



HAL
open science

Synthèse sonore par modèle physique : étude d'un percuteur élémentaire

Patrick Fourcade, Claude Cadoz

► To cite this version:

Patrick Fourcade, Claude Cadoz. Synthèse sonore par modèle physique : étude d'un percuteur élémentaire. Journées d'Informatique Musicale, May 1996, île de Tatihou, France. <hal-02986340>

HAL Id: hal-02986340

<https://hal.science/hal-02986340v1>

Submitted on 2 Nov 2020

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.



HAL Authorization

Synthèse sonore par modèle physique : étude d'un percuteur élémentaire

Patrick Fourcade (fourcade@imag.fr)

Claude Cadoz (Claude.Cadoz@imag.fr)

ACROE[1], 46 Avenue Félix Viallet 38000 Grenoble

Résumé. -- Cet article décrit une étude et une simulation des processus de percussion à partir d'un modèle élémentaire élaboré à l'aide du formalisme CORDIS-ANIMA. Le modèle de percussion minimal est basé sur une interaction à deux états entre deux masses ponctuelles. Étudié selon toutes les possibilités de variations offertes par ses paramètres, le modèle permet de mettre en évidence des catégories sonores bien distinctes. L'étude de ces catégories a été effectuée en mettant en correspondance les trois formes de représentation : – le modèle physique générateur, – le signal numérique, – le phénomène sonore résultant et sa perception. Mots clés : modélisation physique, synthèse sonore, percussion.

1. Introduction

Un des problèmes cruciaux posé par les techniques de synthèse sonore est celui du contrôle. Si les formes perceptuelles du timbre sont pour la plupart fidèlement reproduites, la gestion de leur conduite, la maîtrise de leurs micro variations, en un mot l'expressivité de la forme restent difficiles à réaliser en terme de synthèse. Or une grande partie du travail de l'instrumentiste est consacrée à cette notion : la palette sonore. Celle-ci est liée lors de l'écoute au processus perceptif de différenciation ; ce processus s'oppose au processus d'identification de la source sonore rattaché à la forme du timbre [Castellengo 1987].

Nous faisons l'hypothèse qu'il existe des invariants perceptuels (esthésiques[2]) basés sur la relation physique : percuteur / objet sonore percuté. Ces invariants seraient indépendants dans une certaine mesure du processus d'identification de l'objet sonore présenté ; nous cherchons alors un modèle générique de percussion pour les mettre en évidence.

Nous utilisons le formalisme de modélisation et simulation des objets physiques CORDIS-ANIMA (développé à l'ACROE, [Cadoz et al. 1990]).

Notre méthode d'investigation s'appuie sur une mise en correspondance des trois niveaux de représentation en cause : la description physique du modèle de production, la perception du son, l'analyse du signal.

2. le modèle de percussion élémentaire

Le phénomène de percussion résulte du choc physique entre une structure vibrante et un percuteur ; l'interaction a par essence un caractère fortement non-linéaire et concerne au moins deux objets. La loi de Hertz stipule que le contact normal entre deux corps hookéens est du type $F=A.U^{1.5}$ ou F est la force exercée, A une constante et U la compression des deux corps. [Doutaut et al. 1994] ont modélisé la percussion d'une barre vibrante avec ce type d'interaction. Par ailleurs, d'après les études menées sur le piano par [Boutillon 1988], le contrôle par le pianiste de la percussion d'une note isolée se réduit à la communication d'une vitesse au marteau. Enfin, souvent la tête du percuteur est recouverte par un matériau déformable comme le feutre ou le caoutchouc. Le feutre des marteaux de piano joue un rôle important lors du contact percuteur / structure vibrante. Il se déforme élastiquement et absorbe une partie de l'énergie. Un modèle simple est de considérer une interaction de type $F=AU^p$ ou p est un réel [Ghosh 1932]. Expérimentalement, p est compris entre 2 et 3 d'après [Stulov 1995]. Deux modèles plus raffinés proposés par [Stulov 1995] et par [Boutillon 1988] prennent en compte le comportement hystérétique du feutre. De ces études sur la percussion pianistique et sur la percussion de lames vibrantes, nous retiendrons l'aspect non-linéaire du processus d'excitation mais nous garderons la linéarité des propriétés viscoélastiques du corps intermédiaire.

