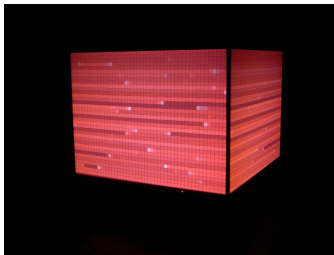


L'utilisation de Faust dans Sonik Cube

Yann Orlarey

Grame, Centre National de Creation Musicale, France

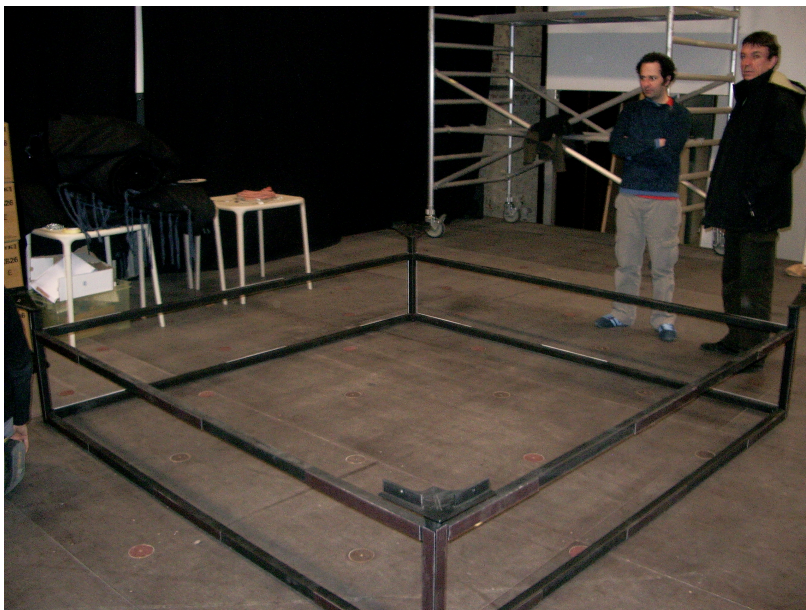
Mars 2010



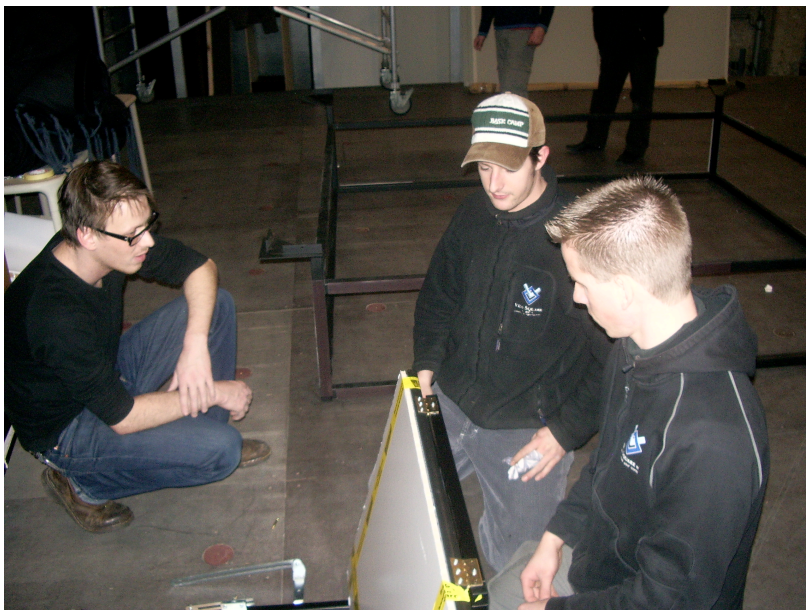
Installation visuelle et sonore mettant en oeuvre un cube lumineux réagissant aux sons, placé dans un espace sonore basé sur la résonance et le recyclage des sons produits par les spectateurs.

- Conception et dispositif visuel : Trafik
- conception musicale : Yann Orlarey;
- réalisation : Trafik et Grame;
- coproduction :
 - ▶ CAC La Ferme du Buisson,
 - ▶ GRAME, Centre National de création musicale de Lyon,
 - ▶ Ecole Nationale des Beaux-Arts de Lyon,
 - ▶ Scène Nationale de Marne-La-Vallée,
 - ▶ l'asbl Gang des Lunettes
 - ▶ le Pass (Belgique)

