ART KINESTHÉSIQUE ET ART PLASTIQUE : CONTRIBUTION À L'ÉMERGENCE D'UN ART VISUEL DYNAMIQUE

Annie Luciani
ACROE, Ministère de la Culture et de la
Communication
Laboratoire ICA, Institut Polytechnique
de Grenoble
France
Annie.Luciani@imag.fr

RÉSUMÉ

Nous exposons les fondements scientifiques, technologiques et artistiques de notre approche d'un art visuel du mouvement. Nous nous situons à l'intersection de trois lignes de force, que nous examinons tout au long de cet essai. Une première ligne de force court

dans l'histoire des arts plastiques occidentaux. Ceux-ci ont accompli récemment une révolution radicale les libérant de leurs buts de figuration, révolution supportée par l'élaboration de théories de la forme, abstraite de son contexte figuratif. Nous y montrons que le temps, comme objet d'esthétique, est remarquablement absent de ce processus d'abstraction. La seconde ligne de force est tracée dans le champ de la sensibilité humaine, particulièrement attentive aux valeurs temporelles. La troisième ligne de force se situe dans le domaine technologique, dans lequel les techniques actuelles de modélisation et de simulation numériques ouvrent plus grand la brèche d'un art visuel du mouvement pressenti par le cinéma. Ces trois voies continuent aujourd'hui à avoir des difficultés à converger malgré de très nombreuses initiatives dans les arts interactifs et le multimédia. Nous tentons d'apporter une raison à cette difficulté, en montrant en quoi le rapprochement entre un art du mouvement et un art de la forme est non trivial. Puis, pour la dépasser, nous posons qu'il nous semble nécessaire de jeter les bases axiomatiques pour l'émergence d'un art du mouvement visuel. Nous montrons ici que le point matériel est intrinsèquement l'élément le plus simple générateur de mouvement, en vis-à-vis de son dual, le point géométrique, forme spatiale la plus concise. Nous proposons alors une nouvelle vision de l'image en tant que construction multimodale, composable d'attributs de formes spatiales et de mouvements. Nous montrons que cette multimodalité recouvre une dualité fondamentale, celle de l'intensif et de l'extensif, cause profonde de la difficulté d'élaborer une relation organique entre espace kinesthésique, plus intensif, dans lequel priment les notions de forces et d'énergie, et l'espace plastique, plus extensif, dans lequel priment les notions de structures spatiales. Nous théorisons alors cette relation organique comme une convolution entre ces deux espaces. Nous décrivons ensuite les outils de modélisation et de simulation, CORDIS-ANIMA et MIMESIS, ainsi que les outils d'habillage de forme, géométrique, topologique et dynamique, que nous avons développés pour permettre à l'artiste de se focaliser sur la création de mouvements et sur ses représentations visuelles. Enfin, nous terminons par des exemples de créations artistiques basées sur ces concepts et outils.

MOTS-CLÉS: mouvement visuel, forme spatiale, art du mouvement visuel, art de la forme, modèle physique, modèle géométrique, modèle topologique, gravure, gravure dynamique.

1. Introduction

La vague de fond de révolutions sans précédent des techniques de représentation et de production contemporaines induit des transformations profondes tant conceptuelles que sociales, confrontant ainsi le domaine artistique à des mutations en profondeur. Emboîtant le pas à W. Benjamin [Ben35], de nombreux philosophes et artistes ont montré en quoi les révolutions de la photographie, puis du cinéma, ont déjà opéré un décadrage radical dans les moyens de représentation, conduisant à penser autrement les arts visuels. L'apparition du concept de simulation numérique marque un pas de plus le long de cette trajectoire [Que86].

Or, ces mutations techniques arrivent à un moment où de nouveaux questionnements artistiques émergent dans l'histoire de l'art. Nous assistons en effet aujourd'hui à un fourmillement de démarches, labourant des champs inexplorables, et probablement impensables, il y a quelques décennies à peine : complexité, interactivité, multimodalité, pour n'en citer que quelques-uns largement débattus aujourd'hui [Cou98]. Nous proposons de discuter ici de l'apparition de la préoccupation dynamique dans les arts visuels, non seulement comme composante du processus de création des formes visibles, mais comme focus esthétique à part entière, dans l'éclairage des technologies contemporaines de la modélisation et de la simulation numérique.

Il n'est plus à prouver que la dimension cinétique et dynamique est essentielle dans le sens que prennent les choses et le monde par nos actions et nos perceptions. La phrase suivante, tirée de *L'air et les songes* de G. Bachelard [Bac43] l'exprime de

manière à la fois concise et émouvante : «L'imagination des formes et des couleurs ne peut donner cette impression de bonheur volumétrique. On ne peut l'atteindre qu'en joignant aux formes et aux couleurs les sensations cénesthésiques qui sont sous la dépendance totale de l'imagination matérielle et de l'imagination dynamique».

Cette préoccupation de la dynamique n'est évidemment pas récente. Elle devient cependant plus explicitement recherchée dans le mouvement des futuristes italiens par exemple, puis dans les arts cinétiques. Le cinéma d'animation quant à lui a suscité à sa naissance un grand enthousiasme chez les artistes plasticiens, pour ne citer que Max Ernst ou Man Ray, et les notions de peintures animées. Néanmoins, dans le domaine des arts plastiques, il n'a pas encore acquis sa place à part entière et, dans le domaine du cinéma, il n'est le plus souvent considéré que comme un «genre cinématographique» parmi d'autres [Del09][Den07]. Aujourd'hui, de nombreuses démarches artistiques transdisciplinaires cherchent à mettre en évidence l'enracinement profond de la forme plastique dans, par et avec le mouvement et, par là même, avec la kinesthésie et le geste.

Cela n'est pas sans poser de nouvelles questions, prometteuses mais extrêmement complexes tant pour l'art que pour la technologie. Nous sommes donc au tout début d'une période dont il ne tient qu'à nous qu'elle soit féconde.

Ce texte rend compte des concepts et techniques que nous développons depuis une trentaine d'années pour contribuer à l'émergence d'un art visuel du mouvement. Dans un premier temps, nous essayerons de montrer en quoi les technologies actuelles sont l'occasion historique de la possible naissance d'un véritable art du mouvement visuel, dont on peut détecter des prémisses et des traces de son désir très loin dans l'histoire de l'humanité, mais qui est à notre sens encore à fonder. Dans un second temps, nous présenterons les technologies que nous avons conçues pour accompagner et stimuler cet élan vers un art visuel du mouvement. Dans ces outils, nous renversons le propos majoritaire de l'image conçue et produite comme statique, éventuellement générée en amont par un mouvement ou en aval mise en mouvement, pour placer le mouvement – son observation, sa pensée, son expérimentation, sa création – au centre même du processus de création. Dans un troisième temps, nous illustrerons notre propos en présentant des œuvres artistiques réalisées avec ces technologies.

2. Le mouvement et les arts visuels

Le mouvement visuel nous apparaît communément comme une composante d'un effet sensible composite – le mouvement d'un objet ou l'évolution de quelque chose de visible : contour, teinte, transparence, etc. Il est alors un attribut de ce qui est vu, soit révélateur ou complément, l'attention portant sur l'objet ou la chose elle-même.

Dans le domaine des arts visuels, certaines démarches artistiques l'ont théorisé comme une modalité de production d'objets graphiques ou picturaux. Il est alors un moyen de la création plastique. Il en est ainsi du mouvement comme processus de genèse de la ligne et de la forme, que P. Klee développe tout au long de l'ouvrage La pensée créatrice [Klee, 1920, 1973], pour qui la forme naît du mouvement, de l'énergie, ou du rapport entre les deux. C'est également la même idée qui s'exprime dans la démarche picturale de J. Mandelbrojt [Man09], citant lui-même O. Debré : «la peinture, c'est du temps devenu espace». Ainsi, dans P. Klee, «Dès que le crayon touche la feuille de papier, la ligne apparaît ... Nos enfants eux-mêmes commencent par là. Un jour, ils découvrent le phénomène du point animé par un mouvement et cette découverte provoque un enthousiasme qu'il est difficile d'imaginer» [Klee, ibid]. L'enthousiasme dont il est question ici est-il le fait du mouvement lui-même ou le fait de sa trace sur le papier ? Le contact du crayon sur le papier crée d'abord un point visible, trace complexe de la rencontre d'un marqueur et d'un support, puis, le procédé se poursuivant, ce point-là – ce point graphique – s'anime. Que dirionsnous de gestes sans traces? Pourrions-nous les considérer comme partie du champ plastique? Une constatation s'impose : dans le cas des arts visuels, une condition nécessaire pour que la forme advienne est l'existence d'un procédé de mémorisation, qui, précisément, arrête le temps. Ainsi, le temps ne devient espace que par l'existence de propriétés non triviales de l'outil et de la matière qu'il transforme.

