



**HAL**  
open science

## **MODELES COMPORTEMENTAUX. Vers une approche instrumentale de la synthèse d'images**

Annie Luciani, Stéphane Jimenez, Jean-Loup Florens, Olivier Raoult, Claude  
Cadoz

► **To cite this version:**

Annie Luciani, Stéphane Jimenez, Jean-Loup Florens, Olivier Raoult, Claude Cadoz. MODELES COMPORTEMENTAUX. Vers une approche instrumentale de la synthèse d'images. Journées GRO-PLAN 1989, 1989, Strasbourg, France. pp.[14]. hal-00910597

**HAL Id: hal-00910597**

**<https://hal.science/hal-00910597>**

Submitted on 23 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 COMPORTEMENTAUX**  
Vers une approche instrumentale de la synthèse d'images

Annie LUCIANI - Stéphane JIMENEZ  
Jean-Loup FLORENS - Olivier RAOULT  
Claude CADOZ

Ministère de la Culture et de la Communication (Groupe ACROE)  
Institut National Polytechnique de Grenoble (Laboratoire LIFIA)  
46 av. Félix Viallet - 38000, Grenoble

Les travaux présentés ici ont un triple objectif:

1. Proposer une extension de la notion d'objet: la synthèse d'images a élaboré la notion d'objet géométrique. Pour contrôler les comportements dynamiques de ces objets, il faut élaborer la notion d'objet physique. Cela passe par le choix et la justification d'invariants structurels supplémentaires.

2. Proposer des modèles d'objets physiques qui présente un certain degré de constructivisme. Pour cela, il faut définir les conditions d'une modularité conceptuelle et algorithmique pour des comportements répondant macroscopiquement aux lois de la physique.

3. Permettre une certaine instrumentalité de la simulation. Il s'agit de permettre la situation où l'opérateur humain actionne réellement les objets simulés et dispose pour ce contrôle des informations visuelles et tactiles représentatives du comportement dynamique des objets. Cette possibilité se révèle utile tant pour des usages de ce type de modèles en création artistique, que dans des applications de téléopération ou de téléprésence et plus généralement s'intègre dans une vision étendue de la communication homme - machine, intégrant la communication par le geste.

**1 EXTENSION DE LA NOTION D'OBJET**

Nous voyons la synthèse d'images, statiques ou animées, comme un art de l'OBSERVABLE.

En effet ces objectifs sont :

\* modélisation et visualisation de surfaces et volumes :

CGS - Constructive Solid Geometry -,

BR - Boundary representation

FFS - Free forms surfaces ...

\* modélisation de l'apparence visuelle intrinsèque - modèles de texture

\* modélisation du comportement intrinsèque à la lumière - modèles d'éclairage (reflection, diffusion, radiosité)

\* manipulation de points de d'observation spatiaux - Points de vue, positions relatives

\* manipulation des éclairagements

On peut dire que la synthèse d'images telle que présentée par les domaines ci-dessus a élaboré une représentation des objets naturels par leur invariants spatiaux et visuels.

De fait, ces objets sont :

\* statiques

\* sans interaction

\* non manipulables

Or un "objet", tel que l'entend l'assertion courante, se doit d'être :

\* capable de mobilité, par ex. pouvoir tomber...

\* capable d'interaction, par ex. pouvoir pousser et être poussé...

\* capable d'être manipulé, par ex. pouvoir être saisi, brisé, jeté ...

Les exemples ci-dessus nous montre simplement que :

- \* si un objet est manipulable, alors il est capable d'interaction,
  - \* s'il est capable d'interaction, alors il est mobile,
- les réciproques n'étant pas vraies.

C'est pourquoi, la condition d'instrumentalité est une condition nécessaire et suffisante de la définition d'objet ou de modèle physique.

Pour avancer dans cette nouvelle approche de l'objet, considérons 3 points :

#### 1er point : la mobilité

On peut distinguer 2 catégories de modèles producteurs de perceptions [Luc 85] :

- \* ceux modélisant les phénomènes perceptifs eux-mêmes : on peut les appeler "modèles phénoménologiques"
- \* ceux modélisant leur cause : les "modèles causaux"

Dans le cas du son, on sait par exemple que tout phénomène sonore accessible à l'observation est productible par la "synthèse additive", méthode inverse de l'analyse de Fourier.

Dans le cas du mouvement, tout mouvement observable peut être analysé et restitué par la suite des positions en fonction du temps. Dans certains cas, un compactage de la représentation peut être effectué. Par exemple, le mouvement d'objets rigides gagne à être décrit en termes de succession de combinaisons de transformations géométriques élémentaires.

Ces deux exemples mettent en évidence que les modèles phénoménologiques sont implicitement ou explicitement basés sur une méthodologie d'analyse - synthèse d'un phénomène particulier. En conséquence, ils montrent que n'intervient dans le procédé de synthèse aucune notion de contrôle. Ils sont purement descriptifs.

A l'inverse, un objet naturel se présente comme un potentiel d'effets perceptifs se réalisant par une action extérieure. Ce que l'on peut nommer cause d'un mouvement ou d'un son, est la conjonction de cette action et de cet objet. Ce que l'on appelle modèles causaux du mouvement sont

ceux qui rendent compte d'un effet obtenu par application d'une action sur un objet. Intègrent par principe la notion de contrôle du mouvement, ils sont générateurs de mouvements.

#### 2ième point : la situation instrumentale

La situation dite instrumentale, schématisée figure 1, décrit notre relation quotidienne à l'univers physique. Elle traduit aussi bien la relation directe entre un homme et les objets naturels, que la relation indirecte par l'intermédiaire d'une machine, objet fabriqué par l'homme pour agir sur son environnement.

Coté homme, elle se décrit par :

- une action gestuelle AG
- des perceptions gestuelles PG
- des perceptions sonores PA et visuelles PV

Coté objet, elle définit l'objet comme étant capable de recevoir ces actions et de les transformer en informations à destination des canaux perceptifs gestuels, visuels et sonores humains.

