



**HAL**  
open science

**Modèle physique et espaces de représentations.  
Application à quelques phénomènes collectifs en  
environnement construit**

Annie Luciani, Nicolas Tixier

► **To cite this version:**

Annie Luciani, Nicolas Tixier. Modèle physique et espaces de représentations. Application à quelques phénomènes collectifs en environnement construit. Dire, écrire et figurer l'espace, 1998, Tours, France. pp.19. hal-00910596

**HAL Id: hal-00910596**

**<https://hal.science/hal-00910596v1>**

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.

## MODÈLE PHYSIQUE ET ESPACES DE REPRÉSENTATIONS

Application à quelques phénomènes collectifs en environnement construit

Annie LUCIANI<sup>1</sup> – Nicolas TIXIER<sup>2</sup>

Colloque « Dire, écrire et figurer l'espace »

4, 5 décembre 1998 – Tours

*Cette intervention s'appuie sur une recherche en cours : effets sensibles en milieu urbain - Analyse in situ et expérimentation virtuelle. Elle met en collaboration trois laboratoires : le Cresson (Jean-Paul Thibaud, Nicolas Tixier), l'Acroe (Annie Luciani) et l'Irec (Pascal Amphoux).*

### A. UTILISATION D'UNE CONCEPTION ORIGINALE DU MODÈLE PHYSIQUE COMME OUTIL DE RE-CONSTRUCTION D'EFFETS

#### 1. Le processus de modélisation

Lorsque l'on parle de modèle physique, on l'entend spontanément comme « une copie plus ou moins bonne de la nature ». Cette assertion est le résultat d'un certain nombre d'ellipses historiques, culturelles et scientifiques qu'il nous faut commencer à lever pour le sujet qui nous occupe : utiliser le modèle physique comme un outil de reconstruction d'effets sensibles et comme outil de validation de connaissances psychocognitives.

Trois ellipses sont en cause :

- la première porte sur le rôle de l'observation dans l'élaboration d'un modèle physique : qu'observe-t-on ?
- la deuxième porte sur le lieu de l'abstraction : que modélise-t-on ?
- la troisième porte sur le système de représentation, que l'on appellera la "formule" : comment formule-t-on ?

L'ensemble de ce processus, qui articule **observation - abstraction - formulation**, s'apprend en général implicitement, ou plutôt empiriquement, par contact avec les maîtres, et ainsi non concrètement explicité, il donne lieu à un ensemble de pièges.

<sup>1</sup> Annie Luciani est ingénieur de recherche du Ministère de la Culture et co-directrice de l'Acroe.

[Annie.Luciani@imag.fr](mailto:Annie.Luciani@imag.fr)

<sup>2</sup> Nicolas Tixier est architecte DPLG et actuellement en thèse au Cresson sous la direction de Jean-François Augoyard ; intitulé de la thèse : *Morphodynamique des ambiances construites*.

[Nicolas.Tixier@grenoble.archi.fr](mailto:Nicolas.Tixier@grenoble.archi.fr)

Ces pièges sont socio-professionnellement bien maîtrisés lors de la pratique du modèle physique dans sa communauté professionnelle native. Mais dès lors également que s'avère nécessaire l'élaboration de connaissances transdisciplinaires<sup>3</sup>, dès lors que la simulation par ordinateur s'en mêle<sup>4</sup>, un retour aux bases mêmes de la méthode s'avère constitutif.

**Le processus de formulation physicienne n'articule pas de manière simple l'observation, l'abstraction et la formulation.**

### 1.1. Qu'observe-t-on ?

L'observation n'est pas une activité neutre par rapport à l'abstraction et à la formulation. Le but de l'observation est de faire émerger de tout un ensemble d'observés ce que nous appellerons une (ou un ensemble de) « forme prototype ». Cette forme prototype est extraite de l'ensemble des observés durant l'observation humaine (directe ou non). Il ne faut pas confondre cette étape avec celle de mesurage. Souvent, cette forme prototype prend le nom du phénomène, voire même de l'objet matériel cause de ce phénomène.

Par exemple, un tas de sable pour un physicien n'est évidemment pas celui qui est dans le jardin. Un tas de sable sera un ensemble d'éléments (particules, grains, blocs...) qui présenteront les propriétés "abstraites" suivantes :

- écoulement,
- forme empilée en triangle isocèle d'angle  $\Delta$ ,
- croissance pseudo-régulière de l'empilement triangulaire par avalanches de surface (l'angle du tas augmente jusqu'à une certaine valeur  $\Delta_1$ , l'avalanche se produit jusqu'à ce que l'on obtienne à nouveau l'angle  $\Delta$  à la base.
- croissance catastrophique du tas par effondrements internes : les contraintes à l'intérieur d'un tas de sable sont hétérogènes (contrairement à un fluide), ce qui conduit à l'apparition de sorte de sous-tas ; lorsque ces sous-tas sont de formes similaires au tas principal, un effondrement se produit.

Dans cet énoncé, ce qui est décrit est bien une abstraction d'un ensemble d'observés conduisant à la fabrication d'un prototype. Là encore une précaution s'impose : on entend usuellement par abstraction « la formule mathématique ». Il ne

---

<sup>3</sup> De plus, il est fondamental aujourd'hui de faire le lien entre des formulations psycho-cognitives et des formulations numériques ou mathématiques, les unes cherchant à avoir accès à l'humain, les autres cherchant à maîtriser la nature et le construit matériel.

<sup>4</sup> En effet, la simulation permet une reproduction sensible du phénomène sensible à partir d'une formulation numérique. La simulation diffère fondamentalement des méthodes formelles pures (« la formule mathématique ») car elle reconstruit le phénomène pas à pas et le re-donne à percevoir dans la totalité de son expression sensible : la formule de la turbulence fluide encapsule le phénomène dans une expression littérale non-sensible alors que la simulation le reproduit "réellement pour nos sens". A partir des observations sensible et objective de phénomènes sonores et visuels, on peut alors chercher à reconstruire, par un processus d'abstraction, leurs traits pertinents supposés et par là même à apporter la preuve de cette pertinence.

s'agit pas de cela ici. Il s'agit de l'abstraction conduisant à une forme pertinente représentative de l'ensemble des observés.

Dans l'énoncé ci-dessus, on remarque également un certain nombre de caractéristiques très précises (soulignées) inaccessibles à ce degré de précision par l'observation ni même la mesure.

Usuellement, lorsque l'on parle de modèle et plus particulièrement de modèle physique, on insiste sur l'approximation nécessairement portée par l'activité de modélisation et le phénomène réel modélisé. Ce sur quoi nous voulons insister ici est non pas sur cette imperfection du modèle mais précisément sur sa pertinence, c'est-à-dire sur le fait qu'il s'agit bien d'un modèle, d'un prototype, puissamment représentatif.