Si la trace est une condition nécessaire à la forme, le mouvement n'en est ni une condition nécessaire ni même une condition suffisante. Avec la trace, il y a forme, avec ou sans mouvement. Sans mouvement¹, les formes peuvent exister, en tant qu'elles-mêmes, et être néanmoins pourvues de sens. L'histoire nous le montre sous

différentes formes d'arts tels que les arts dits abstraits, non figuratifs, mosaïques, frises, arabesques, arts conceptuels, symboliques, etc., pour n'en citer que quelquesuns, arts qui s'appuient sur notre sensibilité aux lignes et aux agencements spatiaux et colorés.

Inversement, ni la trace ni la forme spatiale ne sont des conditions suffisantes au mouvement visuel. L'art du fugace et du fugitif, dans lequel les relations spatiales ne sont pas immobilisées et où l'espace joue un rôle de déploiement éphémère d'un mouvement sans trace, existent, dans la musique bien sûr et dans la danse, mais également dans les arts visuels. L'exemple immédiat est celui de l'art cinétique, avec des œuvres emblématiques comme *Métronomes* de Rebecca Horn, œuvre dans laquelle les effets structurels sont des effets purement temporels de synchronisation/désynchronisation sur des échelles de temps très larges : brièveté extrême des synchronisations, longueur extrême des désynchronisations...

Ainsi, contre toute évidence, les deux composantes, que nous appellerons de manière condensée tout au long de ce texte «forme» et «mouvement», seraient donc dissociables, au moins par la pensée, dans la mesure où l'une n'est ni nécessaire, ni suffisante à l'autre. Nous devrions donc admettre, avec Lessing [Les, 1802], qu'il serait possible de distinguer entre des arts spatiaux et des arts temporels. Dans son ouvrage *Du Laocoon ou des limites respectives de la poésie et de la peinture*, G.E. Lessing prend le contrepied de l'exercice fréquent qui consiste à rechercher des similitudes entre les arts, pour défendre l'idée qu'il est plus judicieux de définir les arts par leurs différences que par leur similitudes, car chaque art a des caractéristiques qui lui sont propres et qui fondent sa nécessité. Il cherche à montrer, sur les exemples conjoints d'une sculpture du Laocoon et du poème de Virgile de même nom, en quoi les deux œuvres différent fondamentalement, l'une par son évocation puissante du cri et de la douleur, l'autre par sa puissante et éternelle immobilité. Son objectif était de libérer la peinture de l'emprise de la poésie², voire du rabattement des arts picturaux et sculpturaux sur la poésie, afin de laisser à ceux-ci suffisamment d'espace

⁽¹⁾ Nous ne parlons pas ici des processus de réception ou de perception, dans lesquels le temps est toujours impliqué.

⁽²⁾ Selon R.W. Lee (1991), « la cause principale en est, sans conteste, l'autorité dont jouissaient deux traités des Anciens sur la littérature : la Poétique d'Aristote et l'Art poétique d'Horace». In Rensselaer W. Lee, *Ut Pictura Poesis : Humanisme & Théorie de la Peinture, XIe-XVIIIe siècles*. Editions MACULA. 1991.

propre, qu'il estimait de fait insuffisant.

Mais ce décadrage opéré par G.E. Lessing au profit des arts visuels se fondait sur un autre décadrage antérieur. En effet, la déclaration de Lessing que nous pourrions résumer par «il n'en est pas de la poésie comme de la peinture, et vice-versa», est un dépassement d'une autre doctrine, qui, comme le montre Jacqueline Lichtenstein [Lich03], est une reprise inversée d'une phrase d'Horace «ut pictura poesis erit», signifiant «il en est de la poésie comme de la peinture» qui rapporte les arts du langage à ceux de l'image : «L'esprit est moins frappé par ce que l'auteur confie à l'oreille que de ce qu'il nous met sous les yeux, ces témoins irrécusables» (Horace, Epître aux Pisons, cité par [Lich03]). Or cette inversion, soumettant donc la peinture aux catégories du discours, a déclenché «l'accession de la peinture à la dignité des arts libéraux» [Lich03], en l'extrayant de la mimesis dans laquelle elle était captive depuis l'antiquité³.

Les deux mouvements successifs, le premier de libération des arts visuels de la mimesis, fusse-t-elle la représentation sublimée de l'homme⁴, du XVe au XVIIIe siècle, et de son accession au statut d'art créateur de sens et d'objets nouveaux comme la musique et la poésie, et le second de détachement d'avec ces mêmes arts, ont été les deux mouvements fondateurs de l'art moderne et contemporain. Ces fondations sont posées sur la distinction entre arts libéraux de l'espace et arts libéraux du temps. Cette distinction a conduit à la naissance des notions d'arts plastiques et d'espace plastique, entendant par là que l'espace est en lui-même un attribut de la création visuelle, voire même l'attribut fondateur, que l'activité plastique modèle et structure. C'est pourquoi l'entreprise de Lessing a été farouchement défendue par tous les défenseurs de la modernité, de Charles Baudelaire au philosophe et critique d'art Greenberg [Gre86] affirmant : «Les arts d'avant-garde ont, dans les dernières cinquante années, atteint une pureté et réussi une délimitation radicale de leur champ d'activité sans exemple dans l'histoire des arts et de la culture».

Cette révolution fondamentale des arts désormais appelés plastiques – ou arts

⁽³⁾ Comme le note R.W. Lee [Lee, 1991, ibid], «Entre 1550 et 1750 ... [les critiques] sont unanimes à affirmer que la peinture mérite d'être prise au sérieux, à titre d'art libéral, au moins par sa seule vertu de sa ressemblance avec la poésie».

⁽⁴⁾ R.W. Lee, 1991, Ibid

de l'espace plastique – a eu un prix, celui du délaissement radical du geste et du temps, sublimé dans les vers cinglants de C. Baudelaire dans le poème La Beauté : «Je hais le mouvement qui déplace les lignes», dans lequel l'amour est éternel et la matière muette.

A ce stade de notre raisonnement, nous reprendrons à notre compte la démarche de Lessing, car notre intuition est que la focalisation opérée sur la forme et sur l'espace par les arts plastiques, a eu pour conséquence de ne pas laisser suffisamment d'espace à un art visuel du mouvement pour se développer, malgré les démarches maîtresses comme celle des futuristes italiens ou de l'art cinétique, au moment de la révolution du cinéma d'animation ou de la vidéo expérimentale. Ainsi, du fait même que la forme et l'espace sont désormais posés, de manière incontournable, comme déterminant des arts plastiques, en eux-mêmes, c'est-à-dire sans visée nécessairement figurative⁵, il nous est à présent loisible de penser son dépassement en tant que déterminant unique ou central des arts visuels. Quitte, pour un temps, à ne penser qu'au mouvement et à la matière qui le génère, de manière à lui donner toute sa place, pour ensuite retrouver la forme et l'espace au sens plastique, mais dans un contexte nouveau.

Sur ce chemin, une première étape est de rendre explicite le fait qu'un art proprement dynamique existe, bien qu'il ait encore du mal à s'étendre sur toute son ampleur expressive et créative et sur tout son champ social et humain. Il existe déjà dans la mesure où nous avons la potentialité d'y être sensible. Il existe également dans la mesure où les effets qu'il provoque, sensoriels, cognitifs, symboliques, esthétiques, possèdent déjà un vocabulaire, indépendant de toute forme ou de tout autre attribut visuel, auditif, ou tactile. Il s'exprime ainsi par des verbes tels que *«frémir»*, *«palpiter»*, *«frissonner»*, *«balancer»*, et bien d'autres encore, qui traduisent non pas seulement une action ou un résultat actif, comme *je saute*, *j'ai sauté*, mais également un *«comment»*, une manière, une qualité sensible. Le mouvement s'exprime d'ailleurs parfois mieux par des substantifs : les *palpiter*, les *sautiller*, les *balancer*, les *frémir*... Il peut s'exprimer également via des adjectifs, adverbes ou groupes nominaux qualificatifs : accéléré, doux (*un amorçage doux*), vif (*un décollement vif*),

⁽⁵⁾ Ce qui a contrario n'empêche pas de l'inclure.