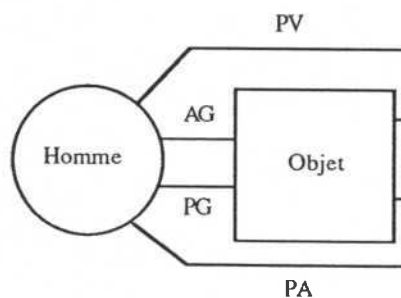


figure 1 - La situation instrumentale

#### 3ième point : les modèles physiques comme modèles causaux

Les modèles physiques sont ceux qui par le calcul associent deux variables physiques duales, forces - déplacement, contraintes - déformations ..., sont des modèles causaux. Par ailleurs, supposant l'ordinateur doté de moyens de communication de ces variables physiques vers l'homme, ils sont un support privilégié de la situation instrumentale. Ils ont pour rôle d'associer par le calcul des signaux physiques (forces / positions) d'entrée (et de sortie de manière naturelle.

## 2 OBJET ET MODELE PHYSIQUE

### 2.1 Apparition de variables duales

Un modèle géométrique ne traite qu'une seule catégorie de variables de dimension [L], variable d'espace.

Dans un modèle physique apparaissent 2 types de variables, dites duales, l'une intensive, l'autre extensive. (forces/positions, tension/courant, contraintes/déformations) . Le rôle du modèle physique est de les associer. Le modèle physique effectue une transduction {espace [L] - force [F]}.

Lorsqu'on s'intéresse au mouvement des corps, la corrélation entre ces variables est assurée par les lois newtonniennes, conservation de la quantité de mouvement et principe d'action-réaction.

### 2.2 Représentation dipolaire

Le modèle géométrique produit des données de type [L] à partir de données de type [L].  
Le modèle physique se caractérise par une fonction  $O : O(P,F) = 0$

Il peut se représenter comme un dipôle (Figure 2)

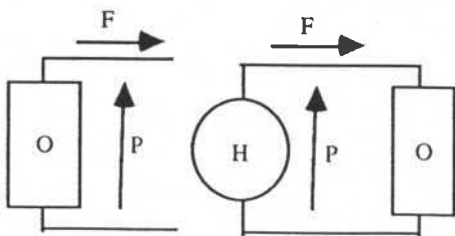


figure 2 - L'objet physique, un dipôle

On remarque alors que :

1. On peut envisager la construction de modèles physiques comme assemblage de dipôles.
2. L'homme manipulant un objet physique peut se représenter aussi comme un dipôle.
3. Contrairement à l'animation produite à partir de modèles phénoménologiques, le temps est

implicite. La fonction  $O$  est analogue à une fonction de transfert.

Il en résulte que les modèles physiques sont génériques pour le mouvement. La fonction  $O$  code une classe de mouvement. Les mouvements particuliers s'exprimeront en fonction d'actions particulières dépendantes explicitement du temps.

### 4. Discrétisation structurelle

La contrainte de communication de l'objet avec son univers environnant implique :

\* que cet univers environnant puisse se présenter à l'objet comme étant de même nature, c'est à dire qu'il puisse échanger avec l'objet des forces et des positions

\* une séparation structurelle en 2 objets communicants, l'un l'objet lui même, l'autre l'univers extérieur

\* d'une manière plus générale, la modélisation de l'univers physique passe par une discrétisation structurelle (fig 3) : un ensemble de blocs échangent entre eux des variables physiques; chaque bloc se présente comme un objet physique défini, entre autre, par une constante de temps intrinsèque. On obtient ainsi une modélisation de l'univers physique sous forme de réseau [Cad 81].

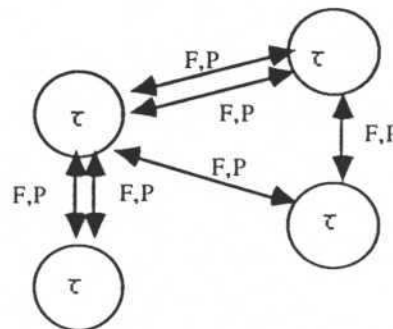


figure 3 - Discrétisation structurelle

Cette représentation a l'avantage - ou l'inconvénient - de définir les objets autant par leurs propriétés intrinsèques que par leurs communications.

Par ailleurs, elle conforte le principe premier de "manipulabilité et d'"instrumentalité".

## 2.3 REPRESENTATION DE LA SITUATION INSTRUMENTALE

La représentation de la situation instrumentale sur un média de représentation mécano-visuo-acoustico-informatique, suppose [figure 4] :

1. de séparer objectivement chacun des canaux de communications avec l'objet. L'objet sera muni dans sa communication avec l'homme de transducteurs différenciés:

- \* transducteurs acoustique : le haut parleur
- \* transducteur visuel : l'écran
- \* transducteurs gestuels - les TGR

Ceux ci sont des dispositifs mécaniques de morphologie adaptée au geste humain, muni de capteurs et de moteurs. Ces derniers permettent la programmation du comportement mécanique du dispositif et ainsi la perception par l'homme de l'objet "virtuel" manipulé.

2. d'associer les différents signaux transitant par chaque transducteur par un organe de calcul, qui est chargé d'élaborer les signaux de "sortie" visuels, gestuels et acoustiques, en fonction des signaux d'entrée, gestuels, de manière analogue à la corrélation effectuée dans un objet réel [Cad 79-81, Luc 81-85].

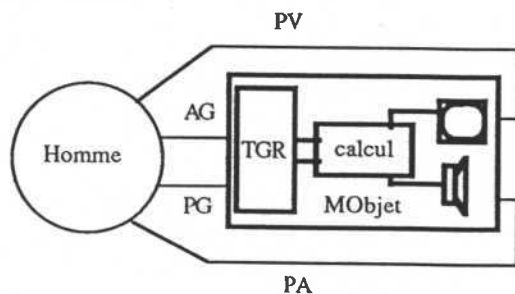


figure 4 - La situation instrumentale représentée

Cette situation produit un "objet réel simulé" (ou "virtuel") :

- \* réel, car réellement perçu par l'opérateur humain selon ces canaux sensoriels principaux. les 2 situations, naturelle et représentée, peuvent être analogues dans la nature des actions et des perceptions ainsi que dans leur agencement temporel. Par contre, elles se distinguent par principe par l'éclatement fonctionnel et matériel des systèmes transducteurs.
- \* "virtuel", car la sensation d'existence de cet objet est produite par un système artificiel.