Partant de ces considérations nous avons mis en oeuvre un modèle de percussion élémentaire. Il nous semble intéressant d'explorer le potentiel sonore d'une relation linéaire traduisant la compression d'un élément ad'hoc entre le percuteur et l'objet percuté. Le percuteur est une masse ponctuelle M_p dotée d'une vitesse initiale v_{op} . La structure vibrante est une masse ponctuelle M_c reliée à un point fixe par une liaison visco-élastique linéaire de raideur K_c et de viscosité Z_c . Nous l'appelons Cellule. Le son obtenu est issu de la variation de la position de la masse M_c au cours du temps. Le corps intermédiaire est modélisé par une liaison visco-élastique linéaire de raideur K_l et de viscosité Z_l effective lors du contact percuteur-Cellule. Bien que Tous les mouvements sont unidimensionnels selon l'axe y . On remarquera que dans ce modèle volontairement simplifié, la prise en compte du geste instrumental se réduit à la donnée d'une vitesse initiale.

L'interaction est telle que lorsque la position y_p du percuteur est inférieure à la position y_c de la masse de la Cellule, la liaison viscoélastique de type $F = K_l(y_p - y_c) + Z_l(\dot{y}_p - \dot{y}_c)$ s'installe entre les deux masses. Dès que le percuteur est au-dessus de la masse de la Cellule, la liaison disparaît. Le percuteur est alors une masse libre. Nous appelons "butée viscoélastique" ce type de liaison (cf Figure 1).

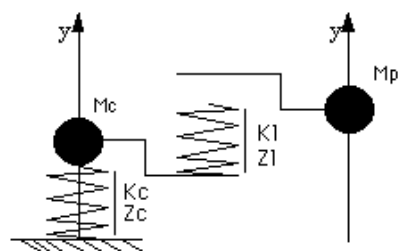


Figure 1. Modèle élémentaire de percussion. M_c , K_c , Z_c : masse, raideur et viscosité de la Cellule. M_p : masse du percuteur. K_l , Z_l : raideur et viscosité de la butée viscoélastique.

y_{po} et y_{co} étant les positions initiales respectives du percuteur et de la masse de la Cellule, le système est décrit suivant l'approche fonctionnelle ci-dessous :

(état libre) (état lié)

$$\begin{cases} \dot{y}_p > y_a \\ m_a \ddot{y}_a = -k_a y_a - z_a \dot{y}_a \\ m_p \ddot{y}_p = 0 \end{cases} \quad (I) \quad \begin{cases} \dot{y}_p \leq y_a \\ m_a \ddot{y}_a = -k_a y_a - z_a \dot{y}_a + k_1 (y_p - y_a) + z_1 (\dot{y}_p - \dot{y}_a) \\ m_p \ddot{y}_p = -k_1 (y_p - y_a) - z_1 (\dot{y}_p - \dot{y}_a) \end{cases} \quad (II)$$

Les conditions initiales s'écrivent :

$$\begin{cases} t = 0 \\ \dot{y}_a = 0, y_a = y_{ao} = 0 \\ \dot{y}_p = v_{p0}, y_p = y_{p0} \end{cases} \quad (III)$$

Ce système d'équations bien que trivial n'admet aucune solution analytique.

La simulation en CORDIS-ANIMA du système (I, II, III) est discrète. La discrétisation est telle que le pas temporel est de T_e . Les vitesses et les accélérations issues des signaux discrets des positions respectives du percuteur (indice p) et de la masse de la cellule (indice c) sont décrites de la façon suivante :

$$\begin{cases} y_{p,c}(n) = \frac{y_{p,c}(n) - y_{p,c}(n-1)}{T_e} \\ \dot{y}_{p,c}(n) = \frac{y_{p,c}(n) - 2y_{p,c}(n-1) + y_{p,c}(n-2)}{T_e^2} \end{cases}$$

Le signal de force discret $F_{p,a}(n)$ de la butée viscoélastique entre le percuteur et la masse de la Cellule est tel que :

$$\begin{cases} F_{p,c}(n) = -F_{c,p}(n) \\ F_{p,c}(n) = -k_p \frac{y_p(n) - y_c(n)}{T_e} - z_p \frac{(y_p(n) - y_p(n-1)) - (y_c(n) - y_c(n-1))}{T_e^2} \end{cases}$$

3. Méthodologie

Nous explorons le modèle à partir des paramètres physiques. L'espace des simulations de percussion est constitué de six paramètres : la masse de la Cellule M_c , la raideur K_c et la viscosité Z_c de la Cellule, la masse du percuteur M_p , la raideur K_l et la viscosité Z_l de la butée viscoélastique.

