

# Rapport du Projet PSAR : Dispositif Autonome de Synthèse Sonore

Encadrant : Hugues Genevois  
Cahier de Charges

Pierre Mahé

3 mai 2015

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Contexte Global . . . . .	3
1.2	Presentation de la demande . . . . .	3
1.3	La Carte Udoo . . . . .	4
1.4	Pure Data . . . . .	4
1.4.1	Presentation generale . . . . .	4
1.4.2	Externals . . . . .	5
1.5	Structure du projet . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Récupération de l'environnement</b>	<b>7</b>
2.1	Dispositif et capteurs . . . . .	8
2.2	Communication inter plate-forme . . . . .	8
2.3	External pour la communication . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Traitement audio</b>	<b>10</b>
3.1	Aquisition audio . . . . .	10
3.2	Traitement du son bas niveau . . . . .	10
3.2.1	Filtrage . . . . .	10
3.2.2	Détecteur de notes . . . . .	11
3.2.3	Bandes de fréquences . . . . .	11
3.3	Traitement du son haut niveau - Extraction des méta-données . . .	12
3.3.1	Mélodie et rythme . . . . .	12
3.3.2	Détection de Motif minimal . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Synthèse musical</b>	<b>14</b>
4.1	Modele physique au longterme . . . . .	14
4.2	Synthèse implémenté . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Interface Utilisateur</b>	<b>15</b>
5.1	Premiere idée d'implementation . . . . .	15
5.2	Envoie des données capteur . . . . .	15
5.3	Envoie d'objet Pure data . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Tutoriel et Documentation</b>	<b>16</b>
6.1	Écriture documentation Pure data . . . . .	16
6.2	Écriture du Tutoriel d'installation . . . . .	16

<b>7</b>	<b>Pour aller plus loin</b>	<b>17</b>
7.1	Tests en environnement reel . . . . .	17
7.2	Tests énergétiques . . . . .	17
7.3	Serveur distant . . . . .	17
<b>8</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>Annexe</b>	<b>18</b>
9.1	Rappel musical . . . . .	18

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte Global

**Maîtrise d'œuvre :** Hugues GENEVOIS

**Maîtrise d'ouvrage :** Pierre MAHÉ

Le projet DASS, Dispositif Autonome de Synthèse Sonore, est une collaboration de Michel RISSE, compositeur de "Décor Sonore" ayant à son actif de nombreuses créations et dispositif sonores, et de Hugues GENEVOIS, chercheur au LAM de L'Institut Jean le Rond d'Alembert.

Le projet consiste à mettre en place un dispositif générant du son en prenant en compte son environnement dans le but de souligner les sons présents dans cet environnement. Le dispositif recueille les informations à l'aide de capteurs divers permettant de récupérer les bruits ambiants, la luminosité, la température.

Dans un premier temps devrait être la base pour une installation artistique, se déroulant en juillet prochain, dans le cadre d'un festival de musique à Noirlac. Dans un second temps Hugues GENEVOIS et Michel RISSE voudraient réaliser une installation plus importante avec de nombreux dispositifs avec pour chacun d'eux des comportements et des caractéristiques propres, pour voir l'interaction qu'ils pourraient avoir ensemble et les comportements qui en émergeraient.

## 1.2 Présentation de la demande

Dans le cadre de mon projet PSAR, mon but était de créer un premier prototype du projet pour s'en servir comme base par la suite.

J'avais donc pour mission de créer un dispositif portable interagissant avec son environnement. Ce dispositif doit capter l'environnement à l'aide de capteurs. Le but du projet est de créer un dispositif portable interagissant avec son environnement. Ce dispositif doit capter l'environnement à l'aide de capteurs : micro, luminosité, température, et humidité. Il devra traiter ces données pour en extraire des informations pertinentes sur les changements se produisant autour de lui (chants d'oiseaux, passage d'une personne au alentours...). Grâce à ces informations, il devra synthétiser du son.

La synthèse devra être paramétrable, pour permettre au compositeur de modifier l'influence des différents capteurs sur la synthèse sonore.

De plus une interface utilisateur devra être présente permettant au compositeur de simuler des données captées. Cela lui permettra de faire des expérimentations de sa composition.

Dans l'optique de la reproduction de ce dispositif pour des installations plus important. Une procédure devra permettre à un utilisateur de pouvoir reproduire l'ensemble du système, aussi bien niveau matériel que logiciel.