Le support de représentation - la machine de simulation avec les transducteurs adéquates - doté des programmes de simulations spécifiques pour chaque objet constitue un modèle de l'objet réel de référence (MObjet). Les critères d'évaluation du

modèle qualifient l'usage pour lequel il est développé. Dans notre cas, Les critères portent sur la conformité sensori-motrice évaluée par l'homme entre les deux objets.

Sur ce support de représentation, les échanges physiques entre l'objet simulé et l'extérieur sont nécessairement orientés. Cela conduit à une nécessaire orientation des calculs dans l'organe de simulation. Alors, le dipôle représentant l'objet physique, pour être calculable par un algorithme et être communiquant doit être un dipôle orienté. Il peut l'être de 2 manières :

1.  $O' : F \rightarrow O' (P)$
2.  $O' : P \rightarrow O' (F)$

### 3 Modeleur - Simulateur d'objets physiques

Nous parlerons maintenant du coeur de la machine de modélisation, c'est à dire de la partie "calcul".

Quelles peuvent être les bases d'un système qui permette de décrire et de simuler :

- \* une large variété d'objets
- \* de manière à produire des objets réels simulés analogues à des objets naturels.

Les deux contraintes :

- \* l'une de modularité conceptuelle : un objet se définit par combinaison d'objets,
  - \* l'autre de modularité algorithmique: la simulation d'un objet s'obtient par simulation d'une combinaison d'objets
- sont des critères déterminants pour le choix des composants de base du modeleur - simulateur.

#### 3.1. Type de modèles

Nous avons dégagé 3 types de modèles [Cad 79, Cad-Flo 79, Luc 81]

Type 1 : Le modèle réparti continu.

Il décrit l'objet sous la forme d'un système d'équations aux dérivées partielles ou d'équations différentielles ordinaires d'ordre 2 sur le temps.

C'est le modèle analytique de la physique classique. Au dessus d'une certaine complexité de ce système d'équations, il n'est plus opératoire. Alors, les solutions se cherchent par catégories de

phénomènes ou pour des objets spécifiques (systèmes vibrants, articulés, barres, coques...).

**Type 2 :** Le modèle à constantes localisées continu

On élabore au préalable une discrétisation structurelle de l'objet: celui-ci est décomposé en composants, chaque composant étant décrit comme précédemment. Dans ce cas, une méthode d'assemblage (ou une catégorie de méthodes) est implicitement contenu dans la formulation.

La physique, l'électronique, l'automatique ont recours à ce type de modèles lorsque les objets à étudier sont trop complexes ou peu connus pour être approchés par la première méthode.

En effet, par le principe de la localisation des constantes, on introduit la notion de "composant", donc d'assemblage. Ce type de modèle permet la création d'objets, en agencant des composants, chacun d'eux ayant une description fonctionnelle. Nous interprétons cette méthode comme un langage de création d'objets.

**Type 3 :** Le modèle à constantes localisées discret

On élabore une discrétisation structurelle de l'objet et pour chaque composant donne une formulation directement numérique de son comportement. Dans ce cas, le modèle contient déjà implicitement une méthode ou une catégorie de méthodes de calcul numérique.

C'est simultanément un langage de description et un langage de simulation d'objet.

Nous posons donc le principe de modélisation à constantes localisées discrétisé comme principe de base d'un langage de description et de simulation d'objets physiques.

### 3.2 Modularités conceptuelle et algorithmique

Soit deux objets physiques O1 et O2 de même nature, par exemple 2 masses ponctuelles. Le bloc fonctionnel qui les représente reçoit en entrée par exemple des variables du type forces et en sortie des variables de type positions.

Pour représenter un troisième objet constitué de O1 et O2 mécaniquement liés, par contact par exemple, on peut (figure 5) :

**cas 1 :** définir un objet O3 résultant du couplage. On perd alors dans O3 la structure des objets

primitifs. Cette manière n'est évidemment pas modulaire.

**cas 2 :** dissymétriser les objets O1 et O2; C'est à dire décrire dans l'un des deux la faculté de couplage à l'autre. Alors, si l'un admet en entrée des forces et en sortie des positions, nous aurons la configuration inverse sur l'autre. Reste la question de comment et quand opérer cette dissymétrie.

**cas 3 :** définir un bloc fonctionnel de couplage, qui mécaniquement sera le dual des blocs à coupler. Dans l'exemple ci-dessus, ce bloc prendra comme entrée des positions et comme sortie des forces. Par cette méthode, on garantit à la fois l'identité des objets de départ et la symétrie du couplage. C'est elle qui assure au mieux le critère de modularité. Elle est compatible avec une encapsulation des objets (cas 1). C'est la méthode que nous préconisons [Cad 81, Luc 85].

⊕ couplage mécanique

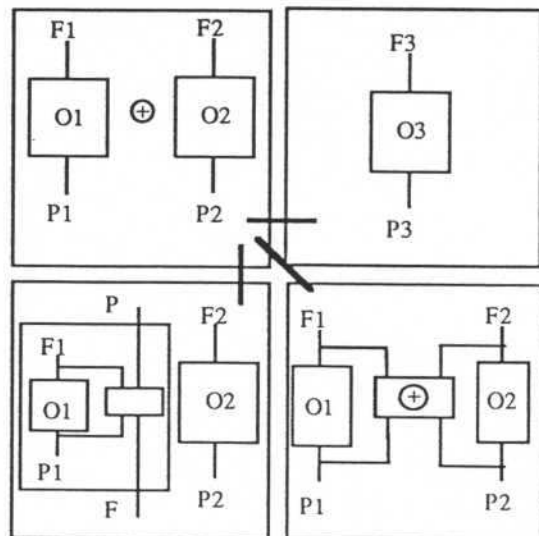


figure 5 - Modularité

D'une manière plus générale, un objet se construira par un agencement de ces 2 types de blocs que l'on nomme respectivement "composant de type M" - M comme masse - et "composant de type L" - L comme liaison .