se poser avec légèreté... Le mouvement, c'est-à-dire l'expression de la dynamique, de la manière de changer, existe donc bien pour lui-même, sans appel à d'autres phénomènes support, forme visuelle ou manifestation acoustique. Ces termes lexicaux montrent qu'il a même une certaine autonomie par rapport aux autres effets sensibles auxquels il peut être associé puisque la même expression dynamique peut se manifester de diverses manières, visuellement, auditivement ou corporellement. Le cinéma a été vécu comme une première réponse à l'attente de cet art du mouvement visuel. Il a cependant très vite bifurqué vers un art de la narration et du discours visuels. Le cinéma d'animation lui a emboîté le pas, avec le dessin animé cartoonisé, le cinéma dessiné, la bande dessinée animée ou même les marionnettes avec les succès commerciaux récents des films d'animation mettant en œuvre les techniques de pâtes à modeler. Malgré de nombreux films d'artistes peintres ou d'animateurs affirmant être d'abord sensibles au mouvement, malgré les déclarations célèbres de Norman McLaren⁶ ou d'Alexandre Alexeieff⁷, la majeure partie des films d'animation est aujourd'hui constituée de films qui racontent des histoires, à mi-chemin entre une mimesis visuelle et un imaginaire discursif. Quant à la danse, elle est d'évidence art du mouvement visible. Comme la musique, elle est art de l'éphémère. Mais différemment d'elle, elle se heurte encore aujourd'hui au plafond de verre d'une impossible écriture : la danse, art temporaire impossiblement allographique, selon Frédéric Pouillaude [Pou04], art qui ne peut être ni allographique comme la musique, ni autographique comme la peinture et la sculpture, mais un entre-deux qui néanmoins existe.

Nous ne détaillerons pas plus avant ici les relations entre peinture et musique ou entre danse et musique. Mais nous pouvons conclure que, puisque le mouvement visuel existe pour lui-même, puisque l'on peut parler de «mouvement per se», puisque de nombreuses quêtes artistiques l'explorent, bien qu'il se heurte encore à des comparaisons ou des catégories qui l'enferment,

Quelque chose donc se cherche et ne s'est pas encore trouvé.

^{(6) «}L'animation n'est pas l'art des dessins qui bougent mais l'art des mouvements qui sont dessinés». (7) «Si en littérature, les mots sont la matière première et en musique les sons, pour le cinéma d'animation, c'est le mouvement. Les formes plastiques, bi ou tridimensionnelles, ne sont nécessaires que pour permettre de le saisir. Le cinéma d'animation vise le «comment» du mouvement. Le reste, beauté de la forme ou couleur, est accessoire, parfois même encombrant». Alexandre Alexeïeff. Texte de 1956, publié dans Film Culture, n°32, 1964. Cité par Sébastien Denis, dans Le cinéma d'animation. Armand Colin Ed. 2007.

Faut-il donc aller aujourd'hui vers une nouvelle «ut pictura poesis», au sens de chercher à nouveau des similitudes entres les arts comme le tentent les multiples entreprises artistiques contemporaines audio-visuelles, choréographo-visuo-musicales, visuo-musicales? Ou faut-il aller d'abord vers un «nouveau Laocoon», avec pour objectif cette fois de doter un art du mouvement visuel de son espace de respiration et de liberté, quitte à forcer un peu son émergence?

Une circonstance bouleversante pour cette recherche vient alors des technologies actuelles de la modélisation et de la simulation numériques multisensorielles, associées aux concepts contemporains d'interaction, de rétroaction, de couplage, et de systèmes dynamiques. Devant ces nouveaux champs, s'ouvre une tâche considérable de formalisation de ce que P. Klee appelait «l'ordre théorique des moyens de la création»⁸, trame dans laquelle une pensée de l'éphémère dans l'espace plastique visuel puisse enfin trouver la place qui y est sienne. La technique cinématographique a sans aucun doute fait franchir un pas dans cette préoccupation artistique. Mais ce sont bien les technologies de modélisation et de simulation numériques qui pourraient être les véritables conditions, à la fois conceptuelle et technique, pour l'émergence d'un art visuel dynamique. Telle est ici notre hypothèse et notre visée.

3. La révolution technologique de la modélisation de la forme et du mouvement

La question est alors : en quoi les nouvelles technologies de modélisation et de simulation numériques pourraient aider à ouvrir de nouvelles portes pour explorer positivement la préoccupation ancestrale du mouvement dans le domaine des arts visuels.

⁽⁸⁾ Il s'agit d'une partie du sous titre du Tome II «Ecrits sur l'Art», intitulé par Klee lui même «Histoire naturelle infinie – Ordre théorique des moyens de la création, lié à l'étude de la nature, et chemins constructifs de la composition» [Klee, 1920, 1973]

3.1. Modélisation numérique et forme

Les techniques numériques de l'image sont désormais présentes dans notre univers et indéracinables de notre quotidien et de notre imaginaire. Mais ces techniques ne sont pas neutres, en particulier relativement à la question philosophique et artistique de la forme et du mouvement, de ce qui est et de ce qui transite.

Les techniques de synthèse d'images 3D, nées dans les années 60 et qui arrivent aujourd'hui à un stade de maturité incontestable sont fondées sur une théorie de la forme spatiale telle qu'elle s'exprime de manière impeccable par la géométrie. Les logiciels 3D sont des outils de modélisation à substrat géométrique, auxquels se sont rajoutées des techniques de modélisations optique, géométrique ou physique, des effets lumineux. Il s'agit donc essentiellement de la modélisation des caractères morphologiques et optiques, selon divers procédés qui correspondent chacun à une théorie spécifique de la forme spatiale des choses bien définies, immobiles, stables et bien localisées dans l'espace⁹. Pour ne citer que les plus importants : représentation par les contours (tels que les formalismes BRep pour Boundary Representation ou représentation par contours), construction par primitives géométriques volumiques (tel que le formalisme CSG : Constructive Solid Geometry ou géométrie constructiviste de solides), Surfaces de formes libres (en anglais FFD pour Freeform surfaces), représentation par points (Point-based models), Discrétisation surfacique ou volumique (telles que les discrétisations par *Quadtree* et *Octree*). Dans toutes ces représentations, une évidence ne saute pourtant pas aux yeux : le temps est absent, d'une absence absolue. Ne faut-il pas y voir là un signe supplémentaire de l'hégémonie de la forme, jusqu'à la forme pure, sur toutes les autres qualités de l'image, comme l'ont rêvée nombre d'artistes contemporains ? Même si cette proximité est le fait d'un hasard, ces techniques, qui existent désormais, renforcent ce point de vue, l'illustrent, le rendent possible, permettent de nous y confronter, et ce jusqu'à son extrême. Ayant mis en évidence précédemment que l'accession des arts visuels au statut d'arts libéraux, qui leur a permis de s'élever au statut

⁽⁹⁾ Se rajoutent ensuite sur ces aspects morphologiques, des aspects optiques via différents procédés de rendu visuel (ombrages, textures, interaction avec la lumière), dont nous ne parlerons pas dans ce texte.

d'art créateur de sens en s'éloignant d'une mimesis, s'était effectué au prix d'une part de la dissociation de la forme d'un autre attribut du visible qui est le temps et d'autre part de son primat sur le temps, cette dissociation et ce primat se sont trouvés aujourd'hui renforcés par les techniques informatiques de modélisation 3D. Quand bien même la convergence entre les techniques actuelles et l'évolution historique contemporaine des arts plastiques vers le primat de la forme serait un fait du hasard, cette convergence est néanmoins un fait historique puissant : les logiciels de synthèse d'images 3D ont matérialisé techniquement l'existence de la forme pure, en toute abstraction de tout ce qui fait temps : du mouvement, du geste, de l'énergie, de la matière.

Ce n'est qu'une fois les formes ainsi définies comme exclusivement statiques, qu'elles sont mises en mouvement. Le mouvement est donc ajouté, a posteriori, par divers procédés tels que la mise en succession d'états fixés ou l'utilisation de fonctions d'évolution f(t) décrivant des cinématiques¹⁰. Ces procédés sont ensuite étendus par diverses techniques d'optimisation tels que les notions états-clés (ou dessins-clés) et d'automates interpolateurs entre états-clés (ou dessins-clés) ou de cinématique inverse, puis enrichis par toute une panoplie de traitements des fonctions temporelles cinématiques f(t) pour les mélanger (en anglais : blending), modifier leur objectif (en anglais : retargeting) ou les déformer (en anglais : warping). Il n'y a donc pas, à strictement parler, de modélisation du mouvement, au sens où tous ces procédés sont des procédés de synthèse ou de traitement de signaux temporels temporellement explicites et non pas des procédés pour leur génération. Ces signaux temporels peuvent provenir soit de fonctions mathématiques dans lesquelles le temps est explicite, soit être donnés manuellement par des graphiques interactifs, soit être acquis via des systèmes de capture de mouvements réels puis éventuellement retraités.

