HAL
open science

Synthèse de son de papier adaptée au mouvement et à la géométrie de la surface

Camille Schreck, Damien Rohmer, Stefanie Hahmann, Marie-Paule Cani

To cite this version:

Camille Schreck, Damien Rohmer, Stefanie Hahmann, Marie-Paule Cani. Synthèse de son de papier adaptée au mouvement et à la géométrie de la surface. Journée de l'AFIG, Nov 2015, Lyon, France. hal-01240030

HAL Id: hal-01240030

https://inria.hal.science/hal-01240030

Submitted on 9 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Synthèse de son de papier adaptée au mouvement et à la géométrie de la surface

Camille Schreck, Damien Rohmer, Stefanie Hahmann, Marie-Paule Cani

Univ. Grenoble Alpes & CNRS (LJK), Inria

Résumé
Nous présentons une méthode pour générer en temps réel un son plausible pour une animation d'un papier virtuel que l'on froisse. Pour cela, nous analysons l'animation géométrique de la surface du papier pour détecter les événements à l'origine de sons puis calculons géométriquement les zones du papier qui vibrent de part la propagation des ondes au travers de la surface. Le son résultant est ensuite synthétisé à partir à la fois d'extraits pré-enregistrés, et d'une synthèse procédurale, tenant compte de la forme géométrique de la surface et de sa dynamique. Nous validons nos résultats en comparant le son généré par notre modèle virtuel par rapport à des enregistrements réels pour un ensemble de cas d'animations caractéristiques.

Abstract
In this article, we present a method to generate plausible sounds for an animation of crumpling paper in real-time. We analyse the geometrical animation of the deformed surface to detect sound-producing events and compute the regions which resonate due to the propagation of the vibrations though the paper. The resulting sound is synthesized from both pre-recorded sounds and procedural generation taking into account the geometry of the surface and its dynamic. Our results are validated by comparing the generated sound of the virtual model with respect to real recording for a set of specific deformations.

Mots clé : Informatique Graphique, Synthèse Audio, Papier

1. Introduction

Grâce aux avancées dans le domaine de l'informatique graphique, il est actuellement possible de créer des mondes virtuels visuellement très réalistes. Pourtant, pour être vraiment convaincante, une expérience virtuelle doit stimuler également les autres sens, en particulier l'ouïe. En effet, un environnement virtuel ne peut être entièrement réaliste si le son correspondant à l'image n'est pas présent. Dans cet article, nous proposons d'améliorer une méthode de simulation interactive de papier, permettant de froisser une feuille virtuelle, en générant automatiquement un retour audio plausible en temps réel.

La génération du son du papier représente un défi car le son produit en froissant une feuille est très riche et complexe. En effet, comme le papier est très rigide, les vibrations peuvent se propager plus facilement que dans un matériau plus souple comme le tissu. De ce fait les sons créés dépendent fortement de la géométrie du papier.

L'idée de notre approche est d'adapter au papier les méthodes de synthèse concaténative guidée par le mouvement. Pour cela, nous introduisons le concept de résonateurs dépendants de la géométrie. Nous détectons deux types d'événements produisant du son : les événements de froissement et les événement de friction. L'analyse de la surface calculée à chaque instant par l'animation nous permet de détecter chacun de ces événements. Nous calculons ensuite les régions (résonateurs) dans lesquelles les vibrations produites par un événement se propagent. L'émission acoustique qui en résulte est finalement créée selon la géométrie du résonateur en utilisant des données pré-enregistrées obtenues à l'aide de papier réel.

De cette façon, nous obtenons en temps réel des sons de papier plausibles en adéquation avec l'animation. Nos contributions sont, premièrement, l'adaptation des méthodes concaténatives guidées par le mouvement pour créer la première méthode, à notre connaissance, permettant de générer automatiquement et en temps réel des bruits de papier froissés, et, deuxièmement, l'introduction de résonateurs pour le calcul d'un son tenant compte des propriétés de résonance du papier.

La suite de cet article est organisée de la façon suivante : nous résumons d'abord l'état de l'art dans la section 2. Puis nous décrivons les structures utilisées dans notre

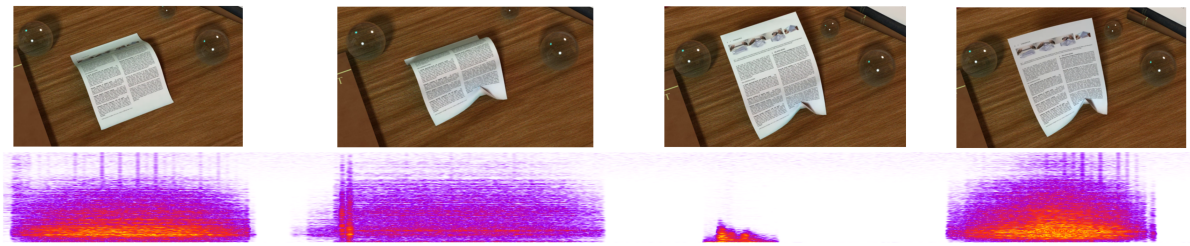


Figure 1: *Animation d'un papier virtuel (haut) et le spectre du son généré automatiqueent par notre méthode (bas). L'animation dure 3.3 secondes.*

méthode section 3 avant de passer à la méthode elle-même à la section 4. Enfin nous présentons les résultats obtenus dans la section 5 et concluons en discutant les limitations et perspectives de cette méthode.

2. État de l'art

La génération de son attire depuis quelques années un intérêt croissant dans le domaine de l'informatique graphique. Des études perceptuelles et quelques méthodes de synthèse ont été rassemblées par Giordano dans [GA14].

Synthèse orientée donnée. Dans l'approche traditionnelle, encore très répandue dans les films d'animation et les jeux vidéos, des sons réels sont enregistrés et édités par un artiste de façon à correspondre à l'image. Cette approche permet d'obtenir des résultats de haute qualité mais est chronophage et ne peut pas être utilisée pour des environnements interactifs. Il est possible d'automatiser ce processus afin de pouvoir l'utiliser dans des applications interactives en se servant d'événements automatiquement calculés pour déclencher des extraits de son pré-enregistrés [TH92]. Malheureusement, cette approche ne permet pas d'obtenir la variabilité nécessaire pour reproduire des interactions complexes et est donc peu adaptée pour les objets fortement déformables comme les vêtements ou le papier.