Le paramètre V_{p0} , vitesse initiale du percuteur, n'est pas pris en compte. Il a été fixé à 1 m.s^{-1} . En effet, ce paramètre contrôle exactement l'amplitude du signal sonore. Il suffit de remarquer que le système (I, II, III) est invariant par une transformation de coordonnée $y' = \lambda y$ ou $\lambda \in \mathbb{R}$ et que la modification de la vitesse initiale du percuteur revient à faire ce type de transformation. On sait que la sensation d'intensité sonore est relativement bien corrélée avec l'amplitude du signal sonore. Elle varie à peu près suivant le logarithme de l'amplitude. Dans un contexte sonore pauvre comme celui de la percussion simple (son isolé) la relation se vérifie d'autant mieux.

Chaque son simulé est l'objet d'une analyse en terme de signal. En particulier, nous nous sommes intéressés aux grandeurs suivantes :

- la *temps de montée* qui caractérise la durée entre l'instant où la Cellule est au repos et l'instant où la Cellule atteint une amplitude maximale ;
- la *nombre de contacts* lors de la percussion, défini par le nombre d'aller-retour du percuteur vers la masse de la Cellule ;
- l'*énergie transmise* au système Cellule-butée par le percuteur, égale à la différence entre l'énergie cinétique du percuteur à l'instant initial et l'énergie cinétique du percuteur après la percussion ;
- la *rapport d'attaque*, défini par le rapport entre l'amplitude maximale de la Cellule lors de l'attaque et l'amplitude maximale de la Cellule après le dernier contact.

Nous disposons des trajectoires temporelles du percuteur et de la masse de la Cellule. L'analyse des sons par spectrogramme est réalisée à l'aide du logiciel Audiosculpt développé à l'Ircam [3].

Nous avons procédé à une analyse esthétique des sons produits. Ils sont échantillonnés à 44,1KHz et ont été calibrés préalablement. L'écoute se déroule en deux étapes. Premièrement, les sons, dont l'identification est masquée, sont groupés suivant leur similarité perceptive. Deuxièmement, les groupes ainsi construits sont réécoutés, réarrangés si nécessaire, et font l'objet d'une description verbale. On caractérise l'attaque et la résonance des sons de percussion à l'intérieur de chaque groupe.

4. Expérimentations et résultats

4.1 Variation de M_p , K_l , Z_l à Cellule fixe

Nous avons fixé les paramètres de la Cellule pour une fréquence de résonance de 503 Hz, un taux d'amortissement de 2 s et une masse M_c de 10^{-5} Kg . Nous appelons taux d'amortissement la grandeur $[[\tau]]$ homogène à un temps telle que l'amortissement de la Cellule soit du type $\exp(-t/[[\tau]])$. On en déduit K_c et Z_c ; soit $K_c = 100 \text{ N.m}^{-1}$ et $Z_c = 10^{-5} \text{ N.s.m}^{-1}$. Une exploration systématique des trois paramètres restant M_p , K_l , Z_l a été réalisée. Les zones de divergences des simulations numériques déterminent les frontières de l'espace d'expérimentation. Le degré de résolution de ces expérimentations est gouverné par la capacité à discriminer deux sons voisins à l'écoute.

Ainsi, nous avons mené deux séries d'expérimentations. La première est constituée de l'ensemble des combinaisons (M_p , K_l , Z_l) des grandeurs suivantes :

$$M_p = 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} \text{ Kg},$$

$$K_l = 1, 10, 100, 10^3, 10^4 \text{ Nm}^{-1},$$

$$Zl = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1} \text{ Nsm}^{-1};$$

soit 125 sons de deux secondes.

La deuxième est constituée de l'ensemble des combinaisons (Mp,Kl) des grandeurs ci-après :

$$Mp = 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 3.16.10^{-7}, 3.16.10^{-6}, 3.16.10^{-5},$$

$$3.16.10^{-4}, 3.16.10^{-3}, 3.16.10^{-2}, 3.16.10^{-1} \text{ Kg},$$

$$Kl = 1, 10, 100, 10^3, 10^4, 3.16, 3.16.10^1, 3.16.10^2, 3.16.10^3 \text{ Nm}^{-1},$$

pour une valeur de frottement de liaison fixe, $Zl = 10^{-5} \text{ Nsm}^{-1}$; soit 90 sons.

4.1.1. Variations de la masse Mp du percuteur et de la raideur Kl : résultats

L'étude des différentes formes d'attaque des signaux met en évidence quatre configurations de courbe : d, dp, L et M. La figure 2 illustre les quatre configurations. Les évolutions au cours du temps des positions du percuteur et de la masse de la Cellule sont représentées ainsi que la variation de la force d'interaction entre les deux masses.