C'est cette pertinence, ou la force de cette représentation, qui permet d'identifier, (et même de confondre) le triangle isocèle au tas de sable, la figure extraite et abstraite, au(x) phénomène(s) observé(s), voire même à l'objet matériel qui le reproduit. C'est ce qui permet de dire que tous les phénomènes observés de type tas de sable sont du type énoncé ci-dessus. C'est donc une opération de catégorisation. La première étape d'un processus de modélisation est devenue celle de l'abstraction catégorisante.

*-> Nous pouvons faire apparaître ici qu'il n'y a pas une distance aussi grande que l'on veut bien le laisser entendre entre une catégorisation psycho-perceptuo-cognitive et ce type de catégorisation physique. Leur proximité est même évidente si l'on n'oublie pas que cet énoncé (sur le tas de sable par exemple) n'est pas productible par une machine. Il est le fondement même de l'abstraction par analogie.*

## 1.2. Que modélise-t-on ?

Une fois la première étape franchie - et nous apporterons la preuve ici qu'elle n'est pas transgressable -, ce qui sera l'objet de la modélisation est cette "forme prototype". Là encore une confusion est à lever : la modélisation n'est pas la modélisation de l'objet réel mais de la "forme prototype" ou du "phénomène prototype", résultat de la première étape d'abstraction.

Ainsi dans le cas du tas de sable, la modélisation visera à décrire, non le tas de sable réel, mais le triangle isocèle conséquence de l'empilement, comme représentation pertinente de ce que l'on cherche.

Apparaissent ici trois intérêts majeurs de la phase de catégorisation précédente :

- le premier tient au fait que la catégorie obtenue est générique. Ses propriétés sont les propriétés communes à tous les phénomènes observés de ce type. Elle permet en fait de désigner un type générique de phénomène qui prendra le nom « tas de sable » ou bien « turbulence fluide »...
- le second est qu'il est « purifié », en quelque sorte -au sens où l'on purifie un matériau. Il n'est conservé volontairement dans la forme prototype que cela même qui est commun et pertinent. Il n'est conservé aucun trait particulier.

C'est en ce sens qu'elle est une réduction, non au sens de l'approximation mais de l'essence.

- le troisième est que, du fait qu'elle est déjà « plus pure et plus précise que nature » mais non moins significative, cette forme se prêtera plus aisément à la formulation mathématique nécessaire à sa manipulation.

### 1.3. Comment formule-t-on ?

Après ce qui précède, on peut dire que modéliser, c'est décrire la "forme prototype" à l'aide d'un système de représentation.

#### Modèles phénoménologiques / modèles causaux

La première question est : que représente-t-on : la forme prototype ou un procédé permettant de la générer ?

Là deux modalités de représentation se présentent :

- la représentation de la forme ou du phénomène prototype lui même, on parlera de modèles descriptifs ou phénoménologiques ou de surface,
- ou bien la représentation d'une cause potentielle susceptible de produire la forme ou le phénomène prototype.

Dans la représentation de la forme ou du phénomène prototype lui même, on parle de modèles descriptifs ou de modèles de surface :

Exemple : les modèles de type « signal » (signal sonore par exemple), les modèles géométriques qui décrivent la forme spatiale des choses, les modèles cinématiques qui décrivent la forme dynamique d'un événement, les diagnostics de surface (ex : « à l'apparition des ces irritations, appliquer cette crème »).

Dans la représentation d'une cause potentielle susceptible de produire la forme ou le phénomène prototype, on peut parler de modèles générateurs, ou de modèles causaux, ou de modèles profonds (en opposition aux modèles de surface) :

Exemple : les modèles physiques, les modèles de morphogenèse, les modèles morphodynamiques ...

Il faut bien voir qu'une même forme ou un même phénomène prototype peut donner lieu à des modèles de nature différente. Ainsi par exemple, la forme prototype spirale de certains coquillages peut se décrire par des modèles descriptifs géométriques (spirale logarithmique), ou par un modèle générateur physico-chimique de sédimentation.

#### Le système de représentation formel

La deuxième question est : quel est le système de représentation formel choisi ?

Un système de représentation formel se définit par un vocabulaire et une syntaxe. Ainsi par exemple la géométrie applique des règles telles que « à telle distance, poser sur ... » pour des articles qui sont des points, des droites, des plans ...

La logique applique des règles telles « s'implique, est équivalent à, si, donc, alors... » sur des articles qui sont des assertions (ex : il pleut).

**La physique est à la fois un système formel de représentation et un ensemble de connaissances décrites dans ce système :**

Plus précisément, deux ambiguïtés sont là encore à lever :

- lorsque l'on dit « physique », on confond ce qui est à modéliser (ou à connaître) en l'occurrence « la nature » (« l'étant donné ») avec une façon de faire qui est précisément « la physique », avec son corpus de connaissances expérimentales, formelles et de méthodes. Autrement dit, on confond le représentant et le représenté.

-> Cela a pour inconvénient notable de restreindre les connaissances, les savoir-faire et les manipulations de la physique au seul champ de la description des phénomènes naturels. Or les notions d'énergie, de champ, de force, de moindre action,... sont des abstractions puissantes aux manipulations également puissantes.

- une deuxième ambiguïté vient de la confusion entre l'observé d'une part et la forme prototype extraite (on pourrait ici parler de concept).

Ainsi par exemple, lorsque l'on parle de la loi fondamentale de la dynamique

Force = masse \* accélération, on confond deux niveaux :

- le premier niveau est celui du système de représentation basé sur la notion de force et de vitesse (en tant qu'élément du vocabulaire) et le principe d'action-réaction (en tant que règle)
- le deuxième niveau est celui qui rend compte du phénomène physique de l'inertie.

Pour expliciter cette question, il faut nous rappeler à chaque instant que les notions de force et de principe d'action-réaction décrivent un formalisme : le principe d'action-réaction est un principe. Il est identique à celui de la superposition des états. La notion de force est un descripteur formel représentant la corrélation observée entre deux phénomènes ou partie de phénomènes. Plus généralement, le système de représentation formel (ou mathématique) newtonien est basé sur la définition de variables dites duales et des règles contraintes entre ces variables. Ce formalisme mathématique s'est révélé commode pour décrire des observés naturels. On peut d'ailleurs remarquer que le formalisme hamiltonien, deuxième formalisme répandu de la physique, basé sur le principe de moindre action (un principe également) est fondamentalement différent et est également assez commode pour décrire des phénomènes naturels.