Ainsi, les logiciels de synthèse d'animation 3D sont d'abord des logiciels de modélisation d'images de synthèse 3D sur lesquelles le mouvement vient ensuite

⁽¹⁰⁾ Hormis dans les procédés gérant tous types d'informations, y compris des informations temporelles, via des grammaires ou des scripts éventuellement interactifs, et qui permettent alors de définir des couples {formes, temps} ou {déformées, instants}, ou bien dans les outils, en particulier musicaux, de composition et de programmation temps réel.

se plaquer, en quelque sorte comme un cosmétique, une pièce rapportée. Or, malgré les prouesses techniques, force est de constater que cette conception du mouvement n'a pas encore été capable de rendre compte des finesses dynamiques et des qualités essentielles du mouvement qui parlent subtilement à nos perceptions et à notre kinesthésie : continuités, phrasés, ruptures, changements de rythme, fluidités, souplesses, brusqueries, et au delà encore surprises, émergences, complexité... L'attrait que les techniques de capture de mouvement suscitent est d'ailleurs en quelque sorte le signe d'un échec des techniques de synthèse, puisqu'elles recourent au mouvement réel, qui donc, seul, semble assez riche. Une technologie de la modélisation du mouvement visuel doit donc être construite.

3.2. Modélisation numérique et mouvement

Pour répondre à ces questions, de nouvelles approches de la modélisation des causes potentielles productrices de mouvement ont commencé à prendre leur essor dans les années 1990. Elles déplacent le processus de production du mouvement d'une description explicite des cinématiques vers la simulation d'une cause susceptible de les produire. Ces approches ont deux sources d'inspiration principales, le monde physique et le monde biologique, conduisant à deux types de systèmes de modélisation : la modélisation physique et la vie artificielle. Nous ne parlerons pas dans cet article de cette deuxième approche, bien qu'elle porte des expériences et des perspectives artistiques riches et enthousiasmantes.

La modélisation physique dite particulaire a été l'une des premières méthodes de simulation physique à avoir été introduite en synthèse d'images avec les premières simulations de corps déformables [Luc84][Mil88] et de fluides [MP89][Ton91]. L'essentiel des activités de recherche s'est ensuite très vite focalisé sur la modélisation de corps solides rigides ou déformables, conduisant au développement de moteurs de simulation physique comme *Havok*, *Open Dynamic Engine*, etc. d'abord basés sur la physique du solide et qui n'ont intégré la modélisation physique particulaire que récemment et à la marge [EL07]. Les grands logiciels d'animation 3D, quant à eux, tels que *Maya*, *3DStudio Max*, *Blender*, *Lightwave*, etc., ont introduit la modélisation physique en l'accolant à leur philosophie de base : la modélisation géométrique. Les

procédés invoqués ont alors été tout d'abord la physique du solide, puis les structures masses-ressorts plaquées sur un maillage géométrique pour la simulation d'objets géométriques déformables. La modélisation physique particulaire y fait ensuite son apparition, sous le vocable de «systèmes de particules», pour représenter des effets comme des explosions, fumées ou tornades. Mais là encore, la modélisation de phénomènes naturels s'est très vite tournée vers des modèles développés au cas par cas (en anglais : *one shot model*) : effets de fumées [FSJ01], de flammes [NFJ02], ou de liquides [EMF02], pour n'en citer que quelques-uns.

Dès 1973, Greenspan [Gre73] introduit une vision plus générale de la modélisation physique particulaire sous l'intitulé de «Discret Modeling» puis de «Particle Modeling» [Gre97]. Il démontre qu'une vision discrète de la matière permet de modéliser sous le seul format de masses ponctuelles reliées par des interactions de type Lenard-Jones, une large panoplie de phénomènes physiques et d'effets dynamiques. Cette approche¹¹ a été généralisée par [CLF84][Luc91] sous le terme de réseaux masses-interactions, puis présentée par [Luc04] sous le terme de réseaux newtoniens. Une première généralisation a consisté à formuler de manière modulaire et générique la notion d'interaction, en introduisant deux types de fonctions d'interaction complémentaires démontrées comme nécessaires et suffisantes : (1) les fonctions d'interactions potentielles non dissipatives dépendant, linéairement ou non, de la distance et (2) les fonctions d'interactions dissipatives dépendant, linéairement ou non, de la vitesse. Le formalisme masses-interactions constitue, du fait qu'il accorde une même importance aux interactions potentielles et aux interactions dissipatives, une première généralisation des modèles de Greenspan, chez qui les interactions dissipatives ne font pas partie du formalisme de base et sont rajoutées au cas par cas. Or, ces dernières jouant un grand rôle structurel dans les systèmes dynamiques, il est en effet nécessaire d'en disposer comme élément de modélisation à part entière. Une deuxième généralisation a consisté à représenter un modèle physique masses-interactions en réseaux d'automates. Dans

⁽¹¹⁾ Une première réalisation du concept de modélisation particulaire a été formulée dans le groupe Computational Fluids Dynamics du Los Alamos National Laboratory sous l'acronyme PIC, pour Particles in Cell par Harlow en 1957. Evans, M. W. and Harlow, F. H., «*The Particle-in-Cell Method for Hydrodynamic Calculations*». Los Alamos Scientific Laboratory report LA-2139 (November 1957).

ces réseaux, chaque fonction, fonction d'inertie ou fonction d'interaction, est portée par un composant calculant une équation différentielle élémentaire, et connectable aux autres composants. Cette vision est proche des modèles dits à constantes localisées (en anglais *lumped models*) tels qu'ils sont par exemple formulés dans les réseaux de Kirchhoff en électricité. Différemment des formulations continues de la physique, ce type d'écriture en réseaux offre l'avantage de rendre calculable un grand nombre de non-linéarités. Différemment de la vision masses-ressorts ou des méthodes de simulation par éléments finis, la formulation «réseau de masses-interactions» est une formulation sans maillage (*meshless*, en anglais) qui permet de traiter des couplages non contigus spatialement, comme des interactions à longue distance ou des interactions ne dépendant pas de la distance, de manière homogène aux autres interactions. En conséquence, on dispose ainsi d'un formalisme d'une grande généricité pour modéliser une grande variété de phénomènes dynamiques.

3.3. Trois décadrages successifs en matière de philosophie de la forme et du mouvement

Ces évolutions technologiques portent trois décadrages fondamentaux en matière de philosophie de la forme et du mouvement : le premier est celui de la régression de la forme spatiale vers le point, entité spatiale sans forme ; le deuxième est le point de départ d'une modélisation générique du mouvement, qui partant du point, va permettre de réopérer une émergence dynamique de la forme ; le troisième est la distance prise avec la mimesis – ou d'un quelconque réalisme objectif – par la disjonction entre le point spatial et le point dynamique, pour aller ensuite vers leur réassemblage afin de construire des effets visuels quelconques, qu'ils puissent être connus ou seulement imaginés.

a. De la forme spatiale au point

Dans l'histoire de la synthèse d'images, l'élargissement de la palette de formes modélisables a conduit à un raffinement de la discrétisation de la forme spatiale jusqu'à son stade ultime : le point géométrique. La modélisation de formes spatiales par points (en anglais : *Point-based models*) est aujourd'hui une rubrique à part

entière de la synthèse d'images. Mais la forme ne peut se reconstruire à partir du point seul, et il devient alors nécessaire de reconstruire les relations spatiales sans lesquelles il n'y a pas de forme. P. Klee résout cette difficulté en faisant appel à la trace en tant que mémoire du mouvement. C'est en effet par ce biais que le point graphique devient forme et structure l'espace, qui prend alors le nom d'espace plastique. Ce qui signifie que, dès lors que l'on rajoute le mouvement au point, une structure spatiale peut être générée à partir d'un élément – le point – qui n'en a pas. Une autre manière est de reconstruire les relations spatiales ente points, grâce à des procédés géométriques ou à la modélisation topologique. Nous reviendrons plus loin sur cet aspect.

