points géométriques en aval que de fonctions d'évolution physiques disponibles en amont. Parmi les procédés existants, citons les FFD (*free-form déformations*) ou les RBF (*Radial basis Transform*). Nous avons vu également que les interactions physiques ne correspondent pas non plus nécessairement aux relations de contiguïté ou non-contiguïté spatiales. Il est donc nécessaire d'introduire des procédures qui permettent d'associer des changements d'état du modèle physique, via des capteurs susceptibles de les détecter, à des changements topologiques. Ces changements topologiques sont modélisés par un ensemble des modèles topologiques différents qui vont se succéder avant, pendant et après le changement d'états (Figure 7).

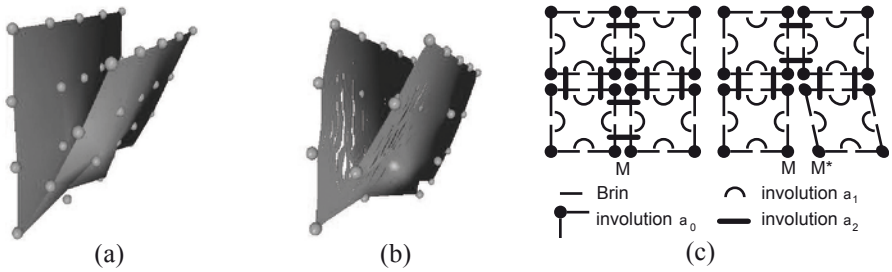

Figure 7 : Déchirure physico-topologique d'un tissu [DKSCL11]. http://acroe.imag.fr/LucianiTSI2012.htm

La Figure 7.a montre un tissu avant déchirure. Les points sont des masses ponctuelles et la topologie est celle d'un maillage dans lequel ces points sont les sommets des faces. La Figure 7.b montre le tissu après déchirures. Les déchirures adviennent suite à des tests d'élongation entre les points. Les modèles topologiques créés après les déchirures au cours du temps font intervenir des points nouveaux de part et d'autre des déchirures, ainsi que des découtures ordonnées de faces entre les deux côtés des déchirures (Figure 7.c) [DKSCL11].

6.3. Habillage dynamique

Dans les deux procédés d'habillages géométrique et topologique décrits ci-dessus, le mouvement est créé par le modèle physique et est mis en espace par les habillages statiques, l'un agissant au niveau de la forme, l'autre au niveau des organisations spatiales sous-jacentes à la forme. Nous avons mis en œuvre un troisième procédé, dans lequel l'habillage spatial est dynamique et inclut une interprétation dynamique

du mouvement [Hab97][SEL09]. Il s'agit d'utiliser les évolutions des masses d'un modèle physique amont pour influencer le comportement d'un milieu physique en utilisant la métaphore de l'empreinte ou de la gravure. La méthode dénommée *Gravure Dynamique* prend en entrée des signaux de mouvements et calcule leurs influences sur un milieu physique, qui sera ensuite visualisé. En voici brièvement le principe (Figure 9).

En chaque point de l'espace est attribuée une valeur, scalaire ou vectorielle. Celle-ci est calculée pour représenter un comportement dynamique. Dans l'implantation 2D du principe de la gravure dynamique décrite ici, l'espace est une surface plane dont le comportement de chaque point est calculé par un modèle physique élémentaire composé d'une masse fixe et d'une masse mobile en interaction physique, appelé phyxels (*Physical Element*), par analogie avec le terme Pixel (*Picture Element*) (Figure 9.a). L'espace est donc pavé de phyxels (Figure 9.b). Chaque phyxel est relié aux autres par des interactions physiques selon des topologies spécifiques (Figure 9.d). L'ensemble constitue un réseau CORDIS-ANIMA occupant tout l'espace utile. Enfin, chaque phyxel est en interaction physique avec des éléments externes (Figures 9.c et 9.d). Ces éléments peuvent être les masses mobiles d'un modèle physique masses-interactions amont. Partant d'un état d'équilibre dans lequel les valeurs en chaque point du milieu sont constantes, ces éléments viennent perturber cet état d'équilibre, et générer des évolutions du champ de valeurs. Dans le cas particulier où le milieu est une surface viscoélastique, il se comporte comme un support sur lequel les masses ponctuelles viennent laisser leur trace. Ces perturbateurs ont été appelés des «marqueurs», par similitude avec la notion de «marqueur» habituelle dans les arts graphiques et picturaux.