File Name : delta_jim.eps
Creator : gnuplot

File Name : deltaP_jim.eps
Creator : gnuplot

Figure 2a Figure 2b

File Name : lie_jim.epss
Creator : gnuplot

File Name : maillage_jim.epss
Creator : gnuplot

Figure 2c Figure 2d

Figure 2. Quatre configurations de signal : delta (d) : interaction limitée à la communication d'une force, delta-p (dp) : similaire avec *rapport d'attaque* > 1, liée (L) : un seul contact, maillage (M) : contacts multiples.

En analysant les différents timbres produits, nous avons identifié six catégories sonores et deux qualités. Les catégories sont désignées par les lettres A, A', B, B', C et C', les qualités par les mentions *attdbl* et *atrsrd*. La qualité *attdbl* correspond à une sensation d'attaque percussive double. La qualité *atrsrd* est liée à l'impression de hauteur subjective grave du transitoire. Il s'agit de l'attribut de hauteur spectrale correspondant au centre de gravité spectrale^[4] (c.g.s.).

La catégorie A semble être représentée par un seul candidat, un son de "sinusoïde amortie" sans identité d'attaque perceptible.

La catégorie A' contient des sons A avec une attaque plus sèche ; on remarque un léger effet de pincement.

Les attaques de la catégories B évoque un choc "massique" comme la percussion de deux boules de billard. On a l'impression que les objets percutés sont lourds.

Les timbres B', proches de B, se caractérisent par le fait que la sensation d'attaque double se situe au seuil de l'acuité temporelle. Un référent possible est le bruit d'un sabot de cheval sur des pavés.

Les attaques de la catégorie C s'apparentent aux consonnes labiales comme le "B" ou le "P". Les sons C peuvent évoquer le bruit que fait un bouchon de liège au sortir d'une bouteille ou encore celui d'un ballon sous-gonflé percutant un sol en ciment.

La figure 3 montre la répartition des catégories à l'intérieur de l'espace des paramètres physiques (Mp, Kl).

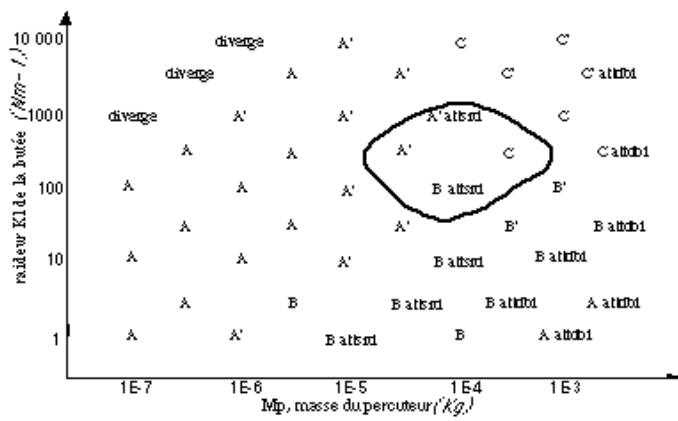


Figure 3. Correspondance poétique-esthétique du percuteur à Cellule fixe. A : son de "sinusoïde amortie", percussion neutre, A' : son A très sec, effet de pincement, B : son "massique", choc de boules de billard, B' : son B au seuil de fusion de la qualité attdbl, C : labiale, évoque la consonne "P", C' : labiale, évoque la consonne "B", att dbl : qualité, sensation d'une attaque double, attdbl : qualité, sensation de hauteur spectrale grave

En mettant en correspondance ces deux analyses (figure 4) nous remarquons une forte corrélation entre ces deux espaces de représentation. Il est clair que l'attaque du signal contient potentiellement toute l'information esthétique mais la sensibilité et la complexité esthétique sont en général différentes de la sensibilité et de la complexité dans l'espace du signal. Ici elles sont comparables. Trois zones principales se dégagent avec un axe tangible à masse du percuteur importante. Les paramètres de production (paramètres poétiques [5]) varient beaucoup puisque l'échelle est logarithmique. Le maillage réalisé à peu près la sensibilité auditive des opérateurs. En effet, des explorations plus fines des paramètres Mp et KI rendent difficile la caractérisation esthétique. On remarquera une zone particulière (encerclée dans la figure 3) qui contient les catégories A, B et C.