D'autres méthodes guidées par les données sont inspirées des techniques de synthèse granulaire [Roa04]. Dubnov *et al.* [DBJEY*02] et Bar-Josheph *et al.* [EYWD99] proposent d'utiliser un arbre d'ondelettes pour modéliser une texture sonique et re-synthétiser un arrière-plan audio. L'algorithme "Sound-by-number" [CBBJR03] utilise un modèle de synthèse granulaire guidée par un mouvement 2D. Les méthodes de synthèse par concaténation de sons (CSS) [S*00, S*04] consistent à sélectionner dans une base de données d'unités de son, la séquence d'unités qui correspond le mieux au son à synthétiser.

An *et al.* [AJM12] s'inspire de ces méthodes pour synthétiser de façon automatique le son correspondant à une animation physique de tissu. La déformation de la surface est d'abord analysée afin de trouver les événements de froissement et de friction qui guident la synthèse d'un signal cible de basse qualité. Une méthode de CSS est ensuite utilisée pour sélectionner des unités dans une base de données de sons de tissu. Notre méthode s'inspire de la première partie de cet article et l'adapte au cas du papier. En effet, le son du papier est également produit par le froissement et la friction mais il présente également une forte dépendance à la géométrie de la surface.

Synthèse physique. Une autre approche usuelle en informatique graphique pour simuler un son est l'utilisation de techniques de modélisation qui s'appuient sur la description du phénomène physique impliqué dans la génération du son. Ces techniques sont généralement utilisées pour synchroniser la synthèse physique de son avec une animation physique. O'Brien *et al.* [OCE01] utilise un modèle à éléments finis pour produire à la fois l'animation et le son. Une grande variété d'objets (y compris des objets semblables à du tissu) peut être simulée mais le temps de calcul très élevé nécessaire ne permet pas à cette méthode d'être suffisamment efficace pour des applications interactives.

Les modèles modales de vibrations [PW89, JP02] ont été introduits pour la génération de son digital par Adrien [Adr91]. La synthèse modale linéaire de vibrations est largement répandue pour les sons produits par les corps rigides [DP98, vdDKP01, Coo02, OSG02, JBP06, ZJ10]. De plus il est possible de simuler un grand nombre d'objets sonores en temps interactif à l'aide de techniques d'accélération, telles que [RL06, BDT*08], et de compression, telles que [LAJJ14]. Ren *et al.* [RYL13] présente une méthode pour estimer les paramètres modales à partir de vidéos enregistrées. La synthèse modale linéaire a également été envisagée pour la synthèse de son de plaques minces par Chadwick *et al.* [CAJ09] mais ce type de modèle ne supporte que les petites déformations.

Les lois de puissance des émissions acoustiques des événements de froissement de surfaces élastiques [KL96] et de papier [HS96] ont été étudiées par la communauté physique, ce qui a conduit à des modèles stochastiques indépendants de la géométrie tels que [FB03]. Une méthode stochastique procédurale a également été proposée pour créer un modèle simple pour le bruit de déchirure de papier [LFD*15].

3. Structure

3.1. Le modèle de papier froissé

Notre modèle audio s'appuie sur le modèle pré-existant d'animation de la géométrie développable de la surface décrit dans [SRH*16]. Dans ce modèle, l'animation de la sur-

face est obtenue en entrelaçant des étapes de simulation physique standard à base d'éléments finis avec des étapes de remaillage géométrique adaptant en permanence la triangulation à la forme de la surface et assurant que celle-ci reste développable. Deux hypothèses simplificatrices sont utilisées pour l'étape de remaillage. Premièrement la surface est approximée par un ensemble de surfaces appelées cônes généralisés, c'est-à-dire des surfaces réglées telles que les règles convergent vers le même point (potentiellement à l'infini dans le cas d'un plan ou d'un cylindre). Deuxièmement les arêtes vives de la surface, correspondant physiquement aux endroits où les liens entre les fibres du papier sont brisés lors d'un froissement, peuvent être approximées par des points singuliers qui sont les sommets des cônes généralisés. La surface est ainsi partitionnée en un ensemble R_{paper} de régions classifiées suivant deux catégories :

— *les régions courbes* (en violet fig.2) : chacune est un ensemble des cônes généralisés définis par un ensemble de règles.

— *les région planes* (en vert fig.2) : elles sont représentées par une triangulation grossière dont les sommets sont soit des points singuliers intérieurs (en rouge), soit des points singuliers sur le bord de la surface (en jaune) qui délimitent les régions courbes, soit une poignée (en noir, point fixe permettant à l'utilisateur de manipuler le papier). L'angle diédral entre deux triangles adjacents d'une même région plane est inférieur à un seuil ε_a.

Nous utilisons ce modèle principalement pour les informations sur la géométrie du papier qu'il procure. Notre algorithme prend en entrée non seulement le maillage de la surface mais surtout la partition R_{paper}. Pour généraliser la méthode à une animation quelconque, il faudrait calculer une partition semblable sur un maillage.

3.2. Caractérisation du son du papier

Similairement à l'approche proposée par An *et al.* [AJM12] pour la modélisation du son du tissu, nous identifions deux types de sons émis lorsque le papier est froissé :

— **les sons de friction** produits par les zones de la surface qui frottent contre une autre surface (un autre objet de la scène ou une autre zone du papier). Ce son provient physiquement du frottement sur les irrégularités microscopiques réparties aléatoirement sur les surfaces en contact, et ce son peut être assimilé à un bruit coloré (voir fig.3).

— **les sons de froissement** générés par les zones dont la courbure de la surface est inversée rapidement au cours du temps. La transition entre les deux positions d'équilibre produit une brusque émission d'énergie qui s'atténue rapidement. On distingue deux sortes de son de froissement. Premièrement un claquement sec, lorsque les bords de la région sont contraints, ce qui arrive lorsque le papier est froissé, les vibrations étant alors amorties en quelques millisecondes (voir fig.4 gauche). Deuxièmement un son plus long lorsque la région où les vibrations se propagent contient un bord libre du papier qui peut alors osciller (voir fig.4 droite). Dans ce second cas, l'atténuation est plus faible et le son peut durer jusqu'à quelques centaines de millisecondes.