La maîtrise des comportements s'effectue par la modélisation du milieu et de ses interactions avec les marqueurs. La modélisation du milieu consiste à définir la nature, la topologie et les valeurs des interactions entre les masses représentant le milieu et qui lui confèrent des comportements dynamiques : propageant, diffusant, absorbant, rémanent, plastique, visqueux, etc. ainsi que toutes leurs combinaisons telles que diffusant-absorbant comme du papier buvard ou à mémoire comme le papier gardant la trace de la mine de crayon. Le couplage dynamique entre le modèle

physique ponctuel amont et son influence sur un milieu physique occupant l'espace s'effectue par la modélisation des interactions entre le milieu et les marqueurs. Par ce procédé, le mouvement d'un point sans forme a la capacité de s'étendre dans un espace lui-même dynamique. Dès lors, une infinité de comportements émergents sont possibles : depuis la trace par laquelle le point devient ligne, tâche ou surface, jusqu'au comportement dynamique le plus «mouvant» où des points viennent exciter la surface pour produire des figures en mouvement permanent. Comme dans MIMESIS, toutes ces interactions peuvent être de nature quelconque, donnant à l'artiste la liberté de modéliser lui-même le comportement dynamique du support et de sa relation dynamique au marqueur.

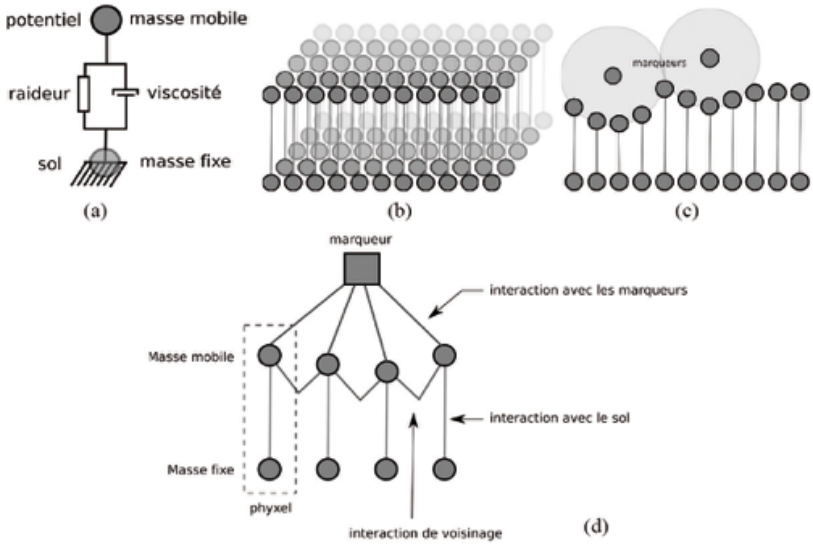

Figure 9 : Principe du procédé Gravure Dynamique. (a) le phyxel. (b) le champ de phyxels. (c) l'interaction phyxel – marqueur ; (d) les trois types d'interactions : interne au phyxel, entre phyxels, entre phyxels et marqueurs [SEL11].

Divers procédés de visualisation sont ensuite appliqués pour rendre visible ce milieu et ses déformations. Le cas le plus simple est de faire correspondre chaque phyxel à un pixel et de lui attribuer une couleur en fonction du déplacement de la masse mobile correspondante, par l'intermédiaire d'une fonction de transfert. Les images de la figure 10 illustrent quelques comportements de la gravure dynamique. Ce procédé est le point de départ de la mise en œuvre d'une relation dynamique entre des mouvements ponctuels à valeur plus intensive et leurs déploiements dans un espace, plus extensifs.

Bien que particulier, il est une première réalisation d'une réflexion visant à créer un espace plastique dynamique, en lien avec l'espace kinesthésique, selon l'analyse que nous avons développé précédemment, par une mise en œuvre de la notion de marqueur-milieu. Actuellement implanté sur carte GPU [SEL09], ce procédé est calculé en temps réel et a été expérimenté dans plusieurs démarches artistiques.