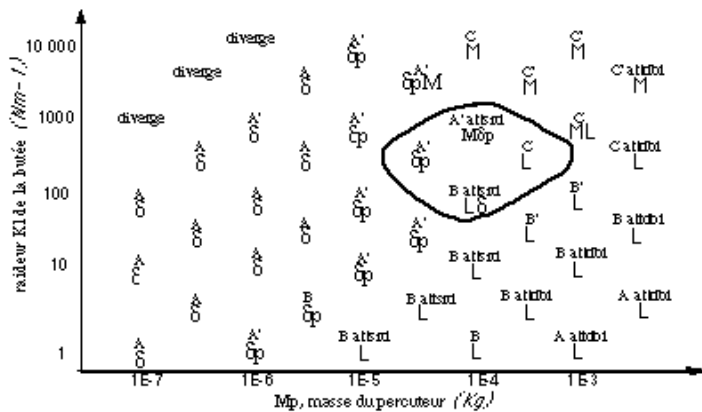


Figure 4. Correspondance poétique-neutre-esthétique du percuteur à Cellule fixe.

Les quatre configurations de signal combinées aux catégories sonores nous ont conduit à parler de forme percussive.

forme d :

Elle est la plus représentée. Identifiable facilement, elle ne comporte aucune nuance. Bien que l'espace des paramètres poétiques soit vaste, deux sons d ne pourront être différenciés. Ceci se conçoit bien puisque l'interaction percuteur-percuté se réduit à une force communiquée durant environ 1/3 de la période de la Cellule. De plus, la Cellule se comporte vis à vis du percuteur comme un point fixe (masse importante). Il y a identité entre l'information esthétique A et l'information sur le signal, la forme d.

La forme dp :

Elle est très similaire à la précédente. Deux contacts la caractérisent. La différence au niveau du signal est dans le rapport d'attaque. Le percuteur est renvoyé par la cellule qui perd alors une grande partie de son énergie lors du deuxième contact. Ce phénomène est analogue au renvoi du marteau par le front d'onde de la corde du piano. L'amplitude de l'attaque est donc grande vis à vis de celle de la résonance.

forme L :

Elle est caractérisée par une phase de contact relativement longue. Elle illustre le comportement du système lié (II). La masse du percuteur est grande. Les catégories B, B' et A sont présentes. À masse du percuteur importante, quel que soit la raideur de liaison, la perception d'une attaque double intervient. Il s'agit nullement d'un rebond réel du percuteur sur la structure. L'effet diminue lorsque Zc diminue. Durant la phase de contact, la Cellule qui oscille a le temps de dissiper de l'énergie. Lorsque le percuteur refait surface, il se comporte comme un générateur de force. La Cellule est de nouveau excitée et s'amortit de nouveau. Un effet similaire est obtenu lorsque Zl augmente (cf. 4.1.2 et figure 10 en annexe). Cette qualité influence l'identification uniquement lorsqu'il y a ambiguïté entre la perception d'une attaque simple ou double ; c'est la catégorie B'. Les sons A observés à faible raideur KI et masse Mp importante traduisent le fait que les attaques de forme L ne constituent plus une unité perceptive. L'excitation revient à appliquer deux forces ponctuelles, l'une en début de contact, l'autre en fin, entre deux instants grands par rapport à la période de la structure vibrante.

Tab 1. Caractéristiques des formes percussives génératives, les grandeurs en italiques sont moyennées sur l'ensemble des sons.

	forme d	forme dp	forme L	forme M
masses	<i>Mp</i> ~	<i>Mp</i> ~ <i>Mc</i>	<i>Mp</i> ~	<i>Mp</i> ~
	<i>Mc</i> /10		100 . <i>Mc</i>	100 . <i>Mc</i>

raideurs	K1~ 4.Kc	K1~ 16.Kc	K1~ Kc / 2	K1~ 40.Kc
catégor- ies sonores	A neutre	A' pincemen t	B et B' choc massiqu e	C et C' "B" et "P"
Temps de montée	0.7ms	1ms	15ms	5ms
nombre de contacts	1	1.8	1	9
énergie transmis e	50%	8%	0.2%	1%
rapport d'attaqu e	1	12	60	10

forme **M** :

Ici, la non-linéarité du processus intervient de façon prépondérante. La raideur de liaison et la masse du percuteur sont importantes. Les contacts sont multiples. Deux catégories sonores correspondent à ce mode d'interaction. Les sons C' sont provoqués par un nombre de contacts importants. Les sons C ont une propriété remarquable : ils sont le siège d'une modulation de fréquence durant l'attaque. Le sonagramme d'un son C avec une fenêtre d'analyse très courte exprime clairement cet effet (cf. annexe Figure 9.). Par filtrage, nous pouvons montrer que les hautes fréquences sont responsables de cette identité.