Lorsque l'on parle de physique newtonienne, il convient alors de distinguer le formalisme newtonien des phénomènes naturels qu'il décrit. Ainsi par exemple, lorsque l'on parle des interactions fondamentales, il faut entendre le terme fondamentales comme s'appliquant au domaine des phénomènes naturels, c'est à dire essentielles dans ce domaine. Ce ne sont pourtant pas des interactions élémentaires (ou fondamentales) au sens du formalisme. Les interactions fondamentales au sens du formalisme seraient celles qui constitueraient une base (au sens mathématique) pour la description des interactions par ce formalisme.

L'objectif n'est pas de faire ici une nouvelle présentation d'un cours de physique générale mais de bien dissocier les concepts rarement énoncés qui la sous-tendent de manière à comprendre comment les utiliser dans le cadre qui nous occupe. Le processus de modélisation physique se compose donc d'un ensemble de processus d'abstraction en cascade, chacun produisant un objet spécifique :

- la phase d'observation produit une catégorie phénoménale, abstraction d'un ensemble d'observés. Elle permet de nommer de manière générique ces observés.
- la modélisation de cette catégorie, passe par l'usage d'un système de représentation qui conduit à "une mise en formule" désignée comme la mise en formule de tous les observés.

Nous n'insisterons pas ici sur les différentes formes que peut prendre « la formule » et sur les modalités de manipulation qu'elles portent. Disons que la formule peut être de formule variable. Il peut s'agir de ce que l'on nomme habituellement « formule mathématique », mais il peut s'agir également d'un ensemble de prescriptions, tel un programme d'ordinateur.

#### 1.4. Raisonnements afférents : le retour à l'observation et à la catégorisation phénoménale

Ayant posé la différence entre formalisme physique et phénomène naturel ainsi qu'entre phénomène naturel et phénomène prototype, nous pouvons maintenant mettre en évidence la rétroaction entre le formalisme et la première phase d'observation-catégorisation.

Nous avons fait remarquer que l'observation n'est pas une activité neutre par rapport à l'abstraction et à la formulation. Puis nous avons insisté sur le fait que l'objectif de la phase d'observation est la production d'une forme prototype abstraite, catégorie pertinente des observés.

Nous voulons montrer ici que le processus est simultanément inverse et que l'observation physicienne elle-même n'est vierge de tout système de représentation.

Pour cela, nous prendrons l'exemple de l'énoncé de la quatrième loi de Newton :

Newton, ayant élaboré son système mathématique basé sur la notion de force, de comportement propre et de principe d'action-réaction, observe ensuite les phénomènes de la nature selon ces termes. Il est clair également que Newton observant les phénomènes de la nature élabore son système mathématique.

C'est simultanément qu'il éprouve l'expressivité du formalisme et qu'il poursuit la formulation des phénomènes physiques.

Ainsi, observant l'écoulement de l'eau des rivières après les piles des ponts, il décrit : tout se passe comme si une force tendait à écarter deux flots coulant à des vitesses différentes, force qui semble d'autant plus grande que la différence de vitesse est grande.

Il s'agit bien d'un énoncé d'observation puisque la vitesse n'avait pas encore à cette époque de formulation mathématique solide et que la force est une variable « de seconde main », c'est à dire non directement observable.

Autrement dit, le formalisme, projeté sur les observés est un outil de catégorisation, et un outil d'émergence de traits catégoriels pertinents. La forme prototype peut émerger en même temps que l'énonciation formelle. Le formalisme (newtonien par exemple) apparaît bien alors comme une façon de voir le monde. La connaissance apparaît comme une façon de faire venir au monde une représentation.

## 2. La modélisation physique d'effets perçus

La démarche de modélisation que nous avons adoptée prend en compte les différentes analyses effectuées ci-dessus.

D'emblée, on s'aperçoit qu'il n'y a pas grande différence entre l'analyse *in situ* et la catégorisation psycho-cognitive en terme d'effets, telles qu'elles sont conçues au CRESSON et la démarche décrite ci-dessus.

La notion d'effet, en tant que catégorie désignée et pertinente d'un ensemble de perçus est commune. A notre sens, la similitude est grande entre la notion d'effet sensible et la notion de « forme (ou phénomène) prototype » que nous avons ici développé.

La puissance et la généralité du formalisme newtonien - dont on a bien intégré qu'il n'est pas propriété privée de l'explication des phénomènes mécaniques, ni même des phénomènes naturels - tient au principe d'action-réaction, qui place au niveau le plus élémentaire la notion d'interaction entre deux corps ou plus généralement entre deux perçus.



Il nous semble donc particulièrement approprié à la modélisation d'effets dans lesquels on sait a priori que le rôle des interactions sera essentiel.

### 3. La modélisation d'effets non-linéaires

Les phénomènes non-linéaires types pour exercer l'habileté modélisante sont les phénomènes collectifs, et parmi les phénomènes collectifs, on y retrouve les phénomènes d'agglomération et de modification dynamique de la forme.

Nous n'avons pas encore abordé le phénomène de métabole qui nous semble le mieux illustrer cette problématique de modélisation mais quelques approches ont déjà été effectuées sur des phénomènes collectifs spatio-temporels.

Plutôt que d'aborder de front la restitution du phénomène de métabole par simulation d'un modèle physique newtonien, nous préférons avancer en constituant une sorte de base d'effets collectifs spatio-temporels.

Pour cela, trois catégories d'effets collectifs ont été analysées et positionnées en rapport à l'effet de métabole :

- la première est l'effet "tas de sable" : nous en avons largement parlé ci-dessus ;
- le second est l'effet d'écoulement à turbulence plus ou moins organisée ;
- le troisième est un processus cellulaire d'occupation de l'espace.

#### 3.1. Un exemple: l'effet "tas de sable" et son modèle physique particulière

Le phénomène de transition d'un flux chaotique de particules vers une forme quasi solide est sans doute l'un des plus beaux, de part sa fluidité, son immobilité apparente, ses effondrements soudains. Les dunes et les amas granulaires ont des formes et des mouvements à la fois doux, apaisants et effrayants.

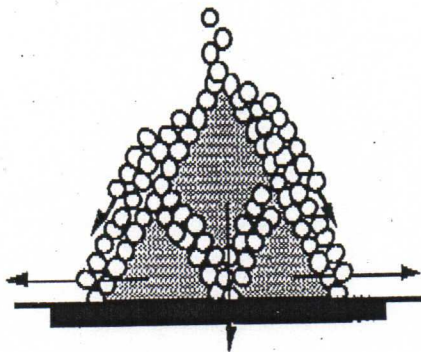
Ce n'est pas pour nous un hasard si c'est de plus l'un des phénomènes physiques les plus complexes auxquels s'intéresse aujourd'hui la physique. Le "modèle de tas de sable" est aujourd'hui un cas exemplaire, un modèle "modèle" pour l'étude des phénomènes présentant des états critiques auto-organisés et l'apparition dynamique de formes auto-similaires avec ses avalanches de surfaces et ses effondrements internes spécifiques.