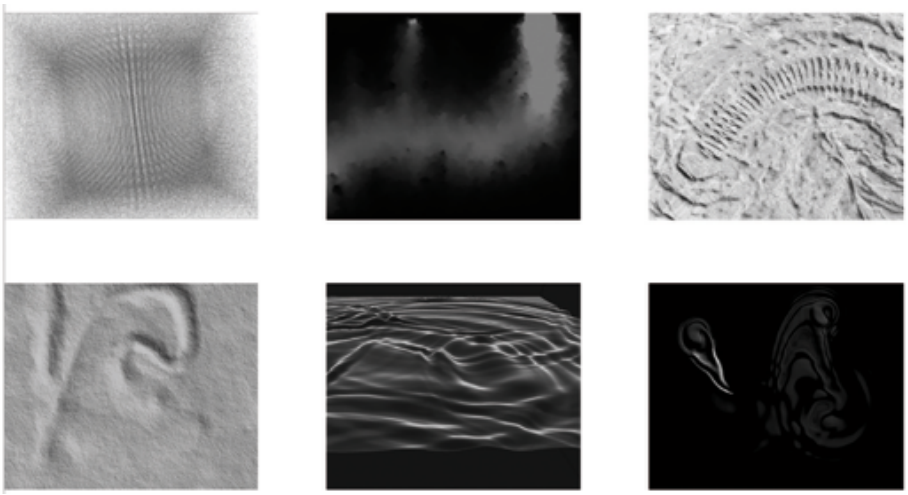

Figure 10 : Images produites par le procédé de gravure dynamique. De gauche à droite. En haut: franges d'interférences ; encre sur papier buvard vertical ; fossilisation avec rémanence infinie. En bas : Traces sur sable ; propagation aqueuse ; propagation huileuse. Images de K. Sillam [SEL09][Sil11]. http://www.aicreativity.eu

7. Œuvres artistiques

7.1. *Mémoires Vives*, de Annie Luciani

Les procédés ci-dessus de modélisation physique et de mise en forme ont soutenu une création visuelle et poétique de Annie Luciani, intitulée *Mémoires Vives* [Luc01] composée de 9 micromouvements organisés en 3 tableaux (Figure 12). L'objectif est de focaliser le regard sur des nuances dynamiques imperceptibles dans de longues narrations. Les séquences sont des micromouvements de trente secondes reliées silencieusement par un texte composé uniquement d'un nom et un adjectif, l'ensemble constituant le poème suivant :