Les formes génératives d, dp, L, M sont bien décrites par la connaissance du *temps de montée* et du *nombre de contacts*. Les combinaisons des critères *nombre de contacts* et *temps de montée* permettent de regrouper les formes (cf figure 5)

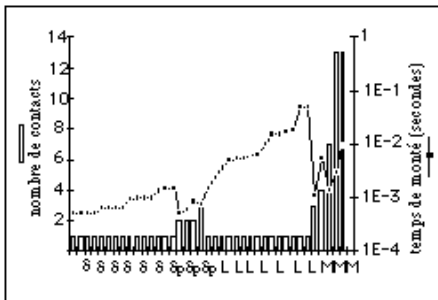


Figure 5. Variation du temps de montée et du nombre de contacts par rapport aux formes percussives. Ces deux critères permettent de grouper les formes percussives.

4.1.2. Effet de la viscosité de liaison (ZI)

D'une manière générale, ce paramètre modifie très peu la percussion tant sur le plan physique que sur le plan esthétique. Lorsque $ZI < 10^{-2} \text{ N.s.m}^{-1}$, aucune observation supplémentaire par rapport à la viscosité nulle apparaît. Lorsque $ZI > 10^{-2} \text{ N.s.m}^{-1}$, pour les percussions dont l'attaque est courte ($< 1\text{ms}$) aucune observation supplémentaire apparaît. En revanche, pour les percussions dont l'attaque est longue ($> 10\text{ms}$), typiquement la forme L et la forme M, la sensation de l'attaque devient double sans altérer les caractéristiques du timbre ; la figure 9 en annexe illustre cet effet sur la forme L. Lorsque l'on filtre les énergies à basse fréquence de ce son, on obtient deux sinusoides amorties successives et la perception des deux attaques reste identique. Certes la sensation de hauteur pour la première n'existe pas mais son énergie, qui s'atténue au cours du temps, provoque la sensation d'une attaque. Les oscillations à basses fréquences sont donc responsables de ce phénomène. Dans le cas de percussion à un contact, ce dédoublement correspond au choc et à l'anti-choc du percuteur sur la Cellule. Il est une illustration de la symétrie approchante du signal de force (cf figure 2b).

Au delà, pour un ZI plus important on observe que sur les trois formes L, M, d, l'augmentation de ce paramètre provoque : - la diminution puis la suppression des oscillations durant l'attaque, - la diminution du *nombre de contacts*, - l'augmentation de l'*énergie transmise*, - la diminution légère du *Temps de montée*.

Enfin, un phénomène très original apparaît à percuteur léger ($M_c/10$) et à raideur de liaison très faible ($K_c/100$). Il s'agit d'un changement de fréquence à l'attaque. Le percuteur reste très longtemps au dessous de la masse de la Cellule et vibre de concert avec elle (pendant 50 millisecondes). Cette faible masse attachée à la Cellule diminue la fréquence de résonance de l'oscillateur. Bien que faible physiquement, la masse additionnelle représente 1/10 de la masse de la Cellule. Cela correspond à un intervalle de hauteur de 70 cents ; cet intervalle se perçoit tout de suite. Le timbre évoque une goutte d'eau (cf figure 6).

File Name : goutte_jim.eps
Creator : gnuplot

Figure 6. forte viscosité ,faible raideur de la Butée viscoélastique et percuteur léger : le percuteur vibre de concert avec la Cellule durant 50

ms

Lorsque ZI est de l'ordre de 0.1 N.s.m^{-1} , on atteint rapidement une zone de divergence numérique.

4.2 Variation de la Cellule (Mc, Kc, Zc) à percuteur (Mp, KI, ZI) fixe

Afin d'évaluer globalement l'effet de la structure sonore sur notre analyse, nous avons été conduits à expérimenter les variations des paramètres de la Cellule pour un percuteur donné. Soit $M_p = 10^{-5} \text{ Kg}$, $K_I = 100 \text{ Nm}^{-1}$, $Z_I = 10^{-5} \text{ Nsm}^{-1}$ et $V_{op} = -1 \text{ ms}^{-1}$.

Nous avons expérimenté l'ensemble des combinaisons (Mc, Kc, Zc) des grandeurs suivantes :

$$M_c = 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} \text{ Kg},$$

$$K_c = 1, 10, 100, 10^3, 10^4 \text{ Nm}^{-1},$$

$$Z_c = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1} \text{ Nsm}^{-1};$$

soit 125 sons de deux secondes.