Cette méthode se généralise en ressymétrisant l'assemblage par encapsulation des blocs de liaison dans chaque objet. Celui-ci se présentera alors,

vu de l'extérieur, comme un bloc disposant de "points de liaisons", ces points de liaisons pouvant être eux - mêmes de chacun des 2 types. On parlera de points de liaison de type M (M comme masse) - lorsqu'il y a une force entrante et une position sortante - et de points de liaison de type L (L comme liaison) - lorsque la position est entrante et la force sortante.

Décrire un couplage revient donc à associer les points de liaisons par couples duaux selon les règles suivantes :

- \* sur un point de type M peuvent se connecter plusieurs points de type L
- \* sur un point de type L ne peut se connecter qu'un point de type M.

L'existence de 2 blocs fonctionnels duaux primitifs pour la description et la simulation d'objets physiques semble être la condition de la modularité du système. Duaux en ce sens, qu'ils traitent chacun une des transductions entre les 2 variables duales : des forces en positions et des positions en forces.

Ce type de modularité est d'autant plus nécessaire que des objets nouveaux, obtenus par couplage mécanique d'objets primitifs peuvent se créer dynamiquement. Elle permet de décrire ces couplages sans "recompilation" de la scène ou "précompilation" de toutes les configurations possibles de la scène.

La modification dynamique des couplages s'effectue par modification dynamique des points de liaisons.

Il est alors commode, d'une part de prévoir en statique toutes les connexions possibles qui peuvent être amenées à se réaliser en situation dynamique - Cela reste toutefois plus simple que de prévoir la structure mécanique de tous les objets susceptibles de se former dynamiquement par couplage - d'autre part, d'affecter à ces connexions des paramètres dont les valeurs sont définies dynamiquement - la modification des connexions se ramène alors à une modification de paramètres, plutôt que de programmes.

### 2.3. Choix des composants

La physique conventionnelle distingue entre "matière", "matériau", et "liaison".

1. Le comportement de la matière est décrit par l'équation fondamentale de la dynamique dont la forme de base est :

$$- \vec{F} = M \cdot \vec{G} \text{ pour un point matériel}$$

$$- \vec{F} = \int dm \cdot \vec{G}$$

$$M = \int dm \cdot OM \cdot \vec{G} \text{ pour un solide rigide}$$

Elles régissent la question de la quantité du mouvement.

2. Le comportement du matériau est décrit par des lois non générales. Elles règlent la question de la qualité de mouvement. Ainsi, une tige de bois ne se comporte pas comme une tige de caoutchouc et l'eau ne coule pas comme l'huile.

Les comportements les plus usuels sont représentables par les lois rhéologiques de base "élasticité" et "viscosité". A celles-ci s'en ajoutent d'autre, en liste non limitative, et résultant d'observations empiriques, telles que la plasticité, le comportement à la rupture ... La physique du matériau se présente donc comme une librairie de lois de comportement.

3. Il n'existe pas réellement de dynamique des liaisons. Une liaison est usuellement une relation entre 2 objets qui peut se décrire géométriquement - liaison plan-plan, point - surface, objet rigide...

Compte tenu des critères de modularité imposés, nous optons pour la classification suivante, que nous développons dans la suite du texte :

- \* modélisation de la matière, par les lois fondamentales de la dynamique du point
- \* modélisation des comportements continus du matériau
- \* modélisation de la structure du matériau ou des objets.

Les 2 premières catégories contiennent des choix compatibles avec l'approche par blocs fonctionnels duaux. C'est dans le dernier point que ce formalisme s'exprime tant pour la description des couplages permanents que des couplages dynamiques.

#### 3.3.1. Matière

Nous avons le choix entre la physique du point et la physique du solide. La physique du solide est une formulation plus compacte que la physique du point, la compacité étant l'expression de la corrélation géométrique stable entre différents points du solide. Le comportement d'un solide est représentable par la physique du point, avec des

équations individuellement plus simples et en tout cas plus adaptées aux calculs d'interaction. Dans un contexte informatique, la formulation "point", formellement moins compacte nous semble cependant plus opératoire.

En conséquence, la matière est discrétisée en masses ponctuelles. L'élément de matière minimal est une masse ponctuelle représentée par un composant "masse" de paramètre M, à 3 degrés de liberté. Trois forces peuvent lui être appliquées, et il fournit en réponse trois positions par l'équation  $\vec{F} = M \vec{G}$ . Mis sous une forme aux différences finies, le calcul se vectorise aisément.

### 3.3.2. Comportements continus du matériau

Nous ne retenons ici comme suffisants que les 2 comportements rhéologiques de base : élasticité et viscosité, qui se caractérisent par des fonctions bijectives Forces = fonct(Position)

$$\text{Forces} = \text{fonct}(\text{Vitesse}).$$

Ces fonctions peuvent être non linéaires. Leur version de base est la fonction linéaire, respectivement de paramètre K (raideur) et Z (viscosité) (figure 6).

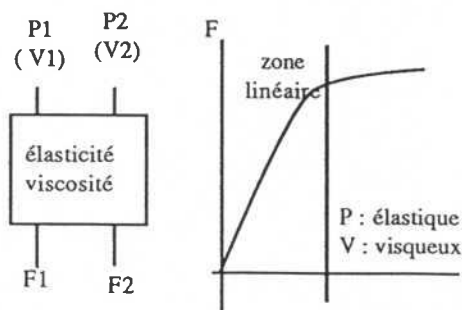


figure 6 - Elasticité et viscosité

Les composants de base, représentés par le "ressort" et l'"amortisseur", s'expriment sous forme de quadripôles  $\{(F1,F2), (P1,P2)\}$ .

Le comportement plastique, souvent présenté comme une fonction rhéologique de base, fait apparaître une hystérésis. Il n'est pas considéré par nous comme composant de base car il peut s'exprimer par combinaison de composants. Nous l'examinerons plus loin.

### 3.3.3. Structure des matériaux, des objets et des scènes

Les composants ci-dessus, composants de matière ou de comportement rhéologique de base, peuvent indifféremment être des composants de type M ou de type L.