La dynamique de tels phénomènes ne peut pas être représentée par :

- des modèles à automates cellulaires : la problématique d'étude des arrangements ne permet pas de restituer le type de dynamique spécifique et caractéristiques des amas granulaires (figure 1)

- des modèles statistiques : il s'avère très difficile de définir ce que l'on pourrait appeler une température de grains du fait de l'hétérogénéité permanente du champ de contraintes à l'intérieur d'un amas (figure 2)
- des modèles de transport, qui s'intéressent essentiellement à la dynamique du changement de forme et ne reproduisent pas les dynamiques internes qui sont les véritables caractéristiques de ce type d'objets (figure 3)

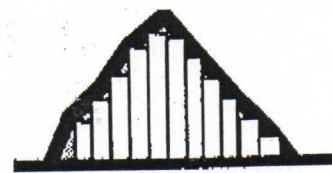
Le modèle CORDIS-ANIMA (logiciel ACROB) que nous avons mis au point est un modèle d'une grande simplicité (figure 4). Il modélise un amas granulaire par un ensemble de masses en interaction viscoélastique scuellée. L'interaction masses-sol est également de ce type. Le sol est modélisé par un ensemble de particules liées. Il peut être de forme quelconque (lignes, plans...). Il est également déformable et légèrement compressible. Avec ces seules propriétés, nous avons pu restituer les caractéristiques essentielles des amas granulaires : formation de tas, avalanches de surface, effondrements internes auto-similaires, formation de voûtes...



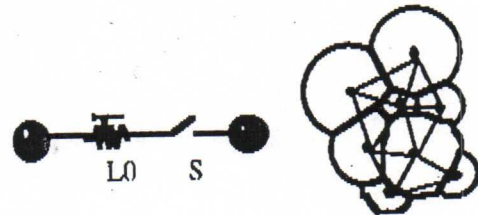
1. L'effet "tas de sable"  
Empilement régulier  
Avalanches de surface  
Effondrements internes



2. Modèle logique par automate cellulaires



3. Modèle physique de transport en surface



4. Modèle physique particulaire  
basé sur les interactions entre éléments

### 3.2. Analyse des résultats en Physique des matériaux granulaires

Les articles en physique de la matière et en matériaux granulaires confirment nos résultats.

Du point de vue de la connaissance physique, des critères intéressants tels que l'importance de la rugosité du sol ou la forme des grains, ou bien telle que l'imbrication étroite entre les phénomènes d'empilement, d'avalanche et d'effondrement, ont pu être

mis en évidence, critères que des observations statiques ou quasi-statiques permettent mal d'appréhender.

Nous avons obtenu, avec des modèles Cordis-Anima extrêmement élémentaires quant à leur fonctionnalité, des dynamiques de matériaux granulaires très probantes en ce qui concerne les aspects physiques, rendant compte dans la même simulation, des stabilités des formes (forme extérieure, apparition de cavités stables), de la dynamique des avalanches de surfaces et de la dynamique des effondrements internes, de l'hétérogénéité de la répartition des forces dans un tas stable de matière granulaire.

### 3.3. D'où vient la complexité?

Elle vient probablement de trois facteurs :

- La première cause de la complexité des phénomènes engendrés est sans doute la déformabilité des particules : du fait de l'interaction élastique seuillée, ce modèle simple modélise des particules qui sont indéformables lorsqu'elles se meuvent librement et présentent un volume déformable lorsqu'elles se percutent. Nous obtenons ainsi un ensemble de particules compressibles. Lorsqu'une particule est en collision avec plusieurs autres, la déformation de son volume de non pénétration est différente selon les directions de collision. Elle se déforme de manière très complexe, pour présenter la forme d'un hexagone lorsqu'elle est entourée régulièrement par ses voisines. Cependant, dans un amas soumis à une force telle que la gravité et en butée avec un obstacle tel un sol, cette configuration n'arrive pas. La scène est dynamiquement non-isotropique du fait de la non-isotropie des écrasements et de leur dynamique des écrasements.
- Une deuxième cause de la complexité émergente est la dynamique des collisions et des rebonds. En effet, lorsque les particules de l'amas sont assez comprimées, elles sont liées en permanence et elles constituent un système déformable à petites déformations rapides. Lorsqu'elles ne sont pas assez comprimées, elles se collisionnent en permanence et la partie correspondante de l'amas est un ensemble de particules en micro-rebonds multiples. Ces micro-rebonds multiples jouent sans doute un rôle essentiel dans les phénomènes typiques de matériaux granulaires (agencement quasi solides en transition rapide à des états d'avalanches et d'effondrements internes). Pour ce faire et pour restituer ces micro-dynamiques (micro-déformations et micro-collisions), il est fondamental de choisir une fréquence de calcul qui rende compte de la constante de temps de ces micros-phénomènes. Nos études et mesures parallèles à ce travail sur les collisions et les percussions nous indiquent que si l'on fixe la fréquence de calcul et d'échantillonnage choisie à 1050 Hz, nous couvrons l'essentiel de la dynamique de ces micros-phénomènes. Ainsi, l'amas se présente comme un réseau évolutif de masses - ressorts - frottements liés (partie déformable) et de masses - ressorts - frottements peu liés (partie en collision).
- Une troisième cause est l'évolutivité du réseau. Un tel réseau, même très simplifié de masses - ressorts - frottements sans changement de topologie a déjà un comportement dynamique très complexe (cf. vibrations...). Mais

dans ce cas, il y a en permanence un changement de topologie. Il y en a de deux types : le premier est la croissance du réseau et le second est le déplacement des lignes séparant la partie de masses liées siège de micro-déformations et de compressions, la partie de masses en micro-rebonds multiples, la partie de masse en collisions.

### 3.4. Comparaison avec l'effet de métabole

Comparativement à l'effet de métabole, l'effet "tas de sable" a des points de similitude et des points de différences importantes.

Comme l'effet de métabole, c'est un phénomène collectif.

Comme l'effet de métabole, l'effet "tas de sable" avec ses quatre principales caractéristiques évoquées ci-dessus - empilement, avalanches de surface, effondrement internes auto-similaires, arches - est un phénomène émergent de configurations spatiales, énergétiques et interactionnelles d'agents indépendants similaires.

Il diffère fondamentalement par le fait que, alors que l'effet de métabole est apparition et dissolution continue des pourtours de composants multiples (qu'ils soient sonores ou visuels), l'effet "tas de sable" est au contraire un processus de fabrication d'un composant - le tas - par destruction continue de son contour unique. Seuls les effondrements internes pourraient rappeler l'effet de métabole, mais ils sont plutôt comme une dissolution momentanée de la forme.