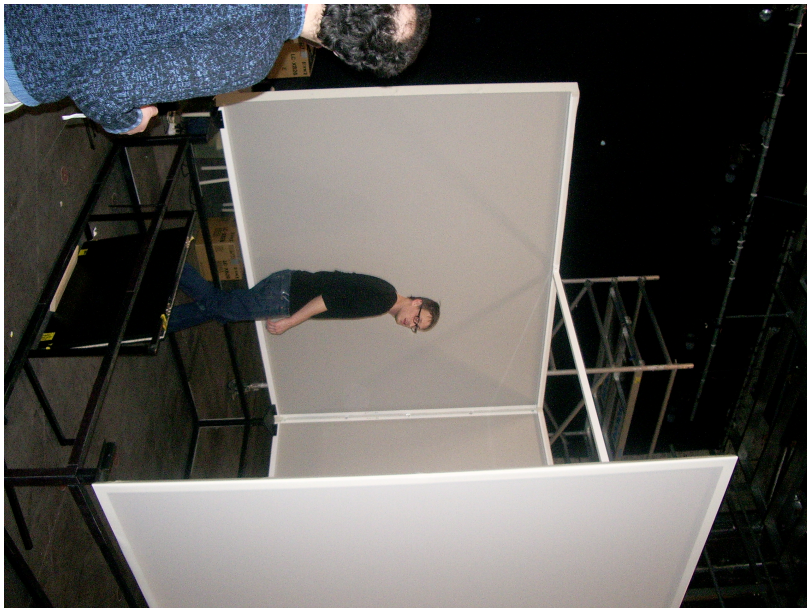
Sonik Cube (Trafik/Orlarey 2006)



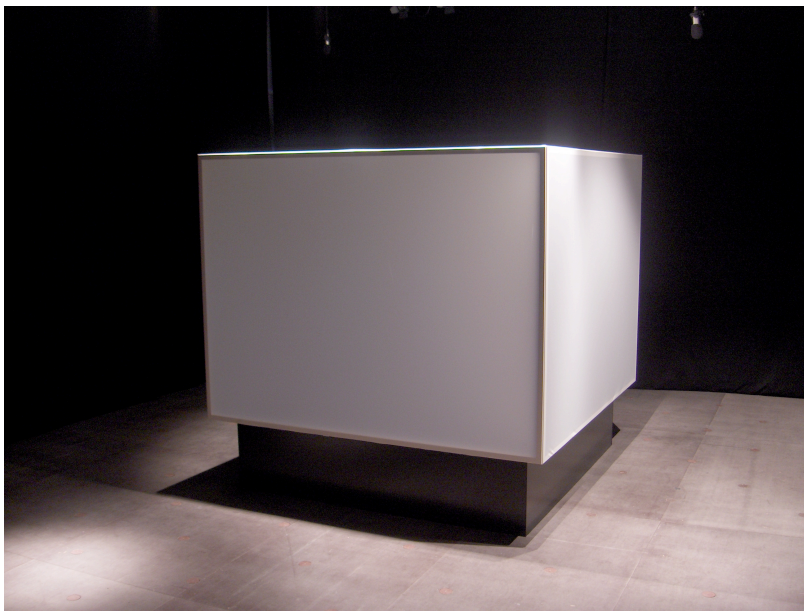
Sonik Cube (Trafik/Orlarey 2006)



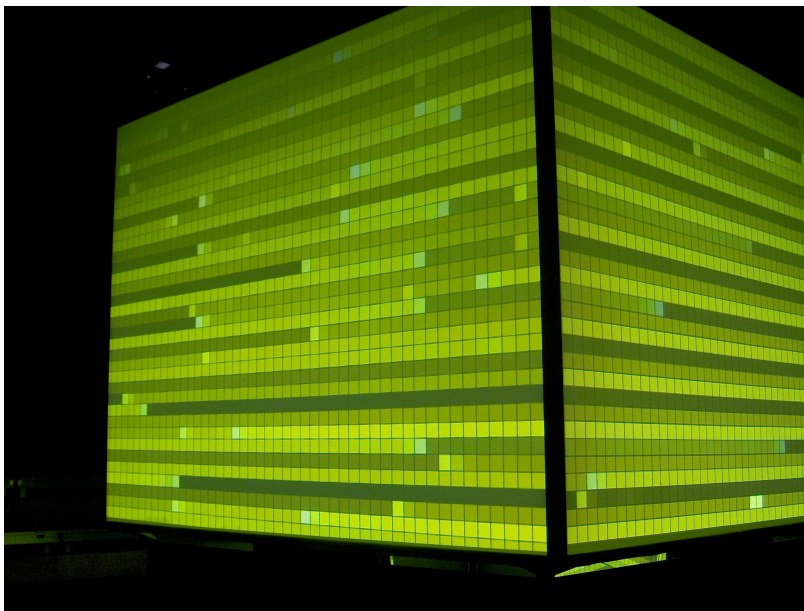
Sonik Cube (Trafik/Orlarey 2006)