Nous prenons comme convention :

- \* le point matériel est un composant de type M - M comme masse - ; il prend en entrée une force et produit en sortie une position. La sommation des forces s'effectue dans ce composant.
- \* le ressort et le frein sans masse sont des composants de type L - L comme liaison - . Ils acceptent en entrée des positions, et produisent des forces.
- \* ce sont dans les composants de type L que se déterminent les connexions pour les couplages mécaniques permanents ou temporaires.

Les composants de type L sont alors dotés de 2 fonctions logiques,

- \* l'une est celle de "relier" entre eux les composants de masse (figure 7)
- \* l'autre est celle d'effectuer cette liaison selon une logique de transition d'états, de manière à modifier les paramètres physiques du matériau en fonction de conditions portant soit sur ces paramètres, soit sur les variables physiques, forces ou positions (figure 8).

Par la première fonction, nous décrivons la matière ou un objet comme un réseau de composants interconnectés.

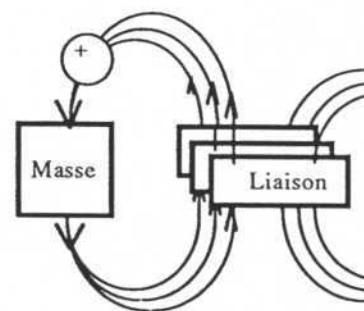


figure 7 - structure du matériau

Par la deuxième fonction, nous pouvons modifier dynamiquement la forme de ce réseau.



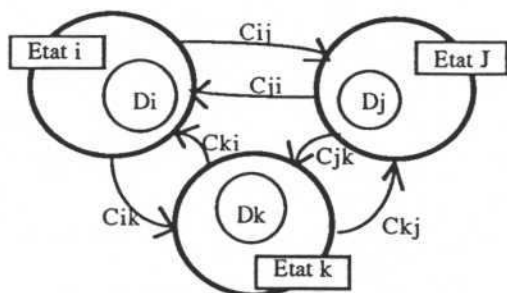


figure 8 - Modification de structure

Nous disposons là d'une formalisation générale des différentes catégories d'interaction, qu'il s'agisse au niveau microscopique de la matière ou macroscopique d'un objet ou d'une scène :

- \* d'interactions permanentes - définition de la cohésion d'un objet ou d'une matière
- \* ou temporaires : plasticité, rupture, saisie, collages, chocs ..

### 3.3.4. Calculabilité - hypothèse de causalité

La convention ci dessus d'orientation des blocs, comme aucune autre de cette catégorie, ne suffit pas à rendre tout assemblage calculable. En effet, il existe nécessairement une séquentialité d'exécution entre les blocs de type M et les blocs de type L. Un objet ou tout ensemble d'objets couplés se présentent dans ce formalisme comme un système à 2 phases (figure 9) :

- \* lors d'une phase, toutes les forces produisent toutes les positions. En effet, les blocs de type M sont tous indépendants entre eux.
- \* dans la phase suivante, il y a transmission et transformation inverse des variables : toutes les forces appliquées en entrée des composants M sont calculées à partir de toutes les positions précédemment calculées.

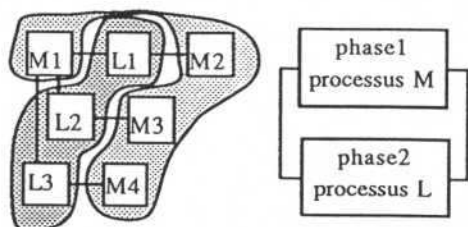


Figure 9 - Sequencement des calculs

Cette hypothèse supplémentaire dite "hypothèse de causalité", qui précise que les positions à l'instant n sont produites par les forces considérées à l'instant n-1, rend calculable toute combinaison d'objets décrite par blocs fonctionnels duaux.

On peut évaluer la signification physique de cette hypothèse de causalité. Elle introduit, dans le système physique représenté par l'assemblage des blocs interconnectés, une constante de temps additionnelle due au calcul et aux transferts des variables, qui est par principe, au minimum, la durée d'un pas de calcul.

## 4. Simulation

### 4.1. Optimisation du calcul des liaisons - Billes et Agglomérats

Le formalisme ci-dessus est très général et a été utilisé pour des simulations variées où intervenaient :

- \* des objets pouvant être très hétérogènes
- \* des interactions assez complexes, en particulier des interactions où les discontinuités pouvaient porter sur n'importe laquelle des variables d'état, voire plusieurs simultanément. C'est le cas par exemple du frottement d'archet [Cad 81, Flo 86]
- \* ou bien où de nombreux états pouvaient s'enchaîner. Par exemple, un accrochage suivi d'un collage.

Il est des cas, nombreux et plus simples, sur lesquels peuvent s'appliquer 2 grands types d'optimisation :

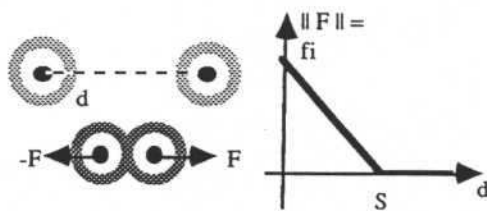
- \* lorsque les matériaux sont homogènes
- \* lorsque les fonctions d'interactions sont continues ou discontinues d'une seule variable.

#### 4.1.1. Optimisation des liaisons conditionnelles - la "Bille"

Lorsque les modifications dynamiques de structure des scènes et des objets se décrivent par des états successifs selon une condition portant sur une seule variable, le bloc d'interaction peut être approché par une fonction linéaire par morceaux. Le cas le plus simple est celui de la représentation de la non pénétrabilité d'un objet, cas servant de base à la description des collisions, saisies, collages, pincements, ... pour lesquels la

condition de couplage porte sur les positions relatives des objets [Jim 89].

On peut alors définir, par association d'une masse ponctuelle et d'une fonction élastique par 2 morceaux, un élément appelé "BILLE", qui est physiquement impénétrable (figure 10). Lorsque 2 billes entrent en contact, elles se repoussent élastiquement. Si l'on oblige ces 2 billes à rester en contact, leur couplage est un couplage élastique. On peut de même définir une bille à couplage élasto-visqueux.