Par contre dans l'effet de métabole comme dans l'effet « tas de sable », tout se passe autour du concept de "contour".

Si l'on dit qu'une forme se définit par l'existence et la stabilité d'un contour - en terme de fonction d'interaction newtonienne, cela se décrira par le fait que le jeu des forces internes de cohésion est supérieure au jeu des forces externes de destruction - alors il est remarquable qu'une forme puisse précisément se présenter comme stable - un tas - par instabilité de son contour et que via cette instabilité, non seulement elle émerge mais elle se renforce en grossissant. Si l'existence d'un contour - on pourrait dire également d'une discontinuité forte avec ce qui devient alors l'environnement - est l'indice de séparation d'une forme, le tas de sable nous montre qu'un processus pour son renforcement est la destruction « légère » de celui-ci. D'où la signification particulière de l'angle de déclenchement des avalanches de surface. La différence angulaire déclenchant les avalanches représente le désordre de contour juste nécessaire pour que la forme croisse au lieu de se détruire.

Pour l'effet de métabole, il y a alors fort à parier entre les conditions déclenchant les effondrements internes et les conditions déclenchant les avalanches de surface. Donc

entre les conditions d'effondrement localisé temporellement de la forme et les conditions de déstabilisation localisé spatialement du (des) contours.

Ceci est l'hypothèse que nous formulons pour les travaux futurs d'approche du modèle de métabole.

### 3.5. Physique des phénomènes collectifs

Une idée nouvelle fait aujourd'hui son chemin, idée à laquelle ces travaux se rattachent pour partie : celle qui cherche à élaborer une physique des phénomènes collectifs. Des modèles physiques de mécanique des fluides ou plus simplement de réseaux élastiques et dissipatifs sont déjà en œuvre qui permettent de trouver les conditions cinématiques pour éviter la formation d'embouteillage. Des systèmes d'équation différentielles ont été appliquées au marché (Introduction à l'économie).

Trois idées importantes étayent le point de vue que nous avons énoncé :

#### Première idée

Elle concerne le fait que les phénomènes collectifs tels que les phénomènes collectifs humains présentent des similarités phénoménologiques fortes avec des phénomènes naturels tels que ceux présents dans la dynamique des matériaux granulaires : agglomération, transition de phase, autoconservation de formes... Pour ce faire, deux conditions au moins sont nécessaires : la première serait de disposer au préalable de modèles physiques restituant une variété suffisante de phénomènes non-linéaires, la seconde serait d'être capable d'extraire des phénomènes collectifs sociaux de la même manière que pour les tas de sables, des traits (des effets, des formes) caractéristiques. Il est probable que les formes caractéristiques émergentes de la dynamique des matériaux granulaires se retrouvent dans des phénomènes sociaux. D'autres formes caractéristiques apparaîtraient plutôt comme similaires à des formes émergentes de la dynamique de fluide (laminarité, turbulences...). D'autres enfin n'ont pour l'instant pas eu (encore) d'analogie avec des phénomènes naturels ou n'ont pu trouver une description suffisamment stable. Il en est ainsi par exemple de certains comportements dits de panique. Nous nous permettons ici de remarquer que certains phénomènes réputés encore non "physicalisables", tels que par exemple des systèmes dans lesquels les anticipations et les raisonnements au second degré des acteurs semblent importantes (exemple : les bulles spéculatives des marchés financiers), peuvent être dans certains cas physicalisables, moyennant analyse approfondie et amélioration du modèle. En particulier lorsque l'on peut émettre une hypothèse de continuité sur le comportement anticipatif, celui-ci peut être en partie inclus dans le modèle physique par le biais de composants à mémoire.

#### Deuxième idée

Elle consiste à bien distinguer l'action à plusieurs et l'action commune ou d'autres formes d'actions collectives. La première se distingue des autres par le fait que les intentions des acteurs y sont peu opérantes et surtout que le cadre du phénomène

collectif peut être déterminé une fois pour toutes et n'est pas révisé en cours de route. Il nous intéresserait de voir en quoi l'introduction d'une intentionnalité externe que nous appellerons « instrumentalisation » dans le cadre du modèle physique que nous développons dans nos travaux peut enrichir ce schéma. Par contre, dans l'action en commun, tous participent à la correction de chacun (des modèles à régulation répartie serait plus adaptés). La théorie des réseaux Cordis se prête par principe, comme toute théorie de réseaux, à la modélisation de ce type de phénomène (action ou comportement à plusieurs). On imagine aisément à ce stade de l'exposé comment la répartition des fonctions dans les réseaux Cordis avec la distinction entre comportements propres et comportements d'interaction y est particulièrement bien adaptée.

### Troisième idée

Elle consiste à suivre les théories de l'émergence dont l'idée générale serait ici de produire un collectif dans sa globalité à partir d'éléments locaux. Le tas de sable matérialise le paradigme du sorite : un grain n'est pas un tas, deux grains non plus... Quel est le seuil à partir duquel l'ajout d'un élément ayant la propriété non-P (ne pas être un tas de sable) à un ensemble d'éléments de même nature, transforme cet ensemble en un ensemble ayant la propriété P (être un tas de sable)... Ce seuil est impossible à définir. Les physiciens semblent avoir résolu le paradoxe du sorite, en donnant des critères pour définir le tas et son autoconservation plutôt que les conditions de sa formation à partir du grain.

Un ensemble de définition plus ou moins contrainte d'un tas en découlent : ce sont celles que nous avons données en introduction de ce paragraphe sur les modèles de matériaux granulaires (rappels). Ce type de définition (exemple : le tas est défini par une pente maximale à partir de laquelle tout grain rajouté va déclencher une avalanche) ne fait pas redémarrer le sorite car ce n'est plus le nombre de grains qui définit le tas mais d'une part une propriété stationnaire du tas (en l'occurrence ici une propriété géométrique, sa pente) et d'autre part une frontière qui sera une frontière d'instabilité qui définit à contrario un "tas prototypique" au sens où nous l'avons nous même utilisé. Il ne me semble donc pas suffisant de constater que les physiciens donnant une définition du tas à partir de lui même et non de manière à en expliquer sa constitution, résolvent le sorite. Ils échappent au sorite en décrivant le comportement dynamique de ce qui est déjà un amas, et donc en oblitérant la question du "grain" (ou du composant) et de la relation entre l'un et l'autre. Ils se situent davantage dans ce que Jean-Pierre Dupuy nomme le point fixe exogène de structuration.