Image

Respiration profonde d'une brève presque invisible

Infinis inaudibles

Persistances chimériques

Douloureux éclats

Image

Contre forme impalpable des résistances souffertes

Entailles cristallines

Gravures aériennes

Pulsations originelles

Image

Naissance de l'empreinte

Crissements des premiers silences

Cursives d'avant le verbe

Préambule de l'espace

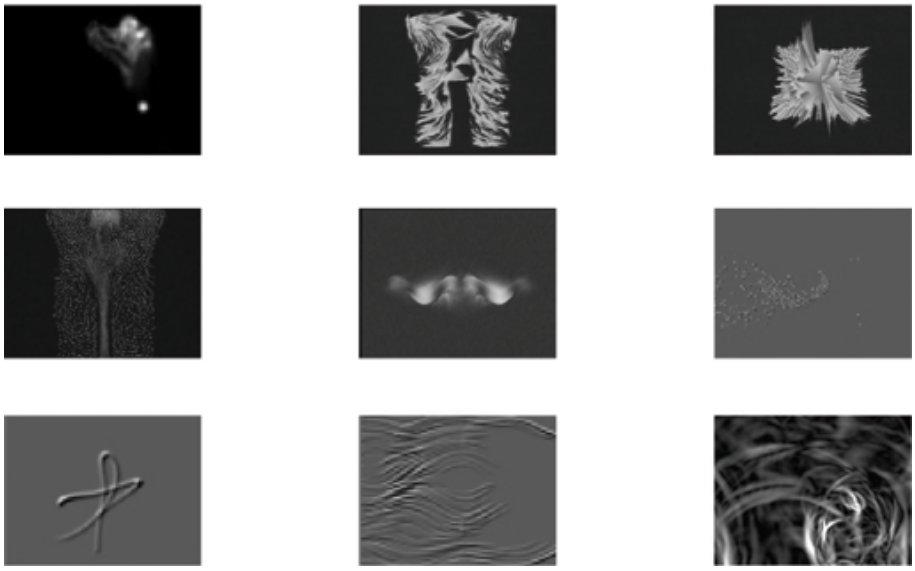

Figure 12 : Images des neuf micromouvements de Mémoires Vives. Logiciels MIMESIS, GRAVURE, TAPIS.

7.2. *Fluente*, de Chi Min Hsieh.

«*Chorégraphie virtuelle : A l'origine du mouvement dansé, l'imagination matérielle et dynamique de la fluidité et des énergies interactionnelles*».

Cette pièce vidéographique [Hsi06] fait suite à l'étude effectuée par Chi Min Hsieh, danseur et artiste multimédia, comme application artistique de sa thèse en Art-Science-Technologie sous la direction de Annie Luciani sur la modélisation de mouvements dansés [HL05][HL06a] [HL06b]. Ces travaux de modélisation sont basés sur l'hypothèse que, dans les mouvements dansés, les notions de forces, d'énergie, de fluidité, de propagation sont plus prégnantes sinon davantage que les propriétés découlant de la seule anatomie des corps. Les modèles d'humains virtuels développés en synthèse d'images ou à des fins médicales et thérapeutiques sont en effet des modèles d'inspiration anatomique, dans lesquels il est procédé à une modélisation du squelette et de ses articulations, sur lesquels sont ensuite placés des tendons et des muscles, pour finir par un enrobage par une peau. Dans ce genre d'approche qui colle à la structure matérielle des corps, il est vite illusoire d'atteindre suffisamment de réalisme pour espérer rendre compte de la subtilité des mouvements dansés. Nous avons donc opté pour une approche moins anatomique et plus fonctionnelle, basée d'une part sur les notions d'inerties, d'élasticité, de viscosité, susceptibles de centrer la modélisation sur des propriétés telles que les dynamiques, de forces, les propagations, les résistances au déplacement, etc., et d'autre part sur la manière dont le danseur se représente le mouvement qu'il doit faire. Pour illustrer cette approche, prenons l'exemple simple de plier le genou. En lieu et place de donner des valeurs des angles par exemple, appuyons-nous sur la pensée conduisant à cette action : appuyer sur le sol donc ressentir la force verticale qui circule du sol vers le bassin, relâcher le bassin et le laisser tomber, donc ressentir la force verticale qui va du bassin au sol, laisser libre le genou, conduit naturellement à la pliure de celui-ci. Ceci se modélise très simplement par une masse ponctuelle représentant le genou simulant donc une articulation parfaite non soumise à la gravité (alléger le genou, le laisser libre), une masse ponctuelle représentant le bassin, soumise uniquement à la gravité, une masse ponctuelle représentant le pied soumise à la gravité et en interaction élastique avec le sol, deux interactions viscoélastiques liant le genou à la

masse «pied» et à la masse «hanche». Nous obtenons ainsi un «plier de genou» qui, par l'effet des forces opposées d'extension-compression viscoélastiques, gravitaires et pesantes, s'effectue correctement avec la souplesse ou la rigidité voulue. C'est de cette manière qu'un ensemble de modèles de mouvements ont tous été réalisés tels que marcher, tourner, débouler, valser, sauter sur place avec pliage du genou et rebond, double ou triple saut en avant ou en arrière, etc.