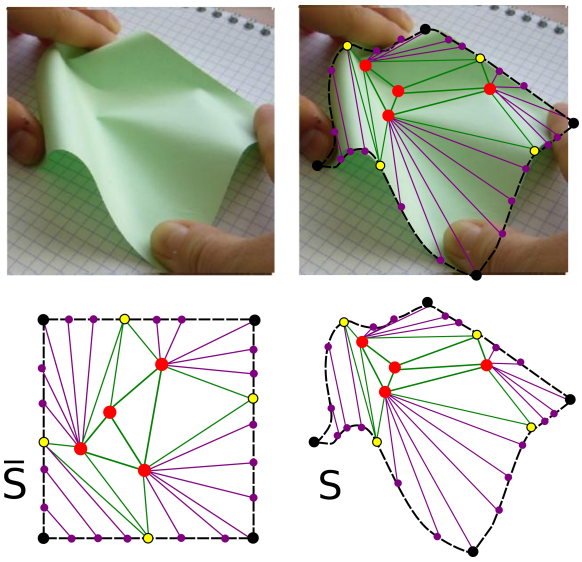


Figure 2: *Structure de notre modèle de papier. La surface est approximée par un ensemble de cônes généralisés (en violet) et de régions planes (en vert). Le modèle gère deux sortes de points singuliers : les points singuliers intérieurs (en rouge) où les fibres sont brisées et qui sont des sommets de cônes, et les points singuliers sur les bords du papier (en jaune) qui délimitent des régions courbes.*

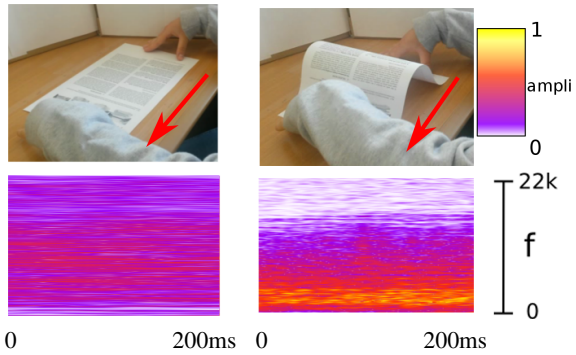


Figure 3: *Spectrogramme du son produit par la friction d'une feuille de papier (réelle) à plat sur une table et celui produit par la friction d'une feuille courbée. Le spectre varie peu au cours du temps ce qui permet d'assimiler le son à un bruit coloré.*

On peut noter que, bien qu'ils aient des origines similaires, le son du papier est différent du son produit par le tissu. En effet, le papier étant très rigide, les vibrations se propagent plus facilement que dans un matériau plus souple. Cela entraîne un effet de résonance que l'on ne retrouve pas dans les sons de tissus.

3.3. Les resonateurs

De par sa capacité à résonner, les sons produits par le papier dépendent de la géométrie de sa surface. Pour se convaincre de l'importance de ce phénomène, il suffit d'écouter la

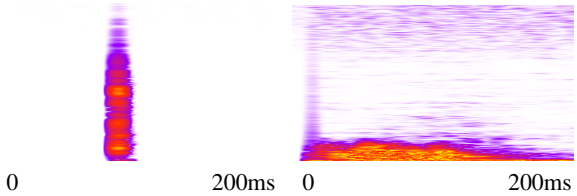


Figure 4: *Spectrogrammes de sons de froissement (claquement sec à gauche pour une surface contrainte et "flap" à droite pour une surface avec des bords libres).*

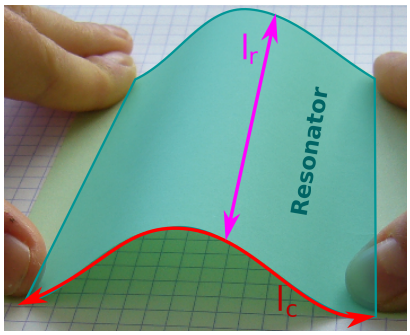


Figure 5: *Un résonateur est défini par la longueur de sa plus longue règle (l_r) et celle de son plus long bord courbe (l_r).*

différence entre le son produit par une feuille glissant à plat sur une table et celui d'une feuille courbée (voir fig.3).

Nous proposons de reproduire ce phénomène en introduisant le concept de *résonateur*. Un résonateur est une région, ou une partie de région, de R_{paper} dans laquelle les vibrations provoquées par un événement se propagent. Nous caractérisons un résonateur par la longueur l_r de sa plus longue arête correspondant à une règle et par la longueur l_c du plus long bord courbé de la région, comme montré fig.5. Quand il est activé (voir sec. 4), le son généré par un résonateur dépend de ces deux paramètres l_r et l_c.

3.4. La base de données de sons de papier

Afin de reproduire un son aussi riche que celui du papier en temps réel, nous choisissons de nous appuyer sur une base de données de sons réels pré-enregistrés. Nous utilisons en fait deux bases de données, l'une pour les sons de froissement, la seconde pour les sons de frictions. Toutes deux sont enregistrées et ordonnées de la même manière. Le son correspondant à un événement est enregistré dans un cas simple pour lequel il n'y a qu'un seul résonateur et pour lequel nous mesurons physiquement les dimensions l_r et l_c (typiquement pour une feuille de papier rectangulaire formant un seul pli comme sur la fig.5). Le son résultant est ensuite classé dans la base de données selon la taille (l_r et l_c) du résonateur (voir fig.6). Pour obtenir davantage de diversité, il est possible d'enregistrer plusieurs extraits de son pour une même taille de résonateur.

Du fait de leurs natures différentes, nous utilisons le son original entier pour rejouer un son de froissement alors que nous avons seulement besoin du spectre pour reproduire

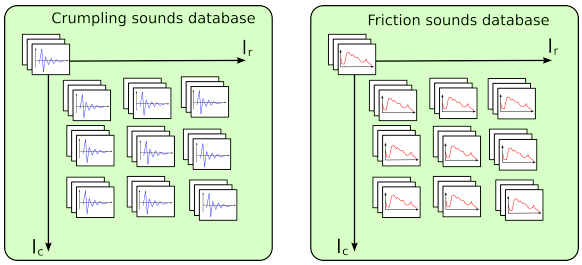


Figure 6: *Bases de données de sons ordonnées sous forme de matrices selon les dimensions l_r et l_c. La base de données de froissement contient des sons court pré-enregistrés tandis que celle de friction contient des spectres.*

un son de friction (voir sec. 4.4). C'est pourquoi la base de données de bruits de friction ne contient que les spectres des extraits.

Dans le cas particulier du résonateur n'ayant pas de bord courbé, le sons correspondants (frottement d'une feuille plane, claquement sec) sont classés avec les dimensions $l_r = 0$ et $l_c = 0$.