### 4. Conclusion

Cette étude n'est pas terminée. Nous en sommes au point où les éléments analytiques sont posés et étayés par des expériences préliminaires spécifiques. L'effet de métabole, bien que peut-être l'un des plus complexes, reste la ligne de mire de notre progression, tant sa richesse et sa généralité sont fécondes en matière de modélisation de phénomènes collectifs non linéaires. La question de la sonification de ce type de modèle reste encore en suspens. Nous l'aborderons dans la deuxième année de la manière la plus fondamentale possible.

## B. APPLICATION AUX CONDUITES EN MILIEU URBAIN

Les objets de cette étude sont les formes dynamiques émergentes dans les conduites citadines ordinaires. Pour cela le schéma méthodologique commun aux phénomènes étudiés dans cette recherche est mis en œuvre.

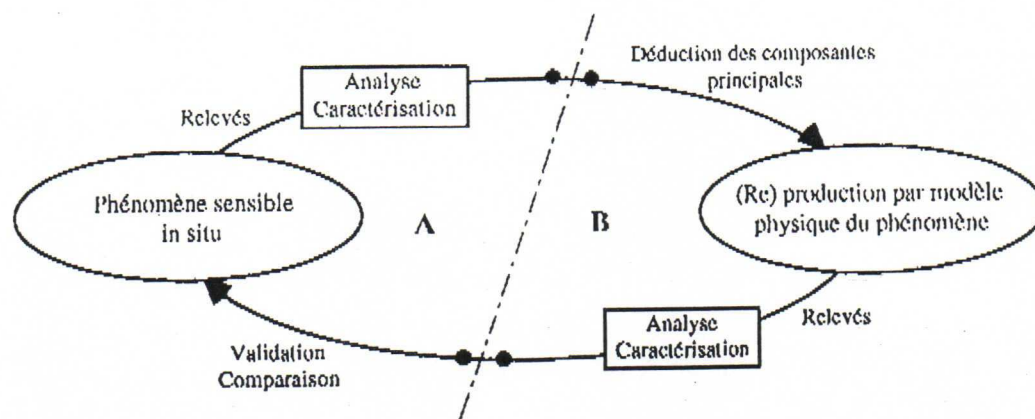


Schéma méthodologique

### Boucle numéro 1 : Analyse *in situ*<sup>5</sup>

Il s'agit dans un premier temps d'observer des formes récurrentes d'interaction entre une personne et une autre, entre une personne et un groupe mais aussi entre une personne et le cadre bâti dans lequel elle évolue. Le contexte choisi pour cette étude *in situ* est l'entrée d'un centre commercial composée d'un sas avec des portes automatiques (Centre commercial de Grand-Place à Grenoble).

La méthode utilisée pour caractériser les figures dynamiques émergentes dans les conduites est celle de l'observation récurrente à partir de vidéogrammes, méthode mise au point par Pascal Amphoux.

Elle a permis de dégager un nombre important de figures d'interactions concernant par exemple les manières dont on se croise, dont on se double, mais aussi des modifications de trajectoires comme autant de formes d'évitements, de mise en évidence de systèmes et de critères de priorité. Un second type de résultat qui s'appuie sur les premiers est l'observation de formes de comportement collectif récurrent comme la création de file, de groupe, mais aussi de processus coopératifs : déclencher l'ouverture des portes volontairement pour le passage de quelqu'un, tenir la porte et la passer au suivant, mettre en œuvre des ajustements corporels et de trajectoire dans les espaces plus resserrés, profiter du passage de l'autre pour se donner la priorité, etc.

<sup>5</sup> "Apports de modèles morphogénétiques à l'approche des ambiances construites", DEA Ambiances architecturales et Urbaines, Nicolas Tixier sous la direction de Pascal Amphoux, Cresson, 1997.

L'observation et la caractérisation de ces figures d'interactions et autres formes de comportement collectif esquisse quelques hypothèses quant à des causes circonstanciées à ces figures dynamiques :

- L'analogie avec des comportements collectifs observés au travers de certains phénomènes physiques : écoulement laminaire, écoulement turbulent, état gazeux, matériaux granulaires, agglomérages, avalanches, fractures,...
- La notion d'espace psychophysique (on retrouve ici le principe de dimension cachée développé par E. Hall).
- Le concept d'offrande proposé en écologie de la perception par J.J. Gibson, permettant de donner aux objets ou plus exactement aux interactions entre un objet et une personne des propriétés telles que des paramètres d'attraction ou de répulsion, de guidage visuel, d'actions plus complexes, etc.

A partir de cette caractérisation et des hypothèses dégagées, une phase d'expérimentation virtuelle par l'utilisation du modèle physique a pu être réalisée.

### **Boucle numéro 1 : Expérimentation virtuelle<sup>6</sup>**

Le but de cette étape est de tester des modèles « de foule ». Cela suppose la définition d'un cadre propre aux expérimentations, ainsi que l'élaboration d'un modèle d'interaction avec le cadre bâti alors défini. Un travail doit aussi être accompli au niveau de la visualisation des simulations. Les grandes étapes de ce projet sont donc :

- la définition d'un cadre expérimental : celui-ci est implanté de manière paramétrable, de façon à étudier son action en fonction de ses caractéristiques.
- la modélisation de l'interaction avec le cadre : le cadre expérimental fixé, il faut modéliser l'influence réciproque exercée entre le cadre et les individus (partie développée ci-après).
- la modélisation des individus : différents modèles sont élaborés, avec pour chacun plusieurs expérimentations paramétriques. Il est ensuite possible de comparer les résultats obtenus avec les effets catégorisés.
- la visualisation.

On peut regarder de plus près une des interactions développées par ce modèle pour exemplifier la démarche qui soutient le principe d'expérimentations virtuelles rendu possible puis mis en œuvre par le modèle physique. On prendra la première de ces interactions qu'il a été nécessaire d'élaborer : **l'interaction Individu - Cadre bâti.**

Par cadre bâti, il faut entendre ici les deux murs qui définissent le couloir entre lesquels les individus évoluent. La présence des portes automatiques étant paramétrable, elles n'interviennent pas dans les premières expérimentations.

---

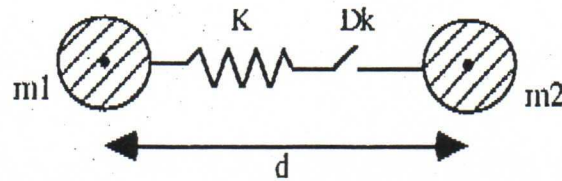
<sup>6</sup> "Modélisation physique d'une foule", DEA Image-Vision-Robotique, Nicolas Seminel sous la direction d'Annie Luciani, Ensimag - Acroe, 1998.