Dans *Fluente*, des dynamiques d'inspire et d'expire (Figure 13.a) ont été obtenues par la modélisation de chaînes d'inerties viscoélastiques qui simulent la propagation vers le haut et le bas du corps (torse et épaules, bassin et genou) à partir d'un centre de déclenchement situé au milieu du corps. Enfin, des interactions viscoélastiques ont été placées entre les danseurs pour modéliser leur couplage. (Figure 13.b et c)

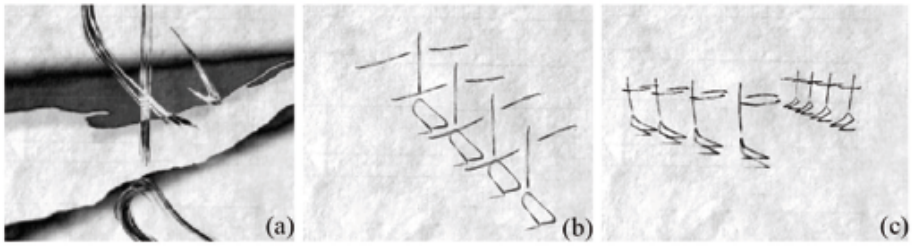

Figure 13 : Images de *Fluente* : (a) Respiration. (b) et (c) respirations multiples couplées.

7.3. *Et… Ondes Particules*, de Mélanie Lebats et Kevin Sillam

Et…Ondes Particules [LS11] est une pièce artistique interactive réalisée par Mélanie Lesbats (EESI) et Kevin Sillam (ACROE-ICA) et mise en œuvre scientifiquement et techniquement par Kevin Sillam dans le cadre de sa thèse en Art-Science-Technologie sous la direction de Annie Luciani. La pièce consiste en une interprétation visuelle de l'écho en tant que manifestation de la propagation et de la réflexion d'onde engendrée par une source dans un espace. Les propriétés de propagation, de réflexion et d'absorption de l'espace sont modélisées par le procédé de gravure dynamique. La source est le mouvement du spectateur lorsqu'il entre dans l'espace de la scène. Ce mouvement est rendu visible par des ondes qu'il produit, comme un écho à son geste. Celui-ci est ainsi comme absorbé ou réfléchi par un milieu éponge variable et programmable. La métaphore de l'écho est mise en œuvre grâce à quatre niveaux d'interaction, chacun rendant compte des

différentes composantes présentes dans un écho : émission, propagation et diffusion dans un milieu physique, réflexion et absorption par des obstacles transformant les ondes émises. Le premier est l'interaction entre le spectateur et une matière calculée représentant un milieu physique. Le mouvement du spectateur est capté par des caméras et interprété par la simulation numérique comme un marqueur qui laisse son empreinte sur la substance physique calculée. La seconde interaction est interne à la matière calculée et se manifeste par les interférences des ondes produites par celle-ci. La troisième interaction se situe entre plusieurs spectateurs lorsqu'ils se trouvent simultanément dans l'espace de la scène. Une quatrième interaction est celle de la matière calculée avec des obstacles, générant autour d'eux des réflexions et absorptions des ondes. La figure suivante (Figure 14) illustre le procédé et la mise en œuvre artistique.

Figure 14 : Images de «*Et…Ondes Particules*». Gauche. Interaction du spectateur avec la matière calculée. Milieu : Propagation, réflexion et absorption des ondes générées par le spectateur. Droite : Plan de l'installation.

8. Conclusion

Un art du mouvement visuel peut et doit aujourd'hui naître. Les conditions sensibles et techniques pour son envol sont aujourd'hui réunies. Le cinéma, puis les arts plastiques cinétiques en avaient donné un avant-goût. Les nouvelles technologies de la modélisation et de la simulation lui offrent toutes les perspectives. Il faut cependant travailler à en définir tous ses fondements et ses périmètres, élaborer ses vocabulaires et grammaires et mener un travail systématique d'exploration et de création de manière à faire jaillir les propriétés qui ne peuvent se fondre dans d'autres arts. Mais la recherche de ces propriétés ne se situe plus dans la perspective des arts d'avant-garde tels qu'ils se sont définis dans les cinquante dernières années conduisant Greenberg à déclarer : «*Les arts sont à présent en sécurité, chacun à*

l'intérieur de ses frontières légitimes, ...». [Gre86] cité par [Lich03].