Le dispositif devant être portable, le programme doit fonctionner sur une nano-ordinateur de type `Udoo Quad`. De plus le langage du programme principal doit être le `PureData`, pour assurer une maintenabilité et une extensibilité plus facile.

### 1.3 La Carte Udoo

La carte Udoo est un nano ordinateur embarquant un processeur ARM et la connectique d'un ordinateur classique. Avec une entrée et sortie micro. La qualité étant suffisante pour notre projet.

La caractéristique de cette carte est d'être compatible arduino et d'offrir les mêmes connectique qu'une Arduino Mega ce qui permet de simplifier la réception des capteurs ainsi que le d'utiliser les bibliothèques déjà implémenter par la vaste communauté Arduino.

La carte utilise une carte micro sd pour stocker ses données, ce qui est également un avantage pour le projet car cela permet de dupliquer la partie software du dispositif avec une simple copie de carte mémoire.

Le système d'exploitation installé est une version simplifiée d'Ubuntu, permettant d'utiliser l'environnement linux.

### 1.4 Pure Data

#### 1.4.1 Présentation generale

Pure Data est un logiciel, open source, de programmation graphique pour la création musicale et multimedia en temps réel. Il permet également de gérer des signaux entrants dans l'ordinateur (signaux de capteurs ou événements réseau par exemple) et de gérer des signaux sortants (par des protocoles de réseau ou protocoles électroniques pour le pilotage de matériels divers).

Pure Data est un système module où il est possible de définir des sous-modules qu'il est possible de ré-utiliser à sa guise dans d'autre programme appelé `patch`. En Pure Data tous les objets (modules ou données) sont des **boîtes**. Ce langage est un langage très faiblement typé. Il existe quatre types de données de base :

- **Les Nombres**, qui peuvent représenter des nombres entiers comme à virgules
- **Les Messages**, qui sont des messages purement textuels

- **Les Symboles**, qui corresponde aux messages mixtes, caractère, chiffre...
- **Les Tableaux**, qui sont uniquement des tableaux de nombres.

Il existe d'autre type de donnée comme les listes qui même avec une représentation interne différente ou message ou symboles sont graphiquement identique a un message (avec comme premier mot `list`). De plus pour changer une liste en message, il suffit de supprimer ce mot clé.

Le Pure Data étant un logiciel orienter interaction, il est possible a tous moment de modifier son patch en ajoutant des boites au cours de l'exécution du programme, il n'est pas nessesaire de relancer le programme. Cela peut permet de modifier le patch en direct sans avoir l'interruption dans le flux audio sortant.

Pure Data a aussi l'avant d'être facilement documentable car il est possible d'associer à une boite quelconque, une boite d'aide avec une explication et des exemples.

Cela s'avère très utile pour la compréhension de certaines boites complexes et permet de bien dissocier code et documentation.

Un autre atout de Pd est le nombre de d'outils déjà implémenté dans le logiciel et les boites créées par la communauté. Certaine procèdent a des traitements complexes, comme la détection en temps réel de fréquence ou le filtrage performant.