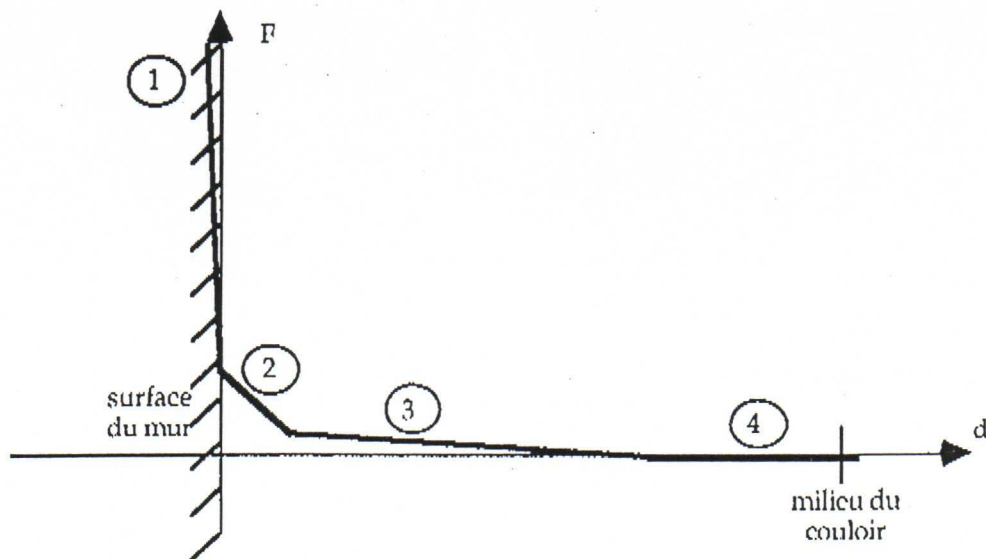
La première étape pour définir l'interaction individu - cadre bâti consiste à en faire l'analyse. Quels sont les paramètres, les caractéristiques que l'on peut définir pour ces murs ? Attention, la réponse qui est faite n'a pas forcément une fonction d'universalité, bien au contraire, les paramètres que l'on va définir sont très fortement liés au contexte étudié et donc directement aux hypothèses qui découlent d'observations *in situ*. Dans le cas étudié on observe des événements et des "non-événements" qui amènent à trois conclusions élémentaires sur les interactions individus - cadre bâti. Le terme élémentaire est important, ces observations servent de base à des paramétrages à partir desquels s'engendrent des comportements complexes :

- personne ne pénètre dans le mur : il a une certaine dureté.
- personne ne vient « râper » en avançant le long du mur : il a une certaine rugosité.
- à eux deux, ils définissent un espace du pas, ils lui donnent une direction : ils ont une fonction de guidage mécanique.

A partir de ces premières déductions, on peut proposer une définition du modèle d'interaction. Par analogie, tout se passe comme si il y avait une butée à la surface du mur et une pression autour de lui, plus importante à sa proximité. La pression est une action en  $1/d^2$ . Elle est modélisée à l'ACROE par une butée élastique à faible coefficient de raideur.



Il a donc été utilisé un module de liaison d'interaction linéaire par morceaux pour modéliser cette interaction :



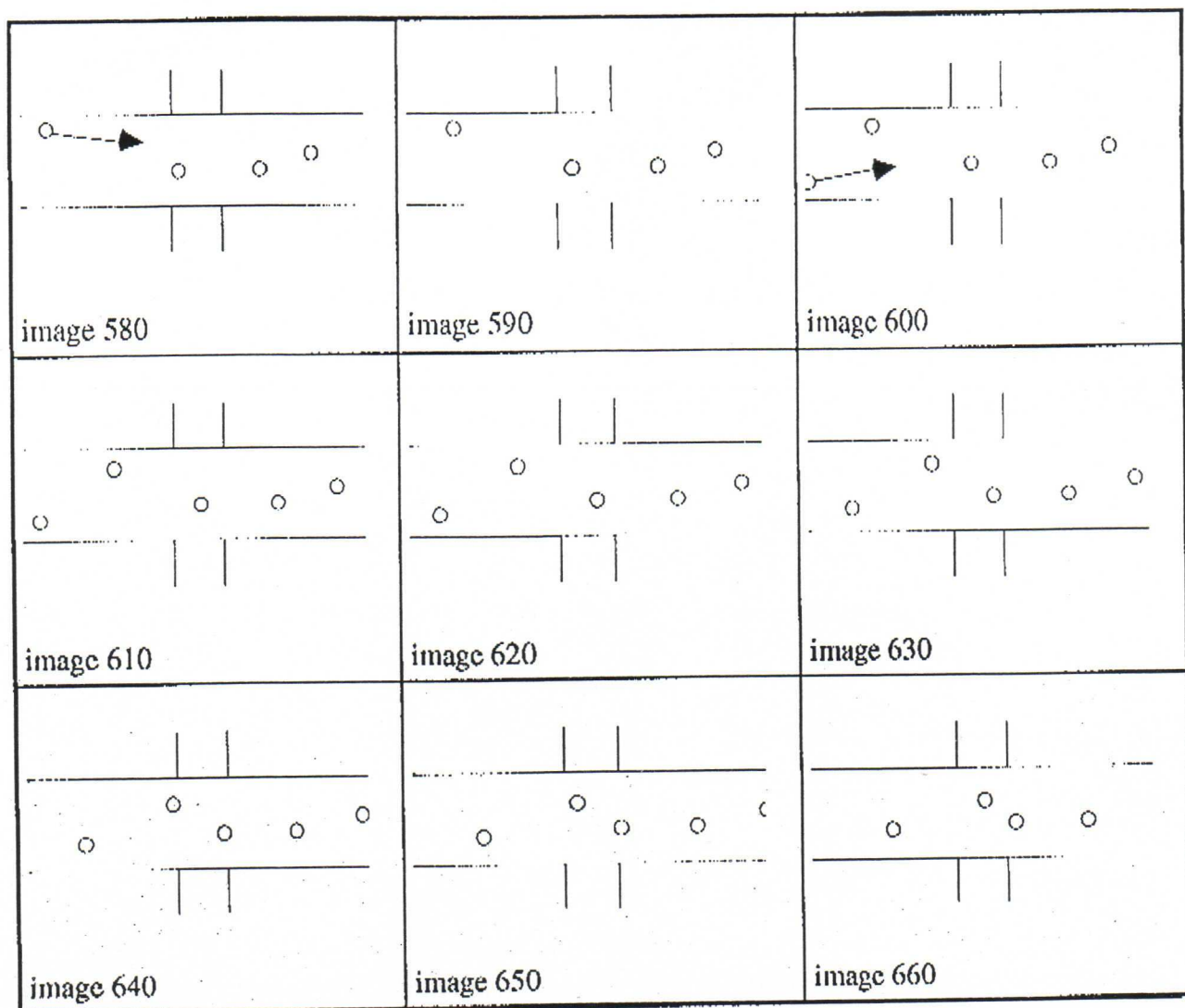
Cette fonction est, en quelque sorte, une approximation de  $1/d^2$  avec 4 morceaux :

- La zone 4 est une zone dans laquelle il n'y a aucune interaction entre le mur et les individus.
- La zone 3 a un petit coefficient de raideur : les individus peuvent y entrer, mais il y a moins de monde en moyenne dans cette zone (pression faible).
- La zone 2 a une raideur plus grande : cela signifie que les individus vont moins y entrer.
- La zone 1 est à une grande raideur : en cas de pénétration, la force devient tout de suite très grande.