4. Notre méthode

4.1. Présentation

Dans notre approche, non seulement nous détectons les événements générant du son et jouons des sons pré-enregistrés déclenchés par ces événements, mais nous tenons également compte de la géométrie du papier. Pour cela, chaque région dans laquelle les ondes résonnent est associée à un résonateur qui vient jouer le rôle de source de son.

Notre approche de synthèse temps-réel de son se décompose de la manière suivante (voir fig. 7)
Pour chaque pas de temps de la boucle d'animation :

1. Animation géométrique de la surface [SRH*16].
2. Synthèse du son de froissement :
   — Détection des événements de froissement e_c.
   — Pour chaque événement e_c :
      — Calcul des résonateurs activés par e_c.
      — Pour chaque résonateur :
         — Trouver le son correspondant dans la base de données.
         — Choisir l'amplitude en fonction de la somme des différences de courbure.
         — Envoyer le son sur la sortie audio.
3. Synthèse du son de friction :
   — Détection des événements de friction e_f.
   — Pour chaque événement e_f :
      — Calcul des résonateurs activés par e_f.
      — Pour chaque résonateur :
         — Trouver le spectre correspondant dans la base de données.
         — Choisir l'amplitude en fonction de la vitesse moyenne de friction.
   — Addition de tous les spectres de frictions.

— Reconstruire le son de friction à l'aide d'une transformée de fourier inverse (iFFT).
— Envoi du son sur la sortie audio.

Le son final est obtenu en tant que somme de l'ensemble des sons de friction et de froissement générés par l'ensemble des résonateurs.

4.2. Détection d'événements produisant du son

Nous utilisons la sortie de l'animation géométrique du papier pour détecter l'instant et la location des événements produisant du son (événements friction et de froissement). À chaque événement est attibué une amplitude. Celle-ci sera utilisée au moment de rejouer les sons (see sec. 4.4) : l'amplitude des sons générés par un événement est amplifié proportionnellement à l'amplitude de l'événement.

Événements de friction. Nous estimons les événements de friction en calculant la proximité de chaque point du maillage d'entrée avec les obstacles qui sont supposés fixes. Pour compenser les imprécisions de la gestion de collision, nous considérons qu'un sommet du maillage est en contact avec un obstacle s'il se trouve à une distance inférieure à un seuil défini par l'utilisateur (<2 mm dans notre implémentation). L'ensemble des sommets en contact avec un obstacle sont regroupés en ensembles connexes. Chaque ensemble représente un événement de friction dont l'amplitude est la vitesse moyenne des sommets participants à l'événement.
Événements de froissement. La détection des événements de froissement s'appuie sur l'analyse de la courbure moyenne de la surface. Afin de rendre l'estimation de cette courbure indépendant des modifications dynamiques de la connectivité du maillage animé, nous projetons une grille régulière sur la surface (voir fig.8). La courbure H_p peut alors être calculée en chaque sommet de la grille à partir d'une différence finie avec ses voisins. Nous considérons que la courbure moyenne de la surface s'inverse et génère un son si les courbures moyennes H_p^t et H_p^{t-1} d'un sommet p aux instants respectifs t et $t-1$ sont tels que

$$\Delta_p^t = |H_p^t - H_p^{t-1}| > \varepsilon_c \ ,$$

avec ε_c un seuil définit par l'utilisateur. Enfin, les sommets ayant le même signe de courbure sont ensuite rassemblés en composantes connexes. Chaque composante connexe représente un événement de froissement dont l'amplitude est la somme des variations de courbure Δ_p^t pour tous les sommets p de l'ensemble.

Notons qu'en pratique, nous plaçons également un filtre à posteriori afin de ne garder que les événements ayant une amplitude significative.

4.3. Calcul des résonateurs

Pour chaque événement produisant un son, il faut calculer les régions dans lesquelles les ondes produites se propagent. Pour cela, nous formulons l'hypothèse que les vibrations sont bloquées par les arêtes où la courbure est élevée (nous définissons un angle maximum a_{max} pour lequel les ondes

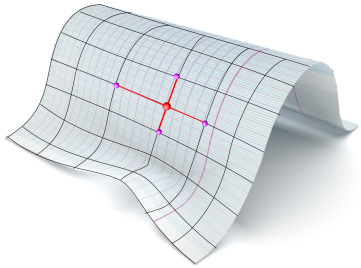


Figure 8: *En projetant une grille sur la surface, la courbure peut-être calculée en chaque point de la grille à l'aide de ses voisins directes.*

ne sont pas bloquées) et par les arêtes contraintes, c-à-d les arêtes dont les deux sommets sont fixés ou en contact avec un obstacle. Ainsi pour chaque événement, une liste L_e de résonateurs (définis par leurs caractéristiques l_r et l_c permettant de choisir dans la base de données le son émis par le résonateur) est calculée grâce à l'algorithme suivant :

D'abord la région r_0 de R_{paper} contenant l'événement e (voir fig.9 (b) et (c)) est ajoutée à la liste L_e. Ensuite pour chacune des régions voisines r :

— si l'arête commune entre r_0 et r a un angle diédral inférieur à a_{max} :
  — si r est une région plane, l'angle entre deux triangles adjacents de la région est inférieur à ε_a. Nous choisissons $a_{max} < \varepsilon_a$, de sorte que les vibrations se propagent dans toute la région plane. Il faut donc calculer l_r et l_c pour la région et ajouter r à L_e. La propagation se poursuit dans les régions voisines de r.
  — si r est une région courbe, les vibrations peuvent être stoppées par une règle pour laquelle l'angle diédral est supérieur à a_{max}. Dans le cas échéant, l_r et l_c ne sont calculés que sur la zone de r entre la règle délimitant r et la première règle dont l'angle est supérieur à a_{max}, et seule cette zone est ajoutée à L_e. Si au contraire, toutes les règles ont un angle diédral suffisamment petit, l_r et l_c sont calculés pour toute la région r, laquelle est ajoutée à L_e. Dans ce second cas la propagation continue dans les régions voisines de r.
— si l'arête commune entre r_0 et r a un angle diédral inférieur à a_{max}, la propagation est stoppée.

Chaque région de L_e est considérée comme un résonateur (voir fig.9 (d)) et produit un son qui dépend de sa taille, du type et de l'amplitude de l'événement.