Loi d'interaction :

$$\begin{aligned} d > \text{Seuil} & \quad F = 0 \\ d < \text{Seuil} & \quad F = k \cdot d \end{aligned}$$

Figure 10 - Bille

Une fonction continue définie par morceau peut se mettre sous forme algébrique. On évite ainsi les tests conditionnels.

Selon le principe des blocs fonctionnels ci-dessus qui n'est pas dérogé ici, les blocs "liaison" peuvent se mettre en parallèle pour réaliser une fonction d'interaction complexe. Peu de morceaux suffisent alors pour chaque fonction d'interaction élémentaire.

Ainsi, a fonction d'interaction moléculaire type "Van der Waals", qu'il nous a semblé opportun d'introduire explicitement compte tenu de ces nombreux usages, s'approxime par une fonction continue de 3 morceaux.

Exemple : l'interaction intermoléculaire

La physique générale propose un modèle d'énergie potentielle - Lennard-Jones ou Van der Waals - pour définir une famille de potentiel de la forme :  $V_n = (S/d)^{2n} - 2 * (S/d)^n$  où le seuil S représente la zone de minimum de potentiel.

La famille de force issue de ces potentiels s'écrit :

$$F_n = - \text{grad } V_n$$

Ce qui donne :

$$F_n = (2n)/S^2 * ((S/d)^{2n+2} - (S/d)^{n+2}) * D_p$$

$D_p = (dx, dy, dz)$  'vecteur distance' de norme d c'est à dire  $F_n = F_i(d) * D_p$

Où les fonctions  $F_i$  sont de la forme (figure 11):

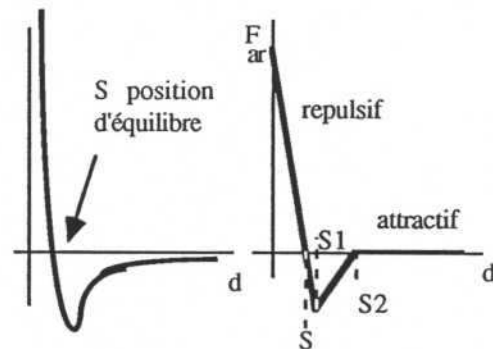


figure 11 - Liaison de Van der Waals

La fonction  $F_{ar}$  est une approximation linéaire de  $F_i$  qui, de même que toute approximation linéaire, peut s'exprimer sous forme d'une somme de valeurs absolues de terme linéaires :

$$F_{ar}(d) = ((S_2 - S) * |d - S_1| + (S - S_1) * |d - S_2|) / (2 * S * (S_2 - S_1)) - d / (2 * S) + 1 / 2$$

#### 4.1.2 Matériaux homogènes "Agglomérats"

Dans un matériau homogène, tout sous-ensemble du matériau a le même comportement que l'ensemble. Dans une discrétisation ponctuelle de la matière, les interactions entre chaque particule sont donc identiques.

On constitue un bloc de matière homogène par assemblage de "billes". C'est un agglomérat.

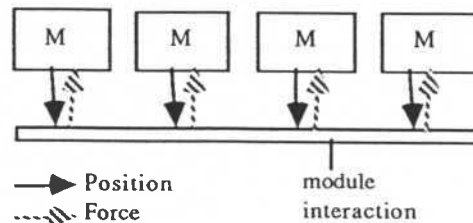


Figure 12 - Agglomérat

Un agglomérat se caractérise par un ensemble de billes dotées d'une seule fonction d'interaction.

Un "module de liaison  $N(N-1)/2$ " calcule les interactions mutuelles entre les masses (fig. 12).

La topologie de l'agglomérat n'est pas prédéterminée statiquement. Les arrangements se font d'eux mêmes, chaque bille est équivalente à toute autre et peut se coupler à n'importe quelle autre.

Cela a comme conséquence que la forme à chaque instant de l'agglomérat, y compris dans ses états stables, n'est pas prédéfinie mais est le résultat du processus dynamique. C'est ainsi que l'on obtient aisément des phénomènes de plasticité sur un agglomérat constitué par une loi de Van der Waals (voir exemples).

Nous avons donné en exemple la loi d'interaction intermoléculaire. D'autres types de lois sont représentables et parmi celles-ci les lois élémentaires usuelles décrites précédemment "ressort", "amortisseurs" ou "patins", gravitation. Ils permettent de créer par combinaison toutes sortes d'"empilements".

#### 4.1.3 Matériaux inhomogènes de structure faible - Objets malléables

A nouveau, 2 agglomérats différents - c'est à dire représentant des matériaux différents - peuvent être couplés par un ensemble de fonctions d'interaction.

De même qu'un agglomérat est un ensemble de billes en interaction, un objet ou une scène peut se décrire par un ensemble d'agglomérats en interaction.

agglomérats ::= [(Nbilles), 1 interaction]  
objet ::= [(N agglomérats), P interaction]  
scène ::= [(N objets), Q d'interaction]

Un "module de liaison  $N \times M$ ", qui correspond à une loi d'interaction entre les  $N \times M$  couples de masses des deux agglomérats, calcule les interactions entre les agglomérats.

La structure suivante nous semble être un guide opératoire pour la modélisation des solides malléables par "billage et agglomération".

Un objet peut se structurer en 3 couches, non nécessairement toutes présentes (Figure 13) :

\* une couche profonde ou "noyau" : qui représente une fonction de centrage autour de laquelle l'objet s'organise. Le noyau est indéformable ou très peu déformable.

\* un derme : qui portera les qualités de déformabilités les plus importantes. Son épaisseur représentera assez directement la profondeur et la nature de la déformation.

\* un épiderme, une "peau", qui aura pour rôle de renforcer la cohésion de l'agglomérat et où se localisera plutôt une notion de "tension superficielle".

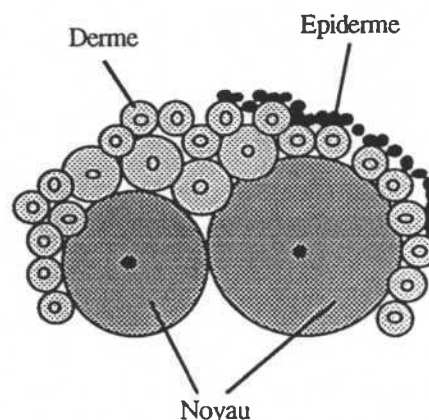


Figure 13 - Objet malléable

Chaque couche se caractérise par une fonction spécifique d'interaction entre ses constituants, complémentairement aux couches avoisinantes.