b. Le point matériel ou masse ponctuelle : la naissance du mouvement

Derrière le mot «point», deux notions radicalement différentes se confondent. La plus usitée est celle de point géométrique. Ce point-là condense beaucoup de propriétés, hormis une : la potentialité de mouvement. Ainsi, dans son ouvrage fondateur «du point et de la ligne rapportées au plan», [Kan26], W. Kandinsky pose le point géométrique comme le degré zéro de la forme puis de l'espace : «Le point géométrique est un être invisible. Il doit donc être défini comme immatériel... Extérieurement, nous pouvons définir le point comme la plus petite forme de base... Intérieurement, le point est la forme la plus concise». A l'inverse, le point dit «matériel» de la physique, appelé aussi masse ponctuelle, est d'abord une inertie, c'est-à-dire une potentialité de mouvement. Ce concept fut inventé au XVIIème siècle, comme nécessité historique. Sans lui, il aurait été impossible de modéliser le mouvement à un niveau plus abstrait que les descriptions géométrico-cinématiques de Kepler ou de Descartes. Le point matériel, ou inertie, est donc l'entité la plus petite à partir de laquelle le mouvement peut naître. Le simple ajout du qualificatif «matériel» au terme «point», ou symétriquement du qualificatif de ponctuel au terme «inertie», nous propulse d'un espace sans mouvement à un espace intrinsèquement dynamique. Ainsi et au plus simple, le mouvement naît d'un point, pour peu qu'il soit «inertiel», même s'il est sans forme.

c. Modèles ad hoc et modèles constructibles : au-delà du réalisme objectif, des bases pour un outil de création

Les modèles physiques tels qu'ils sont pratiqués dans le domaine scientifique et en particulier dans le domaine de la synthèse d'images restent sur le terrain de la mimesis. Ils cherchent avant tout à reproduire. C'est la raison pour laquelle ils ne sont guère considérés dans le champ des préoccupations artistiques. En revanche, les modèles physiques particulaires de type réseaux masses-interactions ont pour raison première d'être constructibles, ce qui est une condition nécessaire pour être la base d'un outil de création. Ainsi, au-delà de l'usage habituel du modèle physique pour atteindre un plus grand degré de réalisme, le paradigme de la modélisation physique masses-interactions est d'abord et avant tout un puissant formalisme pour modéliser des mouvements quelconques, réels ou imaginés, expérimentés et expérimentables, par l'artiste lui-même. Ils se présentent comme un à construire et donc s'inscrivent dans le champ de la libéralité artistique.

4. Dualité forme – mouvement

Les relations entre la forme et le mouvement, captées à partir du réel comme le fait le cinéma, ou reconstruite par le spectateur comme dans le dessin, la peinture ou la sculpture, sont une question première des arts visuels. Elles prennent une ampleur considérable de nos jours dès lors que les outils de production et de création du mouvement ont amplifié les promesses du cinéma et que des passerelles sont ardemment expérimentées entre les arts visuels et les arts plus classiquement connus comme arts du temps que sont la musique et la danse. On peut donc imaginer que les outils actuels de modélisation et de simulation permettront de débroussailler ce questionnement un cran au-delà, au moins sur trois aspects : dissociabilité de la forme et du mouvement dans les technologies actuelles, multimodalité intrinsèque à l'image, relation espace plastique-espace kinesthésique dans les arts plastiques.

4.1. Dissociation forme — mouvement dans les modèles masses-interactions

Le processus de descente vers le point en tant qu'élément de discrétisation ultime de la forme induit une nouvelle question fondamentale: celle du retour à la forme et de sa redécouverte, en particulier ici, dans le contexte d'un espace dynamique.

Dans la synthèse de formes visuelles, ce problème s'est posé dès l'origine de la modélisation particulaire non physique [Ree83] dont le propos était d'avoir accès à des formes très peu structurées comme des broussailles ou des formes provoquées par des feux d'artifices. L'obtention de ces effets a conduit à descendre vers des éléments de discrétisation spatiale de plus en plus petits et de plus en plus élémentaires : du volume à la facette, puis finalement au point. Mais le passage au point comme élément de discrétisation d'une forme est cependant un passage critique, puisque le point est un élément topologique de dimension zéro, duquel toutes notions de forme et de spatialité, autrement dit toutes notions de structures spatiales, sont exclues. C'est d'ailleurs à ce prix qu'il offre l'avantage de pouvoir recréer toute forme, de quelque nature ou structure qu'elle soit.

Dans la synthèse de mouvement par modèle physique, tant que l'on utilise des modèles physiques procédant de la physique des solides rigides ou déformables, la question du passage à la forme ne se pose structurellement pas, ou peu. Elle est le point de départ du processus de modélisation. Dans la physique du solide rigide, elle est portée par les équations des moments. Dans les solides déformables, les méthodes telles que celles de la décomposition en éléments finis procèdent à un maillage de la forme, et assurent ainsi les conditions de contiguïté de la matière dans les calculs physiques. Ce n'est plus du tout le cas dans un modèle physique particulaire masses-interactions. En effet, il existe deux différences fondamentales entre la représentation physique particulaire masses-interactions d'un phénomène et sa représentation spatiale. Elles portent (1) sur le nombre de points nécessaires dans chacune des représentations et (2) sur les relations entre ces points.

En ce qui concerne le nombre de points, la discrétisation de la matière en masses

ponctuelles pour représenter le mouvement nécessite un nombre de points a priori différent et en général inférieur à celui nécessaire à la représentation spatiale de l'objet ou du phénomène. Ainsi, par exemple, il suffit d'une masse ponctuelle placée au centre de gravité d'un pendule sphérique pour représenter son mouvement alors que la description de sa forme spatiale nécessite de créer de nombreux points à sa surface ou dans son volume. La géométrie et, au-delà, le rendu visuel travaillent donc en général à une résolution spatiale supérieure à celle du comportement dynamique. La stratégie de modélisation dans le modèle physique consiste à ne définir que le nombre de points nécessaires et suffisants pour obtenir le mouvement désiré, pour des raisons conceptuelle d'économie de représentation, pragmatique de temps de calcul, et de stabilité des simulations numériques. Intervient alors la notion de «modèle minimal» qui est le modèle physique composé du nombre minimal de points matériels et d'interactions, pour un phénomène dynamique donné.

En ce qui concerne les relations entre les points physiques, partant d'un objet matériel ou d'un phénomène à modéliser, la modélisation des comportements dynamiques consiste en une condensation en points matériels couplés par des interactions physiques. Ces interactions ne représentent pas seulement des contiguïtés matérielles ni même nécessairement des relations spatiales. Certaines interactions peuvent représenter des couplages fonctionnels, sans présence de matière, C'est le cas des attractions à distance ou des interactions visqueuses. C'est le cas également lorsque le modèle physique est utilisé pour représenter des comportements non matériels tels que l'ont proposés Helbing [Hel92] et Heigeas et al. [HLTC03] dans la modélisation de comportements de foule par masses ponctuelles en interaction.

On voit donc bien que la stratégie de modélisation diffère profondément entre la modélisation des structures spatiales qui se définissent en termes de contigüité ou de proximité, c'est-à-dire de topologies spatiales, et la modélisation des structures dynamiques, basées principalement sur des notions d'interaction, de couplage, d'influences dynamiques mutuelles, de résistance ou de propension au mouvement.

4.2. Forme et mouvement : l'image comme multimodale

Nous avons montré que l'ordinateur, par ses doubles capacités de modélisations géométrique et physique, se révèle être le premier outil qui nous permet d'avoir accès d'une part à la forme pour elle-même et d'autre part au mouvement pour lui-même. Une première propriété de la synthèse numérique est la possibilité de dissocier ces composantes. D'une manière plus générale, alors que la forme, le mouvement, le son, les réactions optiques sont a priori difficilement dissociables dans le monde mécanooptique, leur dissociabilité est par nature possible dans le monde de la représentation numérique : les procédés de synthèse de formes peuvent être totalement dépourvus de processus de mouvement, on peut n'y manipuler que de la géométrie. Il en est de même des procédés de synthèse de sons qui peuvent être totalement abstraits de la forme des corps sonores. Il en est également de même des procédés de synthèse du mouvement, par lesquels celui-ci peut sans aucune difficulté se satisfaire de formes extrêmement minimales comme des points sans formes ni traces. Cette dissociabilité, qui pourrait à première vue apparaître comme négative, offre néanmoins une nouveauté sans précédent : celle de pouvoir penser le mouvement sans la forme, d'apprendre à voir le mouvement sans la forme, et même à voir le mouvement sous diverses formes. Par conséquent, nous sommes à un instant historique unique qui nous permet de disposer d'un outil expérimental pour abstraire le mouvement de l'unicité triviale de l'objet, de le séparer de la figure, et de le penser pour lui-même, comme le suggèrent déjà certains termes linguistiques.

Dans ce contexte, la mise en relation entre formes et mouvements se pose d'une manière nouvelle comme devant être construite et non donnée a priori. Elle relève non pas d'une *physis*, c'est-à-dire d'un étant donné, mais d'une mathématé, c'est-à-dire d'un étant construit. Notre hypothèse consiste alors à considérer la relation de la forme et du mouvement comme une question de être multimodalité. Le domaine des images animées produites par modèle physique peut ainsi être considérablement élargi, si l'on considère le mouvement et la morphologie comme deux modalités distinctes de production et de perception que l'on fait coopérer. Cette hypothèse a été suggérée par des expériences élémentaires dès la thèse de A. Luciani [Luc85], dans lesquelles des formes différentes ont été appliquées à des mouvements identiques.