4.4. Jouer les sons

Pour chaque résonateur de L_e, le son de la base de données associée (friction ou froissement) correspondants le mieux aux dimensions l_r et l_c est sélectionné. Si plusieurs sons ont les mêmes dimensions, nous sélectionnons l'un d'entre eux aléatoirement.

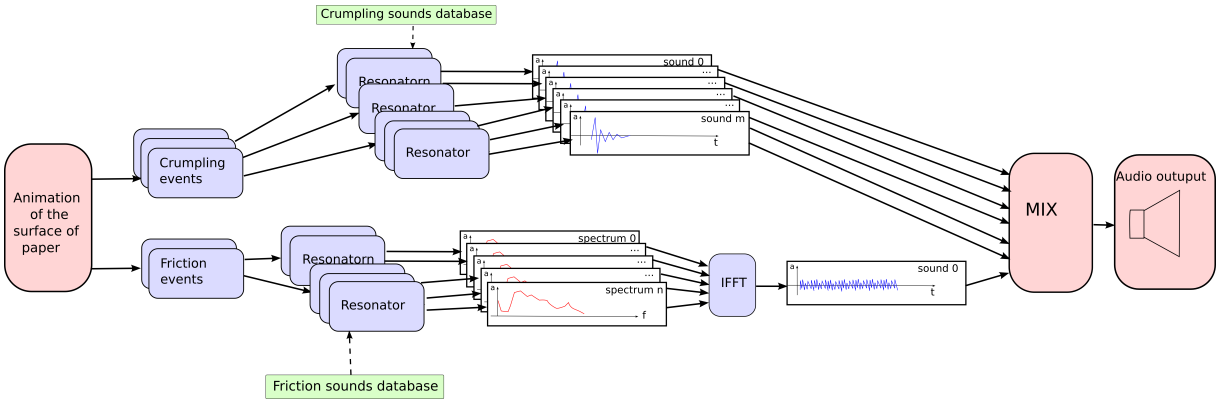


Figure 7: *Vue d'ensemble de l'algorithme.*

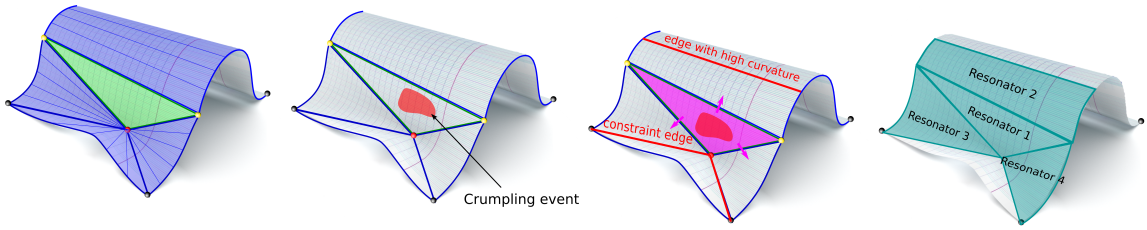


Figure 9: *Trouver les résonateurs (dans le cas d'un événement de froissement) : (à gauche) régions planes et courbes, (milieu-gauche) détection de l'événement, (milieu-droite) calcul de la région de l'événement et propagation des vibrations aux régions voisines, (droite) résonateurs.*

Son de froissement. Un événement de froissement est ponctuel, il suffit donc de rejouer l'extrait de son correspondant à chacun des résonateur de l'événement tel qu'enregistré dans la base de données. L'amplitude des sons est dynamiquement multiplié par un facteur proportionnel à l'amplitude de l'événement (c-à-d à la somme des inversions de courbures tel que décrit précédemment).

Son de friction. Comme la friction est un événement continue, il faut reproduire le son pendant l'intégralité de la durée du mouvement lors d'une collision. Inspiré de l'approche proposé par Rodet *et al.* [RDRD92] et Marelli *et al.* [MAKMV10], nous calculons la somme de l'ensemble des spectres associés à chaque résonateur pour chaque événement de friction, chaque contribution étant pondérée par l'amplitude de l'événement (c-à-d la vitesse moyenne de la friction comme expliqué précédemment). Un tampon contenant le son résultant est obtenu par application d'une transformée de Fourier inverse sur cette somme et est envoyé sur la sortie audio. De nouveaux tampons sont calculés aussi longtemps que durent les bruits de frictions.

5. Résultats

Les principaux résultats de notre approche sont joints en vidéo avec une bande son. Nous conseillons de les écouter avec un casque audio dans un environnement silencieux.

Détails d'implémentation : Dans nos exemples, nous utilisons des sons enregistrés avec un échantillonnage de 44100 Hz et jouons les sons avec le même échantillonnage. Les spectres des sons de friction contiennent 2048 fréquences, un tampon de son de friction contient donc 2048 échantillons ($\approx$ 50 millisecondes) et deux tampons consécutifs se chevauchent sur 1024 échantillons. Chacune de deux bases de données contient des sons dont les dimensions l_c et l_r prennent les valeurs $\{2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25\}$. De plus nous enregistrons trois sons de froissement pour chaque dimension. Pour lire et jouer des sons, nous utilisons la bibliothèque c++ STK([CS99], [SC05]).

5.1. Validation

Nous comparons le résultat obtenu par notre méthode avec des sons de papier réel pour des exemples simples sur des feuilles de papier de différentes tailles afin de tester l'impact de la dimension du résonateur sur le son. D'abord nous nous intéressons au son de papier glissant le long d'une table. Nous utilisons des feuilles rectangulaires de tailles différentes (210x297 millimètres (A4), 210x148 (half A4),105x297 (A5), 105x148(A6)) que nous courbons comme montré figure 10a pour du papier réel et figure 11a pour le papier virtuel. Nous comparons aussi le son produit par une feuille (A4) glissant à plat (fig. 10 (gauche) et fig. 11 (gauche)). Nous comparons ensuite des sons de froissements pour du papier réel et virtuel en utilisant les mêmes tailles que dans l'expérience précédente. La feuille est légèrement courbée puis la courbure est inversée comme montré figure 12a et figure 13a. La vidéo montre ces résultats et les figures 10, 11 and 12, 13 présentent les émissions acoustiques cor-

respondantes et leurs spectrogrammes. Pour les sons réels comme pour les sons virtuels, nous obtenons des sons distinctifs selon la taille de la feuille. La différence entre une feuille plate et une feuille courbée glissant contre un obstacle est particulièrement notable.