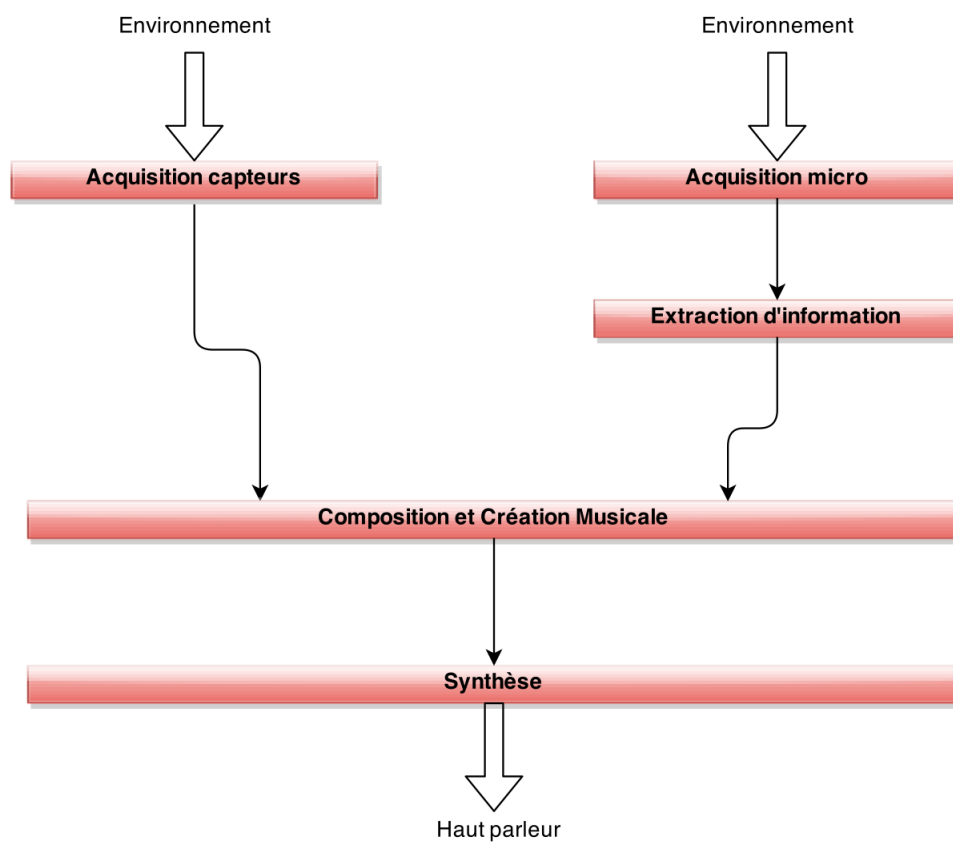
### 1.4.2 Externals

En Pure Data, le stockage de donnée est assez complexe c'est pour cela que pour procéder a des algorithmes complexes, il est possible d'avoir recours à des **Externals**. Les externals sont des boites programmées en `C++`.

Il existe plusieurs API, dans ce projet nous avons choisi d'utiliser **FlexT** pour sa simplicité d'utilisation. De plus cette API est développée par Thomas GRILL, un des principaux contributeurs de Pure Data ce qui garantit une plus grande parfaite compatibilité avec Pd et une certaine assurance que l'outil reste longtemps maintenu. La communauté des développeurs Pure Data étant limitée (une dizaine de personnes à travers le monde), cela a une importance car malheureusement beaucoup d'outils ne sont pas maintenus suffisamment ou sont souvent obsolètes.

## 1.5 Structure du projet

Nous avons décidé de diviser le programme en cinq modules pour la cote synthèse.



La partie acquisition des données des capteurs ce fera par le bien de la communication entre la partie Arduino et Pure Data.

Nous avons écrit un programme arduino qui va envoyé périodiquement les valeurs des différent capteurs au programme Pd.

Information collecté par la partie arduino :

- Luminosité
- Temperature
- Humidité

Une seconde partie acquisition est la réception du signal sonore, que l'on doit traiter pour pouvoir en extraire des informations pertinente.

Le son capté par le micro est pollué par des sons ambiant, typiquement le bruit d'une route proche ou d'une machine bruyante. Ces bruits sont généralement continu, grave (moins de 100 hertz) donc très énergétique. Ils peuvent donc fausser les résultats des traitement en aval.

Les bruits naturel à cette fréquence sont tres rare dans la nature. De plus musicalement ces bruits sont asses pauvres.

Pour toute ces raisons il est préférable de les filtrer. Pour les même raisons, nous avons ajouter un filtrer pour eliminer les fréquences au dessus de 6000 Hertz.

Dans la partie extraction, avec le compositeur et le chercheur nous nous sommes questionner sur les informations pertinente a extraire pour la composition musicale. En prenant en compte le fait que la carte a un capacité de calcul limité, cela ne permet pas d'avoir de faire tous les traitements complexes.

La composition musicale est plus la partie propre au compositeur, et correspond a la partie creation artistique. Plus qu'une fabrication de ce module, la question a etait comment pouvoir permaitre au compositeur de la creer et de pouvoir la modifier sur le dispositif a distance sans ecran ni clavier.

Il y plusieurs techniques de synthèse musicale certaine sont plus complexe et gourmand en ressources.

Nous avons choisis un synthèse très simples car la synthèse est tres lié a la partie création musicale.

## 2 Récupération de l'environnement

L'un des avantages de la carte Udoo est d'etre compatible Arduino est de proposer les même connectique qu'une Arduino Mega. Cela permet d'utiliser le même langage,



d'utiliser les bibliotheques deja écrites ainsi que les mêmes capteurs. De plus la partie micro controleur etant connecté directement a la partie nano ordinateur via un bus special, la vite de comunication est plus rapide et avec une plus courte latence par rapport a une connexion usb classique.