Les observations faites lors des simulations sont données sur des fiches d'expérimentations. Elles articulent les valeurs données aux paramètres et les qualifications suites aux observations. En exemple, deux des étapes ont été les suivantes :

- Recherche des paramètres pour la zone 2 : on observe qu'un réglage des paramètres a pour conséquence d'atténuer les chocs et les rebonds contre les murs.
- Recherche des paramètres pour la zone 3 (zone 2 "réglée") : une raideur forte ou une zone large implique une trajectoire plus centrée des individus. Le choix des paramètres (tels que le centrage ne paraisse pas trop fort) testé avec un faible débit, a ensuite été testé avec un gros débit : un individu a légèrement tendance à aller vers le centre, mais reste sur les côtés si il y a du monde.

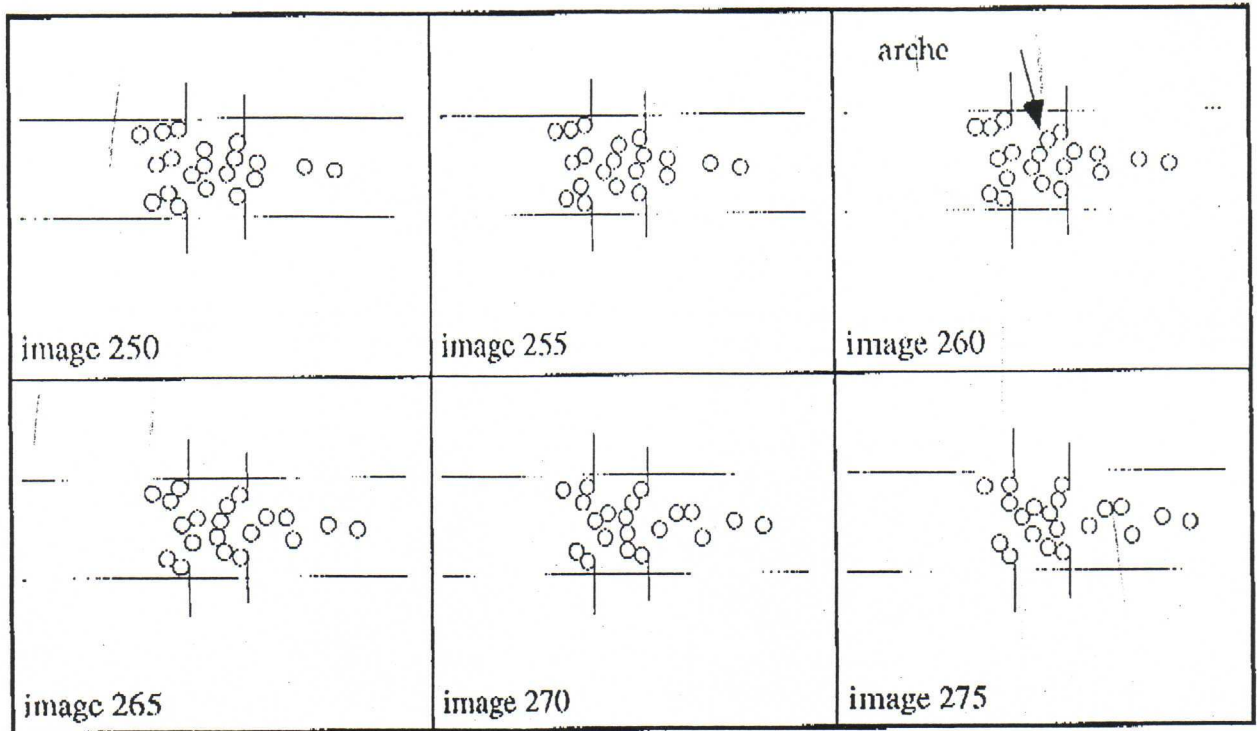
Le chronogramme suivant, réalisé lors d'une expérimentation, montre le centrage des individus :



L'utilisation du modèle physique s'est avéré prometteur, outre le fait qu'il s'agisse d'un modèle générateur de formes et d'effets ayant montré sa pertinence sur différents modèles laminaires et granulaires entre autres, il permet de travailler directement sur les interactions. Et ceci autant pour celles de type Individu - Individu, que pour celles de type Individu - Cadre bâti, avec le même système de paramètres "physiques" excluant toute variable ou fonction de type cognitive.

Ce travail confirme le fait que les modèles physiques sont pertinents pour la modélisation de comportements de conduites citadines. Les deux modèles expérimentés ont déjà permis de générer de nombreuses formes dynamiques observables (cf. vidéo), telles que le centrage, les changements de trajectoire brusques, les doublages, les « poussades », le blocage avec formation d'une arche, la formation de groupes et de files, des rotations de groupe,...

Exemple :



Chronogramme foule\_23 : création d'une arche

Dans l'arbre des expérimentations paramétriques possibles, de nombreuses branches n'ont pas été explorées. Ainsi l'étude de ces deux modèles (un avec viscosité, l'autre sans) peut être poussé plus loin. Mais un retour sur le terrain peut déjà être effectué pour réaliser des comparaisons avec les résultats obtenus. Il s'agit alors de démarrer une seconde boucle de notre schéma méthodologique.

Outre ces deux modèles à approfondir, plusieurs pistes de travail pour la modélisation se dessinent :

- la modification du cadre bâti, permettant de faire le lien entre des typologies d'espace et des formes dynamiques de conduites.
- l'ajout d'éléments perturbateurs : structurant l'espace, ils permettent de mettre en évidence la validité ou non de certains paramètres et induire l'émergence de nouvelles formes dynamiques.
- la complexification du modèle des individus : les problèmes avant / arrière sont évidents, un modèle plus complexe que la masse ponctuelle, tel que deux masses liées par une élasticité, peut apporter des solutions.
- la superposition de deux flux : les modèles actuels ne donnent pas de bons résultats pour le cas de la foule dans les deux sens. La mise en œuvre du point précédent peut offrir une réponse valable à ce problème.
- la visualisation : son intérêt intervient dans l'observation et l'évaluation des simulations de façon réduite mais au même titre que pour l'*in situ*.