Ainsi, la figure 1 montre des animations d'un même modèle physique de masses ponctuelles suspendues à des fils élastiques et qui s'entrechoquent, ou seules les visualisations changent.

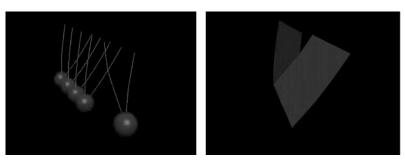


Figure 1 : Expériences MIMESIS : un même modèle physique pour plusieurs visualisations : visualisation «boules du pendule de Newton» (à gauche) et visualisation «drap suspendu» (à droite). http://www.aicreativity.eu

Ces expériences simples portent trois enseignements :

- L'un est que les changements topologiques affectent l'identification du modèle physique sous-jacent, jusque parfois à le masquer totalement.
- L'autre est que le changement de représentation visuelle permet de concevoir des modèles physiques souvent plus simples, qui ne viennent pas à l'esprit lorsque l'activité de modélisation consiste en une sorte de copie de l'objet. Ainsi, changer ad libitum la représentation visuelle, en travaillant séparément sur les aspects topologique, géométrique et optique, aide à percevoir la dimension temporelle, et donc à lui trouver un modèle adapté; Elle aide à abstraire le mouvement de la forme.
- Enfin, qu'en aidant à abstraire le mouvement de la forme et la forme du mouvement, puis à penser leur association libre, les technologies numériques de modélisation de la forme et celles de modélisation du mouvement, offrent à l'artiste des possibilités de création visuelle véritablement nouvelles, car strictement impossibles à explorer dans les technologies mécano-optiques.

La dissociation volontaire entre forme et mouvement est donc un élément de créativité révolutionnaire pour l'observation et l'imagination du mouvement ainsi que de la trouvaille de son (ses) modèle(s) physique(s).

4.3. Espace plastique — espace kinesthésique : un problème structurel dans les arts visuels

Pour nous, comme pour de nombreux psychologues, artistes ou philosophes, la dimension temporelle se rapporte à la kinesthésie, qui elle-même se rapporte au corps et à la matière [Luc96]. C'est pour cela qu'elle serait commune à toutes les dimensions sensibles et que tant de rapprochements ou de comparaisons ont été tentés entre les arts visuels, les arts musicaux ou les arts chorégraphiques. Or, cette évidence n'est que d'apparence, car elle a l'immense inconvénient de ne pas être opératoire, en tout cas pour les arts visuels. En effet, dès lors que l'on tente de les conjuguer en dehors du champ de leur naturalité, l'espace kinesthésique et l'espace plastique apparaissent comme étant de nature différente. L'espace kinesthésique, qui est celui du corps, du geste, des forces, des appuis, de ripages, des dérives, des insistances, est marqué par une dominance de la modalité temporelle, dynamique et intensive. On y sait clairement ce qui est plus ou moins fort, plus ou moins intense. A l'inverse, les «où», «depuis où», «jusqu'où», y sont plus confus. Dans l'espace de la représentation plastique, celui de la toile, du plan, de l'espace, les modalités spatiales et extensives sont nécessaires et premièrement prégnantes. Partant, la construction visuelle c'est-à-dire l'image – naîtrait d'une convolution entre un espace kinesthésique, caractérisé par un poids plus marqué de l'intensif, et un espace plastique, caractérisé par un poids plus marqué de l'extensif. Le geste, homéomorphe au mouvement en ce sens qu'il encode l'intensif duquel le mouvement dérive, est convolué avec la représentation figurale plastique, elle-même homéomorphe à la forme spatiale en ce sens qu'elle encode l'extensif duquel cette dernière dérive (figure 2).

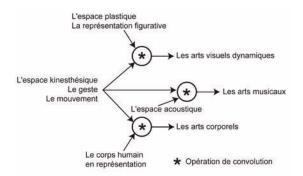


Figure 2 : Relation entre espace kinesthésique et espaces plastique, acoustique et corporel

La coopération entre espace kinesthésique et espace plastique, en dehors d'une naturalité corporelle qui intègre indissociablement les deux, n'est donc de toute évidence pas triviale. L'hypothèse que nous formulons ici est qu'il n'y a pas de méthodes universelles de passage de l'espace dynamique à l'espace plastique, alors même qu'il existe des méthodes assez génériques, mais séparées, de création de dynamiques et de création de formes. Partant du mouvement, nous pourrions donc reformuler ainsi la question : comment le mouvement, le geste, la kinesthésie, peuvent-ils *prendre forme* ?

Nous examinons, au paragraphe 6, trois familles de procédés – habillage géométrique, habillage topologique et habillage dynamique – que nous estimons suffisamment complémentaires pour constituer une base de travail pour la création artistique dans les arts visuels dynamiques. Puis, au paragraphe 7, nous présenterons des exemples de mises en œuvre dans des créations artistiques.

5. Technologie pour la création du mouvement : CORDIS-ANIMA et MIMESIS

En réponse à la problématique de l'émergence d'un art visuel du mouvement et, pour ce faire, de la nécessité du développement d'outils informatiques pour sa création, les solutions que nous proposons sont d'une part un formalisme de modélisation CORDIS-ANIMA et d'autre part un modeleur interactif MIMESIS pour l'usage de ce formalisme de modélisation par l'artiste plasticien.

5.1. Variables intensives et variables extensives dans CORDIS-ANIMA

Les réseaux masses-interactions implantés dans CORDIS-ANIMA formulent de manière explicite un concept fondamental pour la modélisation du mouvement : celui de variables duales, concept qui découle des deux inventions fondamentales de la science physique, telles que formulées rationnellement par Newton, la notion de force et le principe d'action-réaction. Ce formalisme introduit en effet explicitement

deux types de variables : les variables extensives et les variables intensives. En mécanique, l'exemple type de la variable extensive est la position dans l'espace et l'exemple type de la variable intensive type est la force¹². Ces variables sont duales en ce sens que les propriétés de l'une et de l'autre sont strictement complémentaires et que toute relation physique est une relation qui les relie. La variable intensive, la force, supporte la représentation d'une interaction, et pose le formalisme newtonien comme intrinsèquement interactionnel.

5.2. La modularité dans CORDIS-ANIMA

La formulation explicite de ces deux types de variables, intensives et extensives, en tant que variables duales dans CORDIS-ANIMA conduit à définir deux types, et seulement deux types, de composants élémentaires, appelés MAT et LIA, entre lesquels circulent les variables duales force et positions (Figure 3). Ces composants MAT et LIA sont également duaux par le fait que les entrées des MAT sont des variables intensives et celles des LIA des variables extensives, et vice-versa, les sorties des MAT sont des variables extensives et les sorties de LIA des variables intensives. Enfin, ces modules sont construits pour satisfaire, dès le niveau élémentaire, les deux règles fondamentales de tout système physique : la sommation des variables intensives et le principe d'action-réaction. Dans CORDIS-ANIMA, le premier est réalisé dans les modules MAT et le second dans les modules LIA.

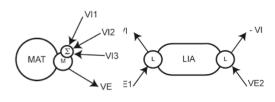
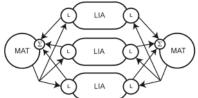


Figure 3 : A gauche : Module élémentaire MAT. Calcul d'une variable extensive sortante à partir d'une variable intensive entrante et satisfaction de la sommation des variables intensives entrantes. A droite : Module élémentaire LIA. Calcul de deux variables intensives sortantes à partir de deux variables extensives entrantes et satisfaction du principe d'action — réaction sur les variables intensives sortantes.

⁽¹²⁾ En électricité, deux exemples types sont la différence de potentiel électrique pour la variable extensive et l'intensité électrique pour la variable intensive.

Ainsi, en CORDIS-ANIMA, un modèle physique est un réseau d'automates différentiels élémentaires (Figure 4)¹³.

Figure 4 : Un réseau CORDIS-ANIMA dans lequel deux masses MAT1 et MAT2 interagissent par trois interactions LIA1, LIA2, LIA3



5.3. CORDIS-ANIMA : un formalisme de réseau d'automates différentiels élémentaires non-linéaires

Les composants duaux MAT et LIA effectuent chacun un type de calcul différentiel élémentaire.

Les MAT calculent des comportements propres, tels que des comportements inertiels, représentés par une équation différentielle d'ordre $2 \text{ f} = \text{m.d}^2 \text{x}/\text{dt}^2$.