Dans les valeurs envoyés par un capteur deux choses sont interessante, la premiere la valeur et la variation de celci (si elle augmente ou si elle diminue).

## 2.1 Dispositif et capteurs

Dans le cadre du projet, seul trois capteurs étaient prevu mais le programme devrait permettre un ajout de capteurs aisé.

Les capteurs utilisés sont des capteurs les plus basique : un capteur de luminosité, de temperature et d'humidité.

Pour capteur la luminosité, nous avons utilisé une photo-resistance, son fonctionnement est asses simple, plus la luminosité va etre forte plus la resistance interne de composant va etre faible. Il suffit de recupere la tension au borne de composant pour connaitre l'indice de luminosité.

Malheureusement cette indice ne permet pas de connaitre l'intancité lumineuse en Candela ou en Lux mais permet d'avoir une echelle d'avoir des valeur relavite. Ce qui est suffisant dans le cadre de ce projet.

Pour la Temperature et l'humidité le fonctionnement est tres similaire. Contrairement a la luminosité grace a une formule (dépendent de chaque capteur) il sera possible d'avoir la température ou l'hygrométrie précise.

## 2.2 Communication inter plate-forme

Pour la partie micro-controleur l'envoi de donnnées est asses intruitive car il suffit d'ecrire sur le port Série (Serial port), avec des primite d'ecriture basique.

Pour la partie ordinateur avec le logiciel Pure Data, il faut utiliser une boite pour se connecter a un périphérique puis on peut lire et ecrire sur celui.

La connexion entre l'arduino et Pure data devant etre unique, il a fallu trouver un moyen de pouvoir differensier les données des différent capteur.

Pour communiquer entre les deux parties, j'ai donc define un micro-protocole qui étiquette les données envoyés.

Tous les X secondes le programme arduino li les valeurs des capteurs et envoi un message de la forme :

```
1 NOM_CAPTEURvl: VALEUR;    //vl pour la valeur
2 MON_CAPTEURvr: VALEUR;    //vr pour la variation
```

Pour ajouter un capteur, il suffit d'écrire sur le port série avec un nom de capteur pas encore utilisé et c'est dans la partie Pure data que nous traiterons la nouvelle étiquette.

Puis pour il nous ai venu l'idée de permettre à Pure data de pouvoir changer le délai entre chaque envoi de valeur. Pour cela il a fallu permettre à l'arduino de pouvoir recevoir des données avec des messages ayant la même forme que l'envoi de donnée avec l'étiquette `delay`.

C'est à ce moment là que nous avons découvert un vice de Pure Data, étant un langage très faiblement typé. Les données reçues de l'arduino sont des octets que Pure Data caste en type Nombre et il n'existe pas d'objet permettant à partir de ce flux d'octets de récupérer des entiers (valeur des capteurs envoyé par la parité Arduino).

Au premier abord nous avons voulu utiliser l'objet `PackOSC` qui permet à la base de convertir un message quelconque en commande OSC (`Open Sound Control`). Ce protocole étant un protocole avec un codage ascii nous pouvions l'utiliser pour encoder et decoder les communications avec l'arduino.

Mais cela aurait été une manipulation de l'objet de base de plus cela pourrait porter à confusion car nous ne gérons en rien le protocole.

Nous avons discuté avec Hugues GENEVOIS et nous avons utilisé de programmer nos propres externals.

## 2.3 External pour la communication

En s'inspirant du fonctionnement des objets `PackOSC` et `UnPackOSC`, nous avons programmé deux externals, un qui reçoit un message et qui le transforme en tableau d'octets (en code ascii plus particulièrement) en ajoutant le code ascii d'un point virgule à la fin.

Le second reçoit un flux d'octets et le stocke dans un tableau jusqu'à recevoir un point virgule, à ce moment là il envoie toute la chaîne reçue.

Le fait d'utiliser le caractère ';' n'est pas un problème car en PureData ce caractère est généralement le délimiteur de fin de chaîne, la fin de liste et de tableau ainsi qu'interne pour fin des messages tcp ainsi que la fin d'une lecture de fichier.

## 3 Traitement audio

### 3.1 Aquisition audio

Comme nous l'avons dit dans l'introduction du projet, Nous avons filtré le signal audio capté par le micro pour supprimer les bases frequency et les haut fréquence. Nous avons chercher a savoir determiner les frequences de coupure a partir du quelle il n'y as plus d'information pertinente. Nous nous somme rendu compte qu'au dessus de 6000 Hertz il n'y avait plus de son avec une fondamentale a cette haute, et qu'il n'y avait que des harmonique de son plus grave. (Voir l'annexe rappel musical pour les explications sur les fondamentales et les harmoniques). Pour les sons tres graves, il n'existe pa de sons produits par la nature à des fréquence inférieur à 100 Hertz. Nous avons donc ajouter un filtre a notre acquisition pour pouvoir supprimer les bruits qui pour nous sont des bruits parasites.