5.2. Performances

Mémoire. La base de données de sons de froissement contient 249 extraits de bruit de papier d'une taille variant entre 200 et 800 millisecondes. La base de données de son de friction contient 63 spectres représentant chacun 2048 fréquences (entre 0 et 22100 Hz). La mémoire nécessaire pour contenir ces données est de $\approx$ 10 Mo.

Temps. La recherche d'événements et de résonateurs est faite une fois à chaque frame. Le tableau 1 indique le temps moyen par frame pour réaliser l'ensemble des calculs nécessaire à la synthèse du son. L'étape de projection de grille sur la surface dépend fortement de la résolution, il devient donc plus difficile d'atteindre le temps réel quand la résolution augmente. Cependant le temps nécessaire reste toujours largement négligeable par rapport au temps mécessaire pour l'animation que nous donnons à titre indicatif.

L'étape consistant à rejouer les sons est effectuée sur des threads différents. Pour être temps réel, il faut pouvoir générer 44100 échantillons par seconde. Pour les sons de froissement, un thread est généré pour chaque extrait joué. La seule opération nécessaire est la multiplication de chaque échantillon par l'amplitude de l'événement. En revanche, nous utilisons un unique thread pour tous les sons de friction. Un nouveau tampon doit être généré tous les 1024 échantillons. Pour cela, les spectres de chacun des évenements de friction doivent être pondérés par l'amplitude correspondante et additionnés, puis une IFFT doit être appliquée sur le résultat. Cette opération est être réalisée 44 fois par seconde et dure dans nos exemples moins de 4 millisecondes, ce qui est donc suffisamment rapide pour générer le son en temps réel.

exemples	audio (ms par frame)	animation (ms par frame)
1	5	168
15	6	182
16a	6	252
16b	17	1322
16c	75	11860

Table 1: *Temps moyens de calculs de la synthèse du son comparé aux tesmps de calculs de l'animation géométrique pour une frame.*

5.3. Plus de résultats

Nous présentons dans cette section quelques exemples plus complexes. Nous montrons les spectrogrammes correspondants aux sons produits ainsi que des images de l'animation. Nous rappelons que celà ne remplace pas la vidéo et la bande-son sur laquelle se trouve tous ces exemples.

— Les figures 1 et 14 montrent, respectivement dans le cas virtuel et dans le cas réel, une feuille de papier courbée sur laquelle on crée un unique point singulier dont on se sert pour faire se redresser la feuille, ainsi que le spectrogramme du son produit.
— La figure 15 montre une feuille (réelle et virtuelle) tenue par un bord et secouée doucement ainsi que les deux spectrogrammes correspondant respectivement au cas virtuel et au cas réel.
— La figure 16 montre l'exemple d'une feuille que l'on froisse. Nous utilisons différentes résolutions.

Pour simuler différents types de papier, il est possible d'enregistrer d'autres bases de données et éventuellement ajuster le seuil ε_c (avec un seuil plus élevé, des événements de froissement seront plus facilement générés ce qui donne l'impression d'un papier plus fragile). Nous pouvons obtenir, par exemple, le son produit par un billet froissé ou par du papier calque (voir la vidéo).

6. Discussions et conclusion

Nous avons présenté dans cet article la première méthode générant en temps réel le son d'un papier virtuel correspondant à une animation interactive de papier.
Bien que basés sur une approche ad-hoc et limitée par le choix d'une base de donnée pré-calculée, notre méthode génère de manière plausible un son de papier froissé comparable à des vidéos réelles et permet de s'adapter aisément à différent type de papier.
Nous projetons d'étendre notre approche sur des configurations de déformations plus complexes ainsi que sur une meilleure prise en compte de l'environnement de la scène. Enfin, nous proposons également d'incorporer une simulation de propagation d'onde dans le matériau afin de pouvoir prendre plus précisément en compte la géométrie de la feuille de papier pour la synthèse du son.

Références

[Adr91] ADRIEN J.-M. : Representations of musical signals. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1991, ch. The Missing Link : Modal Synthesis, pp. 269–298.

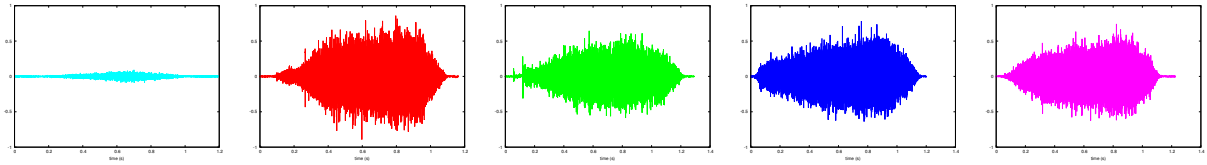
[AJM12] AN S. S., JAMES D. L., MARSCHNER S. : Motion-driven concatenative synthesis of cloth sounds. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2012)* (August 2012).

[BDT*08] BONNEEL N., DRETTAKIS G., TSINGOS N., VIAUD-DELMON I. L., JAMES D. : Fast modal sounds with scalable frequency-domain synthesis. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Conference Proceedings). Vol. 27*, Num. 3 (August 2008).

[CAJ09] CHADWICK J. N., AN S. S., JAMES D. L. : Harmonic shells : A practical nonlinear sound model for near-rigid thin shells. *ACM Trans. Graph.h. Vol. 28*, Num. 5 (December 2009), 119 :1–119 :10.

[CBBJR03] CARDLE M., BROOKS S., BAR-JOSEPH Z., ROBINSON P. : Sound-by-numbers : Motion-driven sound synthesis, 2003.

(a) *Configuration du papier*

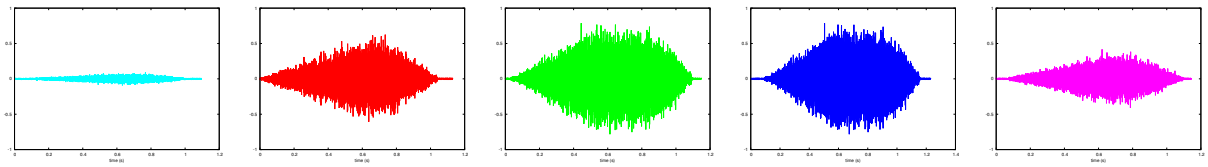


(b) *Son de la friction (1.20 s)*

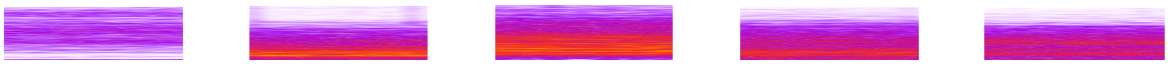
(c) *Spectrogrammes (200ms)*

Figure 10: *Sons de friction de papier réel.*
De gauche à droite : feuille A4 à plat, feuille courbée 210x297 mm (A4), 210x148 (half A4), 105x297 (A5), 105x148(A6)

(a) *Configuration du papier*



(b) *Son de la friction (1.20 s)*



(c) *Spectrogrammes (200ms)*

Figure 11: *Sons synthétisés de la friction du papier virtuel.*
De gauche à droite : feuille A4 à plat, feuille courbée 210x297 mm (A4), 210x148 (half A4), 105x297 (A5), 105x148(A6)

[Coo02] COOK P. R. : *Real Sound Synthesis for Interactive Applications*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2002.