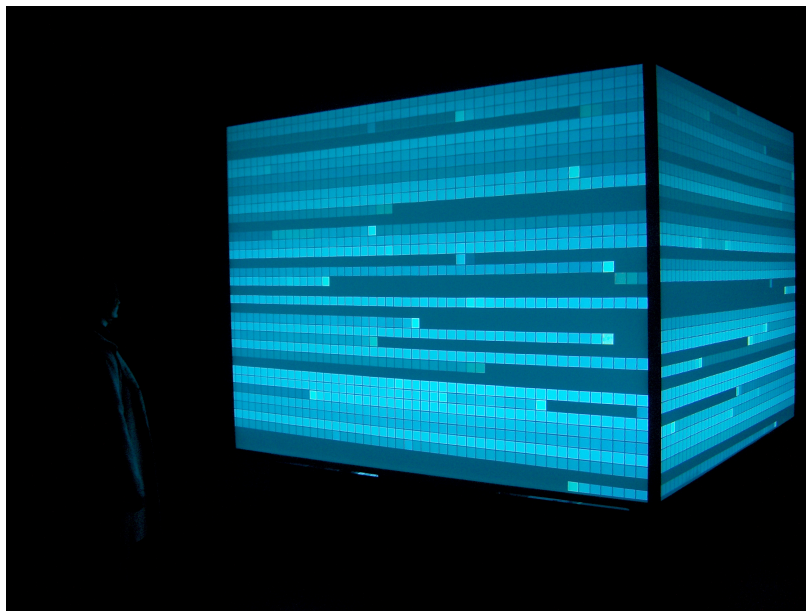
Sonik Cube (Trafik/Orlarey 2006)



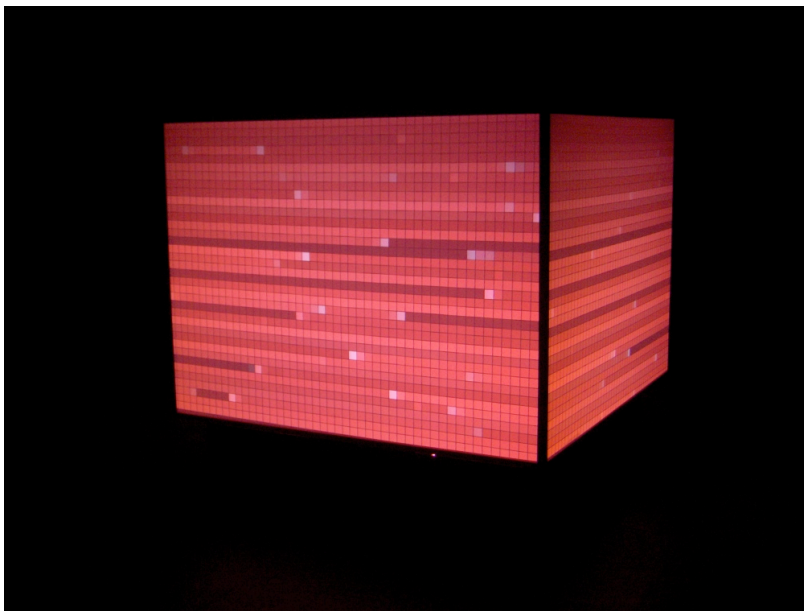
Sonik Cube (Trafik/Orlarey 2006)



Sonik Cube (Trafik/Orlarey 2006)

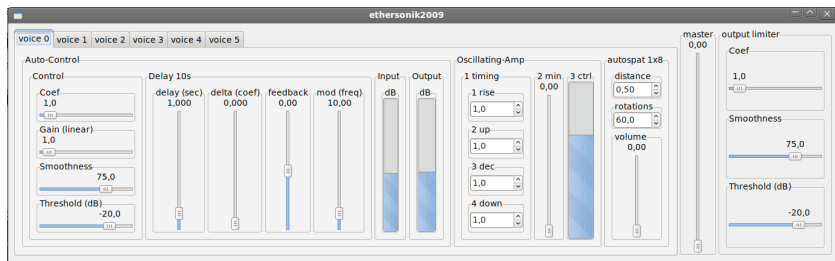


Sonik Cube (Trafik/Orlarey 2006)



Dispositif sonore :

- 8 enceintes formant un cube
- 6 micros
- logiciel, écrit en Faust, contrôlant la réinjection et la spatialisation des sons



Main characteristics

- Faust Stands for *Functional AUdio STream*
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Main characteristics

- Faust Stands for *F*unctional *A*udio *S*tream
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Main characteristics

- Faust Stands for *Functional AUdio STream*
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Main characteristics

- Faust Stands for *Functional AUdio STream*
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Main characteristics

- Faust Stands for *Functional AUdio STream*
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Main characteristics

- Faust Stands for *Functional AUdio STream*
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Main characteristics

- Faust Stands for *Functional AUdio STream*
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Main characteristics

- Faust Stands for *Functional AUdio STream*
- A Faust program describes a *signal processor*
- It's a compiled language
- It works at sample level
- Constant memory footprint
- Constant CPU footprint

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Faust can be used to write :

- standalone audio applications (Jack, Alsa, CoreAudio)
- VST plugging
- Max/MSP externals
- PD externals
- CSound opcodes
- Supercollider UGens

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Design Principles

- *Specification Language* : The user gives the DSP specification, the compiler generate the most appropriate implementation
- *Block-Diagram syntax* : A textual block-diagram language based on function composition
- *Strong formal basis* : A language with a simple and well defined formal semantic
- *Functional approach* : A purely functional programming language for real-time signal processing
- *Efficient compiled code* : It should be an alternative to C. The generated C++ code should compete with hand-written code
- *Easy deployment* : Multiple native implementations from a single Faust program

Clear separation between Specification and Implementation