### 3.2 Traitement du son bas niveau

#### 3.2.1 Filtrage

Une inforation qui nous paraissé esentiel a extraire etait les notes et les melodies qui sont jouer dans l'environement.

Il est asses facile de determiner la frequency principal d'un signal, il suffit de prendre la forme generale du signal. Il existe plusieurs boites en Pd pour le faire tel que **Fiddle** ou **Signum**.

Pour detecter les notes jouer simultanement ou suivre plusieurs de melodies simultanement est tres quasiment impossible et fait encore partie l'objet de recherche. L'une des meilleurs compromis entre le temps de calcul et la fiabilité de la sortie est de faire En Pd il existe des boites pour déterminer la frequency pour cela nous avons pensé a utiliser la transformé de fourrier (voir Annexe) pour déterminer l'ensemble des notes jouer.

Nous avons implémenter un programme en C pour pour faire une transformée Fourier rapide (FFT), dans l'optique d'en faire une boite pour l'utiliser dans Pure Data mais nous nous sommes rendu compte que ce proceder etait beaucoup trop gourmand pour la carte. Meme si la complexité de la FFT est en  $N\log(N)$ , avec  $N$  le taux d'echantillonnage du signal (nombre de point du signal). Notre signal est echantilloné a 44k Hertz il y a donc 44100 points a traiter par seconde ce qui est trop lourd pour la carte (si nous voulons pouvoir faire d'autres traitements en parallèle).

Apres ces tests insatisfesant, nous nous sommes donc orienter dans une autre direction, le chercheur nous a conseiller de partager le spectre sonore en plusieurs

bandes de fréquences a l'aide de filtre passe-band et de suivre de deteter la fréquence la plus principal de chaque bande, avec un `fiddle`.

Après avoir implémenté en pure data ce mecanisme un nouveau probleme est apparu. Les filtres ne coupant pas parfaitement les frequences en dehors de sa bande, les objet `fiddle` detecter parfois des frequences n'appartennent pas a leurs bande de fréquence. Il y avait donc plusieurs filtre qui detecter donc la même fréquence ce qui etait asses problematique.

Pour resoudre ce second probleme nous avons utilisé des `noiseGate`.

Une `noiseGate` est un element souvant utliser en musique, il correspond simplement a un boite qui ne laisse passer que les signals sonore d'une certaine intensité, si le signal est trop faible le signal en sortie de la boite est egale a 0. Cela permet de supprimer les sons venant des autres bandes de frequences, etant atenuer par les filtres, ces sons ne passe pas la `NoiseGates`, ce qui resolvé le problemee de la detection de fréquence erroné.

### 3.2.2 Détecteur de notes

Ce dispositif était bien mieux que les précédent mais ne permettait pas de suivre les melodies qui etait etaler sur plusieurs bandes de fréquences. Ce qui se traduisé par la detection de morceau de melodie souvant haché.

Nous avons donc decider d'abandonner l'idée de suivre plusieurs melodie simultanement et de ne garde que la melodie principal du signal.

Et de ne n'utilsier les notes récupérer par les filtres uniquement pour savoir quelle note sont jouer pendant un labse de temps.

Ce choix choix peut semblé un peu etonnant mais il est tres important pour le dispositif de savoir quel note son jouer, si la melodie qu'il capte utiliser uniquement deux notes, il serait tres disonnant que le disposirif en joue une troisieme note qui n'a rien a voir avec les deux premieres.

Donc implementé un compteur de notes qui collecte les notes reconnues a la sortie des filtres. A intervalle régulier le compteur va nous donner la fréquence des notes joué. Pour ne pas faire trop de dissonnance il suffira au module de synthese de jouer des note tiré au hasard dans la liste de note en tenant compte de la fréquence d'apparition d'une note.

### 3.2.3 Bandes de fréquences

Avec ce systeme de detection de note, ils est possible de savoir la fréquence d'appartion des notes mais il n'est pas possible de savoir la hauteur des sons capté. Nous avons donc ajouter un module pour mesurer l'amplitude du signal sur chaque

bande de fréquence pour savoir où sont reparti les notes sur les bandes de fréquences, si les bruits capté par le micro sont plutôt aigus ou graves.