[CS99] COOK P. R., SCAVONE G. : The synthesis toolkit (stk). 164–166.

[DBJEY*02] DUBNOV S., BAR-JOSEPH Z., EL-YANIV R., LISCHINSKI D., WERMAN M. : Synthesizing sound textures through wavelet tree learning. *Computer Graphics and Applications, IEEE. Vol. 22*, Num. 4 (2002), 38–48.

[DP98] DOEL K. V. D., PAI D. K. : The sounds of physical shapes. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.. Vol. 7*, Num. 4 (August 1998), 382–395.

[EYWD99] EL-YANIV Z. B.-J. R., WERMAN D. L. M., DUBNOV S. : Granular synthesis of sound textures using statistical learning. In *Proc. ICMC* (1999).

[FB03] FONTANA F., BRESIN R. : Physics-based sound synthesis and control : crushing, walking and running by crumpling sounds. In *Proc. Colloquium on Musical Informatics* (2003), pp. 109–114.

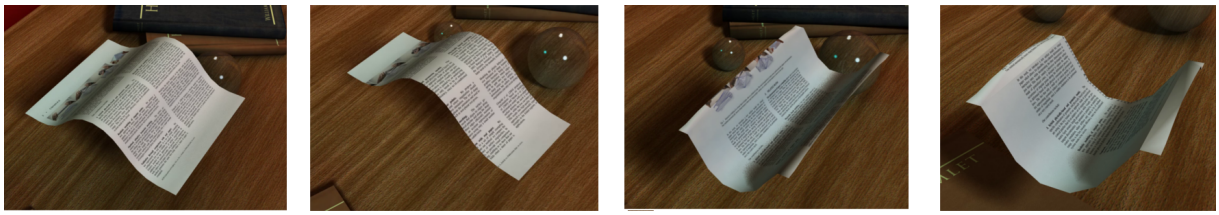
[GA14] GIORDANO B. L., AVANZINI F. : Perception and synthesis of sound-generating materials. In *Multisensory Softness*. Springer, 2014, pp. 49–84.

[HS96] HOULE P. A., SETHNA J. P. : Acoustic emission

(a) *Configuration du papier*

(b) *Spectrogrammes (500 ms)*

Figure 12: *Sons simples de froissement de papier réel pour différentes tailles de feuilles de papier (500ms). De gauche à droite : 210x297 mm (A4), 210x148 (half A4), 105x297 (A5), 105x148(A6)*



(a) *Configuration du papier*

(b) *Spectrogrammes (500 ms)*

Figure 13: *Sons simples de froissement de papier virtuel pour différentes tailles de feuilles de papier (500ms). De gauche à droite : 210x297 mm (A4), 210x148 (half A4), 105x297 (A5), 105x148(A6)*

from crumpling paper. *Physical Review E. Vol. 54*, Num. 1 (1996), 278.

[JBP06] JAMES D. L., BARBIC J., PAI D. K. : Precomputed acoustic transfer : Output-sensitive, accurate sound generation for geometrically complex vibration sources. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH. Vol. 2006* (2006), 987–995.

[JP02] JAMES D. L., PAI D. K. : Dyrt : dynamic response textures for real time deformation simulation with graphics hardware. *ACM Transactions on Graphics (TOG). Vol. 21*, Num. 3 (2002), 582–585.

[KL96] KRAMER E. M., LOBKOVSKY A. E. : Universal power law in the noise from a crumpled elastic sheet. *Physical Review E. Vol. 53*, Num. 2 (1996), 1465.

[LAJJ14] LANGLOIS T. R., AN S. S., JIN K. K., JAMES D. L. : Eigenmode compression for modal sound models. *ACM Trans. Graph.. Vol. 33*, Num. 4 (juillet 2014), 40 :1–40 :9.

[LFD*15] LEJEMBLE T., FONDEVILLA A., DURIN N., BLANC-BEYNE T., SCHRECK C., MANTEAUX P.-L., KRY P. G., CANI M.-P. : Interactive procedural simulation of paper tearing with sound. In *Motion In Games (MIG)* (Paris, France, novembre 2015).

[MAKMV10] MARELLI D., ARAMAKI M., KRONLAND-MARTINET R., VERRON C. : Time-frequency synthesis of noisy sounds with narrow spectral components. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing. Vol. 18*, Num. 8 (2010), 1929–1940.

[OCE01] O'BRIEN J. F., COOK P. R., ESSL G. : Synthesizing sounds from physically based motion. 529–536.

[OSG02] O'BRIEN J. F., SHEN C., GATCHALIAN C. M. : Synthesizing sounds from rigid-body simulations. 175–181.

[PW89] PENTLAND A., WILLIAMS J. : Good vibrations : Modal dynamics for graphics and animation. *SIGGRAPH Comput. Graph.. Vol. 23*, Num. 3 (juillet 1989), 207–214.

[RDRD92] RODET X., DEPALL P., RODET X., DEPALLE P. : Spectral envelopes and inverse fft synthesis. In *Proceedings of the 93rd Audio Engineering Society Convention* (1992).

[RL06] RAGHUVANSHI N., LIN M. C. : Interactive sound synthesis for large scale environments. In *Proceedings of the 2006 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games* (New York, NY, USA, 2006), I3D '06, ACM, pp. 101–108.

[Roa04] ROADS C. : *Microsound*. The MIT Press, 2004.

[RYL13] REN Z., YEH H., LIN M. C. : Example-guided physically based modal sound synthesis. *ACM Trans. Graph.. Vol. 32*, Num. 1 (Febuary 2013), 1 :1–1 :16.

