatique - Aix-en-Provence, 1992.