### **3.3 Traitement du son haut niveau - Extraction des méta-données**

#### **3.3.1 Mélodie et rythme**

Comme expliqué dans la section précédente, nous avons implémenté un module pour détecter la mélodie principale du signal.

Nous avons donc voulu implémenter un module homologue à la détection de note, mais pour déterminer le rythme capté. Pour synthétiser du son avec des rythmes proches de l'environnement.

Concrètement si une personne marche près du dispositif il peut répondre en jouant des sons sur le même rythme ou dans le cas où il capte un chant d'oiseau, il peut répondre en jouant des notes semblables avec le même rythme.

Pour permettre au dispositif de jouer la même structure rythmique mais à une vitesse différente. Nous avons décidé de normaliser notre notation de rythme. Le premier intervalle entre deux notes sera la référence pour toute la séquence, elle aura une valeur "1", tous les autres intervalles seront des multiples de cette valeur. Avec ce système il est possible de mesurer des divisions de cette valeur jusqu'à la quadruple croche (1/16) ce qui nous paraît être une précision suffisante. Nous avons ajouté une certaine tolérance au calcul de valeur pour permettre une certaine approximation dans les rythmes. Il est quasiment impossible de jouer rigoureusement plusieurs notes parfaitement égales.

#### **3.3.2 Détection de Motif minimal**

Nous avons beaucoup discuté de la détection mélodique et rythmique avec Hugues GENEVOIS, et nous en avons tiré la conclusion qui sera intéressante d'extraire des séquences rythmiques les motifs mélodiques et rythmiques qui reviennent dans la séquence.

Cette opération s'avérant très complexe en Pure Data à cause du fait qu'il est compliqué de stocker des données. Nous avons donc décidé de faire deux externals, un pour les motifs mélodiques et un pour le motif rythmique.

Nous allons vous décrire le fonctionnement détaillé de l'external de détection de motif rythmique, il suffit de savoir que l'external pour la détection de motif mélodique fonctionne de manière analogue.

On donne en paramètre à l'external le nombre minimal du motif. Et nous lui envoyons la séquence rythmique à la volée, dès que le module de détection rythmique

détecte un nouveau intervalle il est directement envoyer au module de detection de motif rythmique.

Il stock les valeurs et a chaque reception de nouvelle valeur va tester si il n'a pas déjà rencontré un motif contenant ce rythme. Dès qu'un motif sera détecté l'external va envoyer ce motif rythmique pour qu'il soit utilisé pour la synthèse.

Ce module ne permet pas de faire reconnaître la plus longue des motifs rythmiques présents dans la séquence mais pour pouvoir interagir rapidement avec son environnement, il est préférable d'avoir un motif court, le plus vite possible plutôt qu'un motif plus grand mais qu'il faille que la séquence soit terminée et donc que l'interaction avec le dispositif soit moindre. Le dispositif n'ayant la plus longue séquence uniquement une fois que l'émetteur a fini de jouer.

peut être pas le plus intéressant de ne pas avoir l'information la plus pertinente mais

## 4 Synthèse musical

### 4.1 Modèle physique au longterme

### 4.2 Synthèse implémenté

## **5 Interface Utilisateur**

### **5.1 Premiere idée d'implementation**

### **5.2 Envoie des données capteur**

### **5.3 Envoie d'objet Pure data**



## **6    Tutoriel et Documentation**

### **6.1   Écriture documentation Pure data**

### **6.2   Écriture du Tutoriel d'installation**

## 7 Pour aller plus loin

### 7.1 Tests en environnement reel

### 7.2 Tests énergétiques

### 7.3 Serveur distant

## 8 Bibliographie

### Références

- [1] Andéa-Novel Brigitte, Fabre Benoit, and Jouvelot Pierre. *Acoustique-Informatique-Musique*. Presses des Mines, 2012.
- [2] Leipp Émile. *Acoustique et Musique*. Presses des Mines, 2010.
- [3] Thomas Grill. Pure data patch repository, 2008(accessed mars, 2015).
- [4] Hans. pd, 2006 (accessed avril, 2015).
- [5] Adam Hyde. Pure data, (accessed mars, 2015).
- [6] Laurent Millot. *Traitement du signal audiovisuel, Applications avec Pure Data*. Dunod, 2008.

## **9   Annexe**

### **9.1   Rappel musical**