[S*00] SCHWARZ D., ET AL. : A system for data-driven

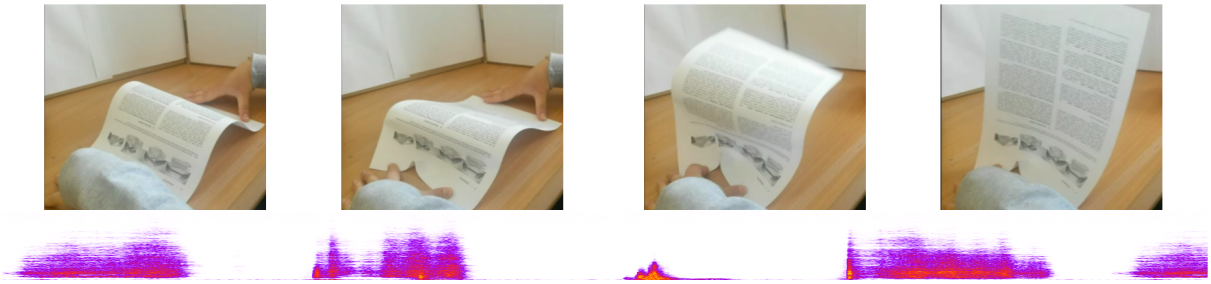
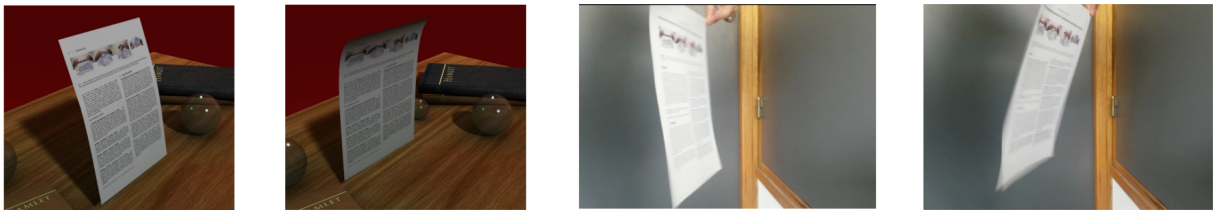
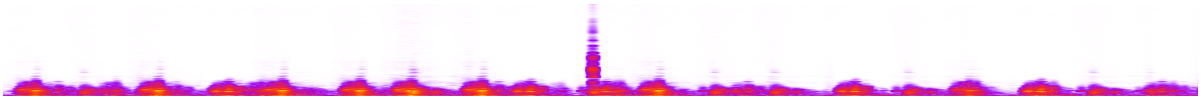


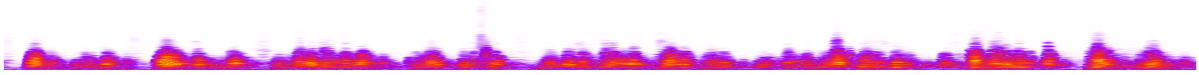
Figure 14: *L'expérience de la fig. 1 peut être reproduite avec de papier réel. On obtient un spectrogramme similaire (3.80 secondes).*



(a) *À gauche la feuille de papier virtuelle, à droite le feuille de papier réelle.*



(b) *Spectrogramme du son produit par le papier virtuel.*



(c) *Spectrogramme du son produit par le papier réel.*

Figure 15: *Une feuille de papier A4 tenue par deux coins est doucement secouée. L'animation dure 3 secondes*

concatenative sound synthesis. In *Digital Audio Effects (DAFx)* (2000), pp. 97–102.

[S*04] SCHWARZ D., ET AL. : Data-driven concatenative sound synthesis.

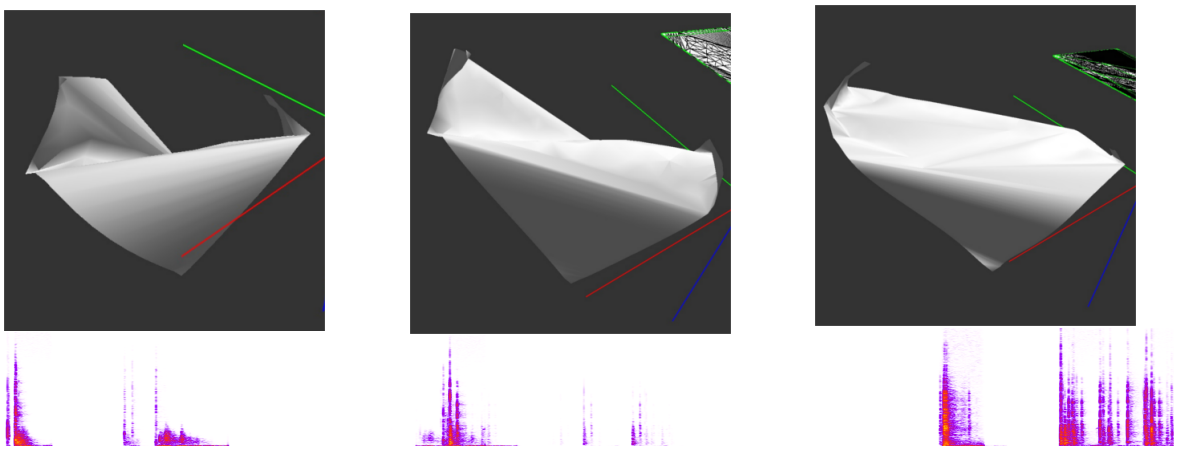
[SC05] SCAVONE G., COOK P. R. : Rtmidi, rtaudio, and a synthesis toolkit (stk) update.

[SRH*16] SCHRECK C., ROHMER D., HAHMANN S., CANI M.-P., JIN S., WANG C. C., BLOCH J.-F. : Non-smooth developable geometry for interactively animating paper crumpling. *ACM Trans. Graph.* (2016). accepted.

[TH92] TAKALA T., HAHN J. : Sound rendering. 211–220.

[vdDKP01] VAN DEN DOEL K., KRY P. G., PAI D. K. : Foleyautomatic : Physically-based sound effects for interactive simulation and animation. 537–544.

[ZJ10] ZHENG C., JAMES D. L. : Rigid-body fracture sound with precomputed soundbanks. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2010). Vol. 29*, Num. 3 (juillet 2010).



(a) *183 triangles* (b) *446 triangles* (c) *1333 triangles*

Figure 16: *Le son produit est semblable pour des animations de papier froissé à différentes résolutions. Chaque spectrogrammes représente un extrait durant 2 secondes.*