Les LIA calculent des interactions dissipatives et potentielles d'ordre différentiel respectivement 1 et 0, et du type générique respectivement : f = z.dx/dt et f = k.x. Les modules LIA les plus simples représentent des comportements linéaires : MAS, RES, FRO, REF pour les comportements inertiels, élastiques, visqueux et viscoélastiques. Cependant, la connexion de ces types de comportements élémentaires de la manière décrite ci-dessus, conduit à un réseau d'automates différentiels qui permet d'introduire un grand nombre de non-linéarités, fréquentes dans la plupart des phénomènes dynamiques et de les calculer plus aisément que dans une formulation continue. En effet, alors qu'une formulation continue conduit à des équations différentielles non ordinaires qui sont la plupart du temps difficiles à résoudre numériquement, la formulation réseau permet de les introduire par la définition de modules d'interaction

⁽¹³⁾ Illustrons le réseau présenté à la figure 4 par un exemple concret : Supposons que nous souhaitions modéliser le mouvement d'un point A oscillant de manière amortie autour d'une position et pouvant venir heurter un sol. MAT1 représenterait l'inertie de ce point. MAT2 représenterait un point fixe. LIA1 représenterait l'interaction élastique liant le point A (MAT1) au sol (MAT2), et responsable de l'oscillation. LIA2 représenterait l'interaction visqueuse liant le point A au sol et responsable de l'amortissement. LIA3 représenterait une butée entre le MAT1 et le sol MAT2, qui lorsque la distance entre MAT1 et MAT2 serait inférieure à un seuil, provoquerait une répulsion donc un rebond. Les forces en provenance de tous les LIA sont sommées sur les deux MAT. Les positions de chacun des MAT sont envoyées sur chacun des LIA de manière à calculer pour chacun des LIA leurs deux forces (+Fi, -Fi) qui seront renvoyées à nouveau sur les MAT.

élémentaires non linéaires calculables séparément. Pour ce faire, CORDIS-ANIMA dispose d'une formulation générale pour les interactions non linéaires sous la forme d'un module LIC (Liaison Conditionnelle), module LIA basé sur un automate d'état complètement paramétrable, qui permet à l'utilisateur de modéliser lui-même une vaste panoplie d'interactions non linéaires. En complément de ce module très générique, CORDIS-ANIMA propose une librairie d'interactions non linéaires de profil prédéfini qui correspondent aux grands types d'interactions physiques le plus fréquemment rencontrées, telles que attraction, répulsion, collision, cohésion, plasticité, frottement, viscosité dont quelques exemples sont illustrés dans la figure 5.

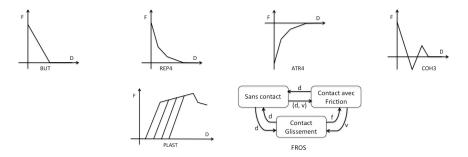


Figure 5 : Quelques fonctions d'interactions non linéaires dans CORDIS-ANIMA.

En haut : interactions élastiques sans mémoire (butée, répulsion, attraction, cohésions).

En bas : interactions élastiques à mémoire (plasticité avec hystérésis) et interaction non linéaire dissipative de frottement sec.

5.4. MIMESIS : un outil de création interactif du mouvement

MIMESIS se distingue des modeleurs dans le domaine de l'image de synthèse et de l'animation par le fait que son objet d'intérêt au sens de l'Interaction Homme-Machine [Schn83] est non pas la forme, mais le *mouvement*, ou plutôt, le modèle qui le génère. Ainsi, la notion d'objet, prépondérante dans les modeleurs de forme, est absente à tous les niveaux de l'interface de modélisation interactive de MIMESIS. S'y substitue la notion de «réseau», dans laquelle un modèle est un réseau constitué de modules CORDIS interconnectés [ELC06].

Considérant que l'artiste travaille au plus près des fonctionnalités de l'outil, voire même qu'il travaille les fonctionnalités de l'outil, une contrainte essentielle pour être non seulement un outil de modélisation mais aussi un outil de création est que les fonctionnalités de l'outil de conception des modèles ne doivent pas masquer

leurs principes de base. C'est pourquoi MIMESIS invite l'utilisateur à manipuler directement la composition en réseau des MAT et LIA. Ce choix conceptuel conduit l'artiste à agir et à comprendre au niveau même des concepts philosophiques fondamentaux du système tels que les notions de variables duales intensives et extensives. Pour faciliter le travail de modélisation, complexe lorsqu'il s'agit de modélisation physique, l'interface utilisateur de MIMESIS est structurée pour rendre explicite les quatre étapes nécessaires pour ce type de modélisation: (1) La phase PSQL (PréStructuration Qualitative,) dans laquelle la structure du réseau CORDIS-ANIMA est définie; (2) La phase PSQN (PréStructuration Quantitative), dans laquelle les paramètres physiques de chaque module du réseau sont donnés ; (3) La phase CI (Conditions initiales), où sont données les valeurs des variables d'état initiales de chaque module du modèle ; (4) La phase HABILLAGE qui consiste à définir une forme spatiale et son contrôle par le modèle physique; (5) Enfin, la phase JEU, durant laquelle le modèle est simulé et le mouvement est généré, en temps réel ou différé, avec ou sans intervention gestuelle de l'utilisateur¹⁴. Pour illustrer la nécessité de cette structuration comme guide à la modélisation, prenons l'exemple du réglage des conditions initiales. Le réseau de MAT et de LIA constituant le modèle calcule un ensemble d'équations différentielles, linéaires ou non, ordinaires ou non. De ce fait, il est un système dit sensible aux conditions initiales, susceptible de présenter une grande variabilité de comportements, du chaotique à l'émergent. Pour que l'utilisateur puisse maîtriser cette variabilité, il est nécessaire que son attention puisse se focaliser explicitement sur l'un des lieux critiques de cette maîtrise : les conditions initiales du système dynamique.

5.5. Synthèse et exemples

Les différents concepts décrits ci-dessus implantés dans CORDIS-ANIMA et rendus accessibles à l'utilisateur par MIMESIS supportent un ensemble de propriétés essentielles nécessaires à la construction d'un outil de création pour la génération du mouvement visuel.

⁽¹⁴⁾ La notion de simulation interactive multisensorielle instrumentale, qui repose en particulier sur des systèmes à retour d'effort et des implantations temps-réel dur synchrone du formalisme CORDIS-ANIMA, est un autre axe de recherche fondateur du groupe ACROE-ICA. Il n'est toutefois pas développé dans cet article.

Dans le propos qui nous préoccupe principalement de la recherche d'un lien tempsespace, les notions de variables duales intensives et extensives, rendues explicites dans le formalisme, proposent une relation organique entre espace et temps. L'espace est intimement lié à la notion de variables extensives : positions, déplacements et vitesses. La notion de force est un descripteur mathématique qui permet de corréler implicitement ces variables au cours du temps, via des équations différentielles temporelles. Par conséquent, bien au delà de la modélisation telle qu'elle est pensée de manière classique pour représenter des choses de la nature, il n'y a plus ici d'opposition entre espace et temps. Ce formalisme bénéficie d'au moins trois des propriétés connues d'un réseau et qui sont essentielles à tout outil de création : la généricité, la modularité, et le maintien de la cohérence du modèle au cours de sa construction par l'utilisateur.

La première propriété de modularité s'exprime par le fait de pouvoir le construire pas à pas par complexification progressive, différemment de la formulation équationnelle usuelle qui doit d'emblée être complète. Cette propriété est fondamentale pour un outil de création qui doit permettre à tout utilisateur de fabriquer ce qu'il souhaite par assemblage - ou composition - de composants. La deuxième propriété de généricité s'exprime par le fait que la mise en réseau de comportements élémentaires conduit à une approche de type «réseaux d'automates différentiels», dont on sait qu'ils permettent de modéliser une grande variété de comportements dynamiques. Cette seconde propriété est également essentielle pour un outil de création puisque l'activité artistique a pour objet de créer des effets nouveaux et ne peut donc pas se restreindre à des effets donnés ou limités. La troisième propriété est que l'utilisateur construisant un réseau ne manipule pas des équations. Celles-ci sont incluses dans le module utilisé. Cependant, la syntaxe de ces modules MAT et LIA et de la manière dont ils se connectent est telle que l'utilisateur fabriquera ainsi toujours un réseau physiquement cohérent qui satisfera toujours le principe d'action-réaction. L'utilisateur est donc soulagé à la fois de la formulation équationnelle et de la gestion de la cohérence physique entre ces équations. Cette propriété est essentielle puisque l'activité artistique contient nécessairement une phase de concentration intense sur les effets recherchés et non sur leur mise en œuvre mathématique ou algorithmique.