La caractérisation esthétique est assez difficile. L'objectif initial était de montrer la faiblesse de la méthode d'expérimentation basée sur une Cellule vibrant à 503Hz. Cette expérience n'a pas permis de dégager des relations intéressantes.

Cependant, la variation de l'amortissement de la Cellule Zc provoque du point de vue perceptif trois phénomènes très connus que nous rappelons. À amortissement moyen, la modification du paramètre est liée exactement à la perception de la durée de la résonance du son. Elle ne modifie aucunement la perception de l'attaque. À fort amortissement, la résonance disparaît. La perception de l'attaque devient très différente. Il est possible que notre système auditif se focalise alors sur la hauteur spectrale [6] de l'impact. À faible amortissement, nous avons remarqué que l'identité de l'attaque se perdait au profit de la résonance. Les détails qui peuvent nous guider dans la ségrégation des attaques se noient si l'amortissement de la Cellule diminue. Ceci est une évidence pour un analyseur temps-fréquence. Plus le signal de percussion présente un faible amortissement, plus sa réponse en fréquence est étroite ; donc l'aspect temporel de ce signal est occulté par la dualité temps-fréquence.

De plus, il est apparu, à l'issue du balayage en fréquence de la Cellule percutee, des identités sonores ponctuelles et très remarquables. Une forme d évoque fortement la percussion d'un Djembé. Des percussions d'objets en verre sont apparues également.

4.3 Percussion de Cellules à fréquence et amortissement communs mais de masses différentes.

Si l'on décide de maintenir la Cellule à une fréquence et à un taux d'amortissement constants, d'après les équations I, II, III , un seul des trois paramètres Mc, Kc, Zc est libre. Nous choisissons de faire varier Mc. En négligeant l'influence de ZI, le système est constitué ainsi de trois variables indépendantes : Mp, KI, Mc (la vitesse initiale du percuteur ne jouant aucun rôle).

Nous avons étudié l'ensemble des combinaisons (Mp,Mc,KI) des valeurs suivantes :

$$M_p = 10^{-7}; 10^{-6}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3} \text{ Kg},$$

$$M_p/M_c = 0,01; 0,1; 1; 10; 100,$$

$$K_I = 1; 10; 100; 1000; 10000 \text{ Nm}^{-1},$$

$$Z_I = 10^{-5} \text{ Nsm}^{-1};$$

soit 125 sons pour $f_c=503\text{Hz}$ et $[\tau] = 2$ secondes.

L'analyse de ces sons donnent les mêmes catégories esthétiques et les même configurations de signal que l'analyse à percuteur variable. On retrouve les formes M et L pour un rapport Mp/Mc grand, et la forme d pour un rapport faible. La différence est que le lien entre les formes percussives et l'espace poétique est réalisé plus facilement. En effet, si on se place à rapport Mp/Mc constant et KI fixe, la variation simultanée des masses Mp et Mc génère l'ensemble des configurations de signal. Plus précisément, l'augmentation des deux masses, à fc, [[tau]], Mp/Mc et KI fixent, permet de passer de M à d, de d à dp, de dp à L et cela suivant un ordre toujours respecté. Lorsque le rapport Mp/Mc devient grand (de l'ordre de 100), les formes percussives d, dp ne figurent plus ; le système passe continûment de M à L (cf figure 7 et 8). Ce passage est important : d'une part car la plus grande variété des identités sonores est située dans cette zone (percuteur lourd) ; d'autre part car la variation des masses contrôle finement le nombre de contacts réalisés. Ceci constitue le résultat essentiel de notre étude.

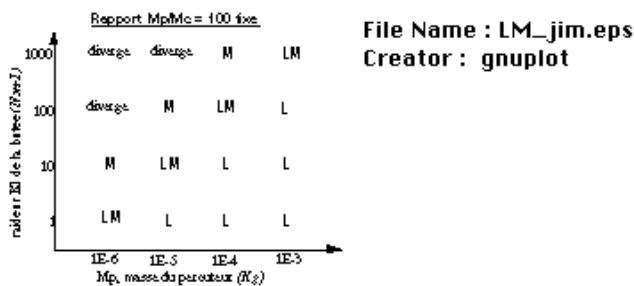


Figure 7. Continuité poétique d'une forme liée Figure 8. forme LM , $K_I = 100 \text{ N.m}^{-1}$,

vers une forme maillage $M_p = 10^{-3} \text{ Kg}$, $M_c = 10^{-5} \text{ Kg}$.