L'objet est en interaction avec l'extérieur de manière plus ou moins profonde selon les couches impliquées. Cette organisation sert à réduire les interactions entre les constituants de l'objet et son environnement.

#### 4.1.4. Hybridation entre objets très structurés et matériaux de structure faible

Les objets de topologie bien définie sont représentables par un réseau prédéterminé de blocs fonctionnels ci-dessus. Les objets qui sont davantage un matériau qu'une structure se représentent bien par combinaison d'agglomérats. L'unicité du formalisme de base permet de construire des objets dont certaines parties sont très structurées et d'autres moins.

## 4.2 Principaux algorithmes et exemples de simulation

### 4.2.1 Interactions temporaires

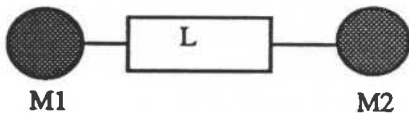
Une collision est un cas particulier de liaison temporaire.

La figure 14 décrit la modélisation d'une collision élasto-visqueuse avec conditions sur les positions soit selon le formalisme explicite des liaisons conditionnelles soit avec le formalisme intégré de la "bille".

La saisie se modélise comme la collision sans retour à l'état initial

Le pincement se modélise comme une collision à 2 seuils.

Le collage est une variété de saisie.



L : ETAT1 := ( K=0, Z=0, D=?, V=?)  
 ETAT2 := (K=Kc, Z=Zc, D=Dc, V=Vc)  
 Condition ( D, S1, S2)

Collision

ETAT1 :  $D < S1$  , -> ETAT2

ETAT2 :  $D > S1$  , -> ETAT1

Saisie

ETAT1 :  $D < S1$  , -> ETAT2

Pincement

ETAT1 :  $S2 < D < S1$  , -> ETAT2

ETAT2 :  $D > S1$  ou  $D < S2$  , -> ETAT1

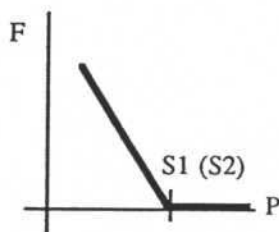
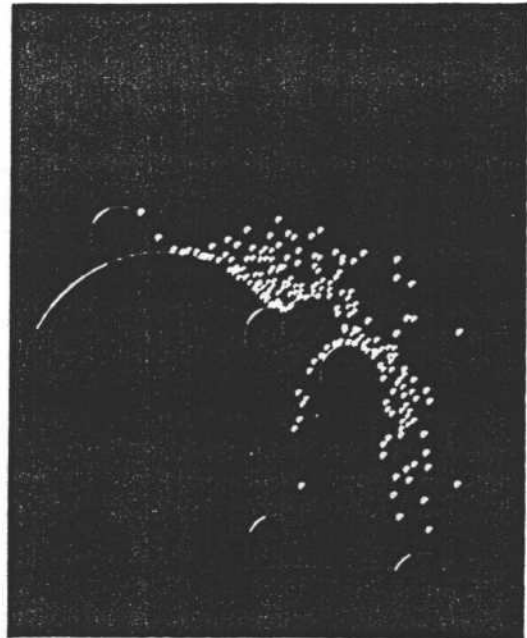


Figure 14 Collision - saisie - pincement

Exemple : Multitude de particules en interaction  
 Un très grand nombre d'objets physiques élémentaires interagissent entre eux et avec des

éléments fixes par des liaisons conditionnelles élasto-visqueuses. On retrouve les turbulences, les tourbillons, la constitution d'amas structurés. (Chronogramme 1 et photographie 1)



Photographie 1 - Cascades

### 4.2.2. Un objet malléable élémentaire

Par agglomération, nous avons constitué un objet sphérique stable et légèrement déformable, structuré en deux couches : un noyau, composé d'une seule bille et un derme, constitué d'un ensemble de billes plus petites répulsives entre elles. La liaison noyau/derme est de type intermoléculaire. Lorsque l'objet rencontre une paroi, il s'écrase légèrement. Lorsque l'objet se sépare de la paroi, il reprend sa forme initiale.

Le chronogramme 2 nous montre cet objet qui se déchire lorsqu'il heurte le sol et puis se recolle. Le chronogramme 3 nous montre un objet du même type qui a une plus grande profondeur de déformation. Le noyau a été réduit et le derme épaissi. Il dévale l'escalier, se moulant sur les marches, en roulant sans glisser (photographie).

### 4.2.3 Objet plastique

La photographie 5 montre un morceau de plastiline modelé par l'opérateur en temps réel à

l'aide d'un transducteur gestuel nommé le "Dés-2D" [Lis 88].

Le modèle de cet objet plastique est obtenu avec un agglomérat composé d'une trentaine de masses liées entre elles par une fonction d'interaction intermoléculaire. La zone attractive est choisi comme étant inférieure à deux fois le rayon d'une bille. L'opérateur peut briser ou recoller l'objet, ce dernier conserve la forme qui lui est imposée par manipulation.

#### 4.2.4. Autres Exemples de simulation

Les photographies et chronogrammes montrent d'autres exemples réalisés :

- \* différents exemples de déformations - rigidités
- \* des scènes construites.

## 5 Conclusion

1. Cette formulation générale des interactions nous montre la grande proximité qu'il y a entre des collisions, des plasticités ou des frottements à relaxation type "effet colophon", ou plus simplement des actions de saisie, de décrochement, de scission ou de décollage. Par ailleurs, elle traite tous les cas de liaisons, permanentes ou non, entre les différents

2. La formulation "point" se prête davantage à l'expression et aux calculs des interactions, microscopiques où macroscopiques, que la physique du solide [Ter 88, Hah 88].

Pour la modélisation de l'inertie, les 2 formulations sont équivalentes.

Pour la modélisation du matériau, la formulation "point" qui ne fait pas intervenir de notions de calcul infinitésimal est plus agréable.