Ces trois principes ont permis de générer une vaste panoplie d'effets dynamiques avec un seul formalisme et un seul type de savoir-faire dont quelques exemples sont donnés à la Figure 6 ci-après : muscles [DLC93], corps rigides articulés [CL95], déformables [CLH96], turbulences [LHD95], fractures [LG97], cellules biologiques [BL03], avalanches [LHM95][Luc00], pâtes [GLN03], foules [HLTC03], ou de mouvements dansés [HL05].

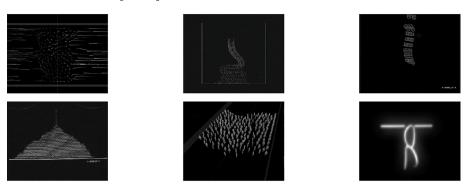


Figure 6. Modèles physiques basés sur la philosophie des réseaux masses - interactions CORDIS-ANIMA : turbulences, pâtes, fractures, sables, foules, mouvements dansés. http://www.aicreativity.eu

6. Technologie pour la mise en forme du mouvement

Comme nous l'avons vu précédemment, le modèle physique masses-interactions produit un nuage de points en mouvement, qui n'ont ni formes spatiales ni relations spatiales explicites. En conséquence, il faut procéder à une mise en formes spatiales des mouvements générés.

De nombreux algorithmes ont été développés dans le domaine de la synthèse d'images pour résoudre le problème du passage du point à la forme. Ils consistent à appliquer plus ou moins directement une forme aux points : utilisation des points comme sommets d'un maillage [DSB99], courbes et surfaces paramétriques contrôlées par ces points, treillis support de déformation de formes libres [Coq90], squelettes [BL99], fonctions globales de déformation, expansions des points par ajout de primitives géométriques volumiques ou par surfaces implicites statiques [Bli82] [Can98]. Pour chacun de ces procédés, des méthodes spécifiques de rendu visuel de tel ou tel objet ou phénomène ont été proposées, en particulier en lien

avec la représentation de phénomènes naturels. Certaines de ces méthodes sont incluses dans des logiciels de modélisation qui se séparent grosso modo en deux catégories : les nombreux logiciels 3D et les logiciels de géométrie algorithmique, dont un des exemples les plus connus est la librairie CGAL. Ces logiciels, librairies et algorithmes constituent des outils volumineux, intégrant une somme de connaissances et de développements technologiques conséquente et qu'il serait totalement illusoire d'intégrer dans MIMESIS. Nous présentons trois types de méthodes complémentaires qui, bien qu'elles soient encore objet de recherche, ont déjà été utilisées dans des créations artistiques :

- La mise en forme du mouvement par habillage morphologique contrôlé par les mouvements générés,
- La modélisation des structures spatiales par modélisation topologique avant leur mise en forme géométrique,
- La mise en espace du mouvement par son empreinte sur un milieu actif.

6.1. Habillage géométrique

Nous avons discuté précédemment de l'intérêt de la séparabilité de la forme et du mouvement offerte par les outils de synthèse d'image et de mouvement actuels. Une situation éminemment nouvelle permise par cette séparabilité est de permettre de voir un même mouvement invariant sous plusieurs formes, et ainsi de mieux l'observer afin de mieux identifier les propriétés qui lui sont intrinsèques, et in fine de l'appréhender comme objet de perception pour lui-même. On se trouve ici dans le domaine de l'image, dans une situation similaire à l'expérience de l'écoute acousmatique fondée par Pierre Schaeffer, et à l'origine de la notion d'objet sonore, dans laquelle l'enregistrement du son permet de parler du son lui-même [Scha77]. L'opération de mise en forme n'est donc pas uniquement la phase finale de la modélisation. Elle participe à la formation de la sensibilité du regard au mouvement.

La phase de mise en forme est donc partie intégrante de la modélisation. Il est donc nécessaire de disposer au sein même de MIMESIS de quelques fonctionnalités élémentaires de mise en forme des mouvements, à la fois pour des raisons pratiques de visualisation rapide du modèle pendant sa conception, mais également pour le

rôle fondamental joué par la visualisation dans la modélisation elle-même. Pour ce faire, MIMESIS dispose d'une fonctionnalité «Habillage» comprenant des procédures de mises en forme simples et suffisantes pour cet exercice. Il s'agit des primitives élémentaires de la géométrie 2D (lignes, polygones, etc.), de la géométrie 3D (sphères, ellipsoïdes, etc.), de la représentation de lignes et surfaces (splines, etc.) et de la géométrie algorithmique (maillages de Voronoi et de Delaunay, barycentres, enveloppes convexes, etc.). Ainsi, en pratiquant au sein même de MIMESIS des visualisations aussi différentes que possibles pour un même modèle physique, l'utilisateur sera conduit à découvrir les invariants du mouvement, ce qui lui sera d'une aide précieuse pour la mise au point de son modèle physique.

6.2. Habillage topologique

Comme nous l'avons montré précédemment, les modèles particulaires se caractérisent par une perte des informations topologiques qu'il faut donc nécessairement recréer. Ainsi, les graphes de mélanges dans les surfaces implicites [GW95] ont été introduits de façon à contrôler le mélange de formes. Plus généralement, toute modélisation particulaire consiste en une condensation d'une structure spatiale à des points, qui donc opère une suppression des relations spatiales. Par conséquent, le problème inverse de la condensation ponctuelle en œuvre dans toute modélisation particulaire consiste à reconstruire la structure d'un nuage de points. Il s'agit donc d'une étape nécessaire de modélisation de la topologie, avant même la modélisation de la géométrie. Cette étape de modélisation de la topologie est d'autant plus intéressante que la topologie est l'un des tous premiers caractères prégnants dans l'identification visuelle d'une scène ou d'un objet, puisque l'on identifie d'abord s'il y a une ou deux choses, si ces choses se recombinent ensuite en une seule ou au contraire se fracturent en plusieurs, si elles sont extensibles à l'infini (par exemple, un plan) ou se replient sur elles-mêmes (par exemple, une sphère), si elles ont des embranchements (par exemple un arbre) ou si elles sont monolithiques (ex. rochers) [Bru85] [Tho88]. En rétablissant explicitement, entre le point (et en ce qui nous concerne, le point matériel) et la forme, l'étage de modélisation topologique, nous pouvons ainsi espérer unir la modélisation dynamique d'objets non structurés (fumées, eau, etc.) et d'objets structurés (personnages, véhicules, objets manufacturés, etc.), en passant

par la modélisation des dynamiques spatio-temporelles de ceux qui se fracturent, se recombinent, se recollent ou se solidifient.

L'idée est alors d'associer un modèle topologique à un modèle physique comme l'on suggéré [LSM08], et différemment de ces auteurs, de faire contrôler les évolutions du modèle topologique par celles du modèle physique. L'intérêt de cette démarche est de donner à l'utilisateur la possibilité de modéliser non seulement les relations physiques mais également de modéliser et d'animer les relations spatiales elles-mêmes, qui ont été perdues ou qui n'existent pas dans le modèle physique. Il existe de nombreux modèles topologiques discrets capables de décrire les relations de voisinages, comme les relations d'incidence et d'adjacence entre les cellules topologiques (sommets, arêtes, faces, volumes). L'approche que nous avons choisie est celle des cartes généralisées ou G-cartes, de la famille des cartes combinatoires qui définissent les structures topologiques par des schémas logiques ou combinatoires. Diffusées par [Lie89] pour représenter des métamorphoses et des transformations, elles permettent de modéliser des topologies de manière constructive. Les axiomes élémentaires des cartes généralisées ou G-cartes sont les brins et des involutions entre brins, sur lesquelles se construisent des procédés opératoires de couture et de découture des composés brins/involutions que sont les arêtes, les faces ou les volumes (Figure 7.c).

La trame générale de création d'un modèle complet est alors la suivante :

- Création d'un modèle physique masses-interactions.
- Création de G-cartes modélisant des structures topologiques.
- Introduction d'un ensemble de capteurs délivrant des informations sur l'état de la simulation physique au cours du temps pour contrôler les modifications du modèle topologique.
- Association d'un modèle géométrique au modèle topologique et animation de celui-ci par les évolution produites par la simulation physique.

Sur cette trame générale, viennent se greffer les nécessités qui sont à l'origine de la dissociation mouvement et forme. Nous avons vu en effet précédemment que les points nécessaires au modèle physique pour définir le mouvement n'étaient ni en même nombre ni les mêmes que ceux nécessaires au modèle de la forme spatiale. Il est donc nécessaire d'introduire des procédures qui permettent d'animer plus de