Ce n'est évidemment pas dans cette ligne que nos développements s'inscrivent. Car jamais le rapprochement entre les formes artistiques n'a été autant possible et souhaité qu'aujourd'hui. Au-delà de toutes les confusions encore possibles, les technologies actuelles créent des conditions sans précédent pour tester les similitudes et différences entre art pour l'ouïe, art pour l'œil, art du corps. Elles permettront d'en savoir davantage sur les supposées similitudes ou différences entre arts. Pour nous, l'identité d'un art du mouvement visuel, si elle existe, ne pourra se saisir sans une compréhension simultanée de fondamentaux concernant tous les arts.

Les travaux que nous avons présentés ici cherchent à aller dans cette direction, en suivant deux axes complémentaires :

- Le premier est que les différents arts s'articulent différemment autour des notions que nous estimons fondamentales d'«extensif» et d' «intensif», selon les poids respectifs du temps et de l'espace, du possible ou de l'impossible autographique ou allographique. Il y aurait sur ce point, une différence fondamentale entre arts de la forme et art du temps.
- Le deuxième est, que loin de théoriser leur séparation, cette distinction nous conduit à penser la question de la relation de la forme et du mouvement comme une question de multimodalité, au même titre que celle de la relation entre le son et l'image. Par conséquent, du point de vue artistique, cette relation est à construire et ouvre des perspectives créatrices nouvelles. Nous avons proposé ici un concept nouveau, celui de la convolution entre deux espaces de nature différentes, l'espace kinesthésique et l'espace plastique, pour porter l'encodage et la transformation complexe de l'un par l'autre.

Ces étapes sont loin de couvrir tous les champs d'exploration qui sont devant nous, mais ils nous semblent néanmoins nécessaires pour le futur des arts multimodaux actuels. Mais cela ne se fera qu'au prix d'un nouveau cycle de compréhension et d'élucidation mêlant intimement art, science, technologie.

Remerciements

Les travaux présentés ici ont été soutenus par le Ministère de la Culture et de la Communication, l'Institut Polytechnique de Grenoble, le master Art-Science-Technologie de Grenoble, l'agence nationale de la recherche par les projets CRÉATIVITÉ Instrumentale et DYNAMé, et la commission européenne par les projets Enactive Interfaces et AMBIANT Creativity. Je remercie tout particulièrement Nicolas Castagné pour ses conseils constructifs dans la rédaction de cet article, Claude Cadoz pour sa relecture toujours très attentive, ainsi que l'ensemble des doctorants et stagiaires du laboratoire, et plus particulièrement Arash Habibi, Chi Min Hsieh et Kevin Sillam, pour leur contribution directe aux travaux exposés dans cet article ayant donné lieu à des réalisations artistiques.

Références

[Bac43] Gaston Bachelard. *L'air et les songes : Essai sur l'imagination du mouvement.* Editions José Corti, 1943. Gallimard 2009.

[Ben35] Walter Benjamin. *L'Œuvre d'art à l'époque de sa reproductibilité technique*. Rédigé en 1935. 1ière publication en 1955. In Ecrits français, Gallimard, 1991.

[BL03] Pierre Boulenguez, Annie Luciani. «A physical particle model of morphogenesis». *Proc. of WSCG 2003*. Plzen (Czech Republic). 2003/02/3-7.

[BL99] J. Bloomenthal, C. Lim. «Skeletal methods of shape manipulation». In *Shape Modeling International.* 1999.

[Bli82] James F. Blinn. «A Generalization of Algebraic Surface Drawing». *ACM Transactions on Graphics*. 1(3). pp 235–256. July 1982.

[CLF84] Claude Cadoz, Annie Luciani, Jean-Loup Florens. «Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms : The Cordis System». Computer Music Journal. 8(3). pp. 60-73. M.I.T. Press, Cambridge Mass. 1984.

[Can98] Marie Paule Cani. «Layered Deformable Models with Implicit Surfaces». *Graphics Interface'98 Conference*. Vancouver. pp. 201-208. 18-20 juin 1998.

[CL95] Benoît Chanclou, Annie Luciani. «Physical models and dynamic simulation of planetary motor vehicles with a great number of degrees of freedom». *Proc of IAS 4 Conf.* IOS Press. pp 465-472. 18-20 juin 1998

[Bru85] Claude-Paul Bruter. *Topologie et perception*. Maloine S.A. Editeur.