Pour la modélisation des interactions, dans la formulation "point", chaque objet mobile modélisé par un ensemble de points donne lieu à  $P * Q$  interactions à forces centrales univariées.

3. Ce type de décomposition de l'espace physique: adaptative, ponctuelle, isotrope offre un gain considérable en calcul.

## VI. Bibliographie

[Cad 81] C. CADOZ, J.L. FLORENS, A. LUCIANI - Synthèse musicale par simulation de mécanismes instrumentaux. Transducteurs gestuels retroactifs - Rev. d'Acoust. N° 59 - 1981

Luc 81] A. LUCIANI - Anima, un outil de création d'images animées par modèles physiques - DEA Electronique - Grenoble - 1981

[Luc 84] A. LUCIANI - "Modélisation et animation gestuelle d'objets : le système Anima" - 1er colloque Image Cesta - France - 1984

[Luc 85] A. LUCIANI - Un outil informatique d'images animées - modèle d'objets, langage, contrôle gestuel en temps réel - Thèse INP Grenoble - 1985

[Lis 88] L. LISOWSKI, C. CADOZ, J.L. FLORENS - Clavier rétroactif modulaire et actionneur modulaire plat - Brevet d'invention français N°88 14064 - 1988

[[Ter 87] D. TERZOPOULOS and C° Elastically Deformable Models - Proc. SIGGRAPH 1987

[Ter 88] D. TERZOPOULOS, K. FLEISCHER - Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture" - Proc. SIGGRAPH 1988

[Am 88] B. ARNALDI - Conception d'un noyau d'un système d'animation tri-dimensionnelles intégrant les lois de la mécanique - PhD Thesis - Rennes I - Juillet 1988

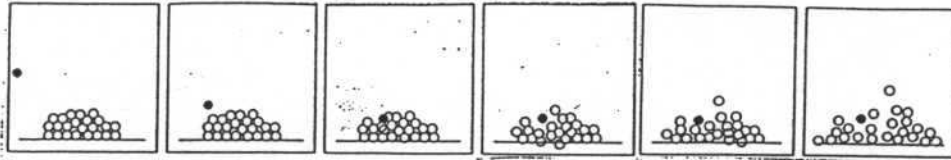
[Dum 89] G. DUMONT, B. ARNALDI, G. HEGRON - Mechanics of solids for computer animation - Proc. Pixim 89 - Paris - France

[Jim 89] S. JIMENEZ - Modelisation et simulation d'objets volumiques déformables complexes - DEA Informatique - INPGrenoble - 1989

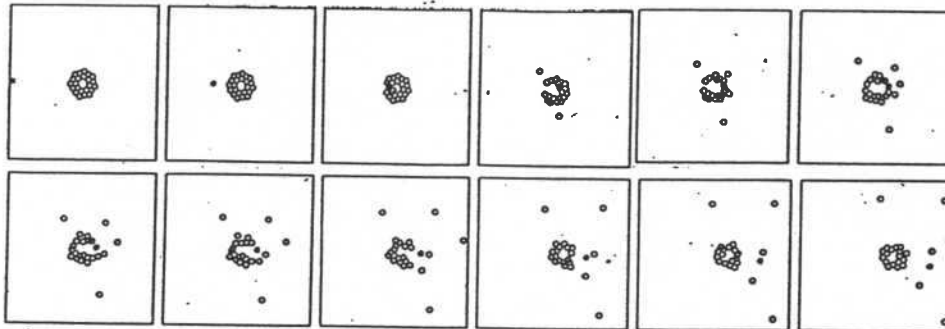
[Gas 89] M.P. GASCUEL - OSEA\* : Un nouveau modèle de matière pour traiter les collisions entre objets déformables - PIXIM 89

[Gas 89] M.P. GASCUEL, A. VERROUST - Animation à l'aide de la dynamique - Etat de l'art - Rapport LIENS - ENS - PARIS - Mai 89

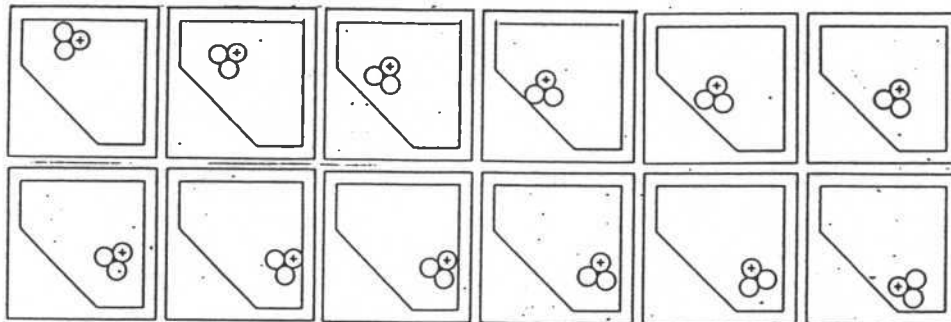
## VII CHRONOGRAMMES



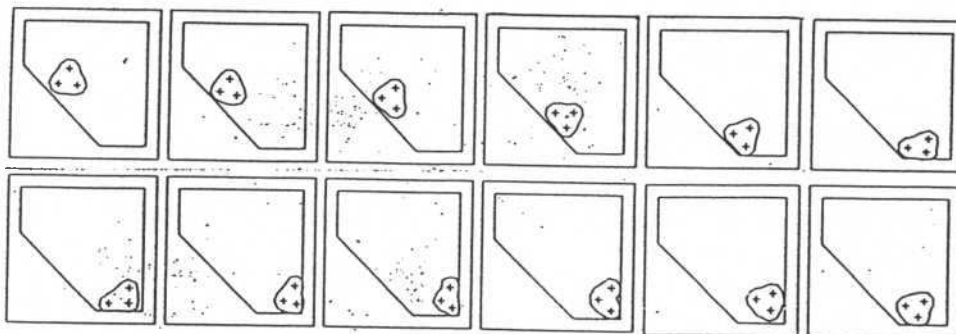
chronogram 1 : éclatement d'un tas de billes



chronogram 2 : Séparation puis regroupement



chronogram 3 : Un solide élémentaire



chronogram 4 : Peau matérielle

VIII PHOTOGRAPHIES 1 - 8