Conclusion

Proposant un modèle de percussion élémentaire pour la synthèse, nous avons exploré les potentiels sonores de ce dernier en essayant de comprendre les trois niveaux de connaissances en cause. Nous avons mis en évidence quatre formes percussives (d, dp, L, M) qui sont liées pertinemment à la perception des sons simulés. La première décrit une situation physique dans laquelle on peut négliger le caractère non-orienté de l'interaction percussive. La deuxième proche de l'excitation ponctuelle traduit le phénomène du renvoi du percuteur par la Cellule. La troisième est une percussion à un contact où les propriétés du système lié interviennent de façon prépondérante. La quatrième génère des contacts multiples et fait intervenir le caractère non-linéaire de la liaison. Les différents paramètres du modèle pour générer des variations de timbre audibles doivent varier suivant une échelle exponentielle. Nous remarquons que plus la durée de l'interaction est longue entre le percuteur et la Cellule, plus grande est la variété des timbres obtenus. Nous avons vu que :

- la vitesse initiale du percuteur contrôle explicitement l'intensité sonore ;
- la viscosité de liaison agit peu sur le timbre ;
- les masses et la raideur de la liaison contrôlent le timbre ;
- le *temps de montée* et le *nombre de contacts* sont pertinents pour l'analyse esthétique.

Enfin la variation conjuguée des masses M_p et M_c , à rapport M_p/M_c constant, pour une Cellule de résonance 503Hz et d'amortissement 2 sec., permet de passer d'une forme à une autre de manière continue et d'ajuster finement le nombre de contacts.

Cette étude préliminaire sur la percussion permet de mieux comprendre la non-linéarité de l'interaction percuteur-percuté qui est commune à tous les phénomènes de percussion. Un prolongement de ce travail consiste à enrichir la structure vibrante et à faire le lien avec la connaissance du modèle de percussion présenté. La connaissance approfondie de la relation percussive permettra d'entrevoir les palettes sonores des instruments de percussion. L'identité et l'expressivité des formes de percussion seront ainsi accessibles. Des structures virtuelles pourront être alors percutées avec toute la richesse expressive d'une vraie relation musicale instrumentiste / corps sonore.

Références

[Boutillon 1988] Boutillon X., "Model for piano hammers: Experimental determination and digital simulation" *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 746-754.

[Cadoz et al. 1990] Cadoz C., Luciani A. et Florens JL., *CORDIS-ANIMA : Système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et l'image animée*, Collection "Recherche Musique et Danse", *Actes du colloque "Modèle physique, création musicale et ordinateur" organisé par l'ACROE Grenoble 90*, Ed. Maison des Sciences de l'Homme, Paris 94.

[Castellengo 1987] Castellengo M., Les sources acoustiques, in D. Mercier (Ed.) *Le livre des techniques du son*, tome 1, Paris, Editions Fréquences, pp.45-70.

[Doutaut et al. 1994] Doutaut V. and Chaigne A., "Numerical simulations of bar percussion instruments", *Journal de physique IV*, Colloque C5, Suppl. JP III, Vol 4.

[Fourcade et al. 1996] Fourcade P. et Cadoz C., "Sound synthesis by physical modelling: an elementary striker.", *actes du colloque Forum Acusticum*, Antwerpen, Avril 96, suppl. 1.

[Ghosh 1932] Ghosh M., *India J. Phys.* 7, pp. 365-382.

[Stulov 1995] Stulov A., "Hysteretic model of the grand piano hammer felt", *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, pp. 2577-2585.

Annexe :

File Name : dbllie_jim.eps

Creator : gnuplot

Figure 9 percussion de forme L, sensation d'une attaque double.

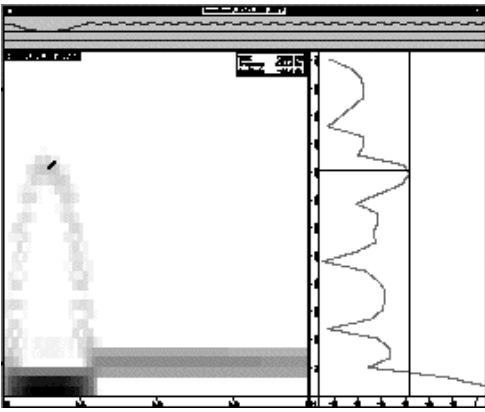


Figure 10 abscisse : échelle des temps en secondes, ordonnée : échelle des fréquences en Hz, Les sons M sont le siège d'une modulation de fréquence durant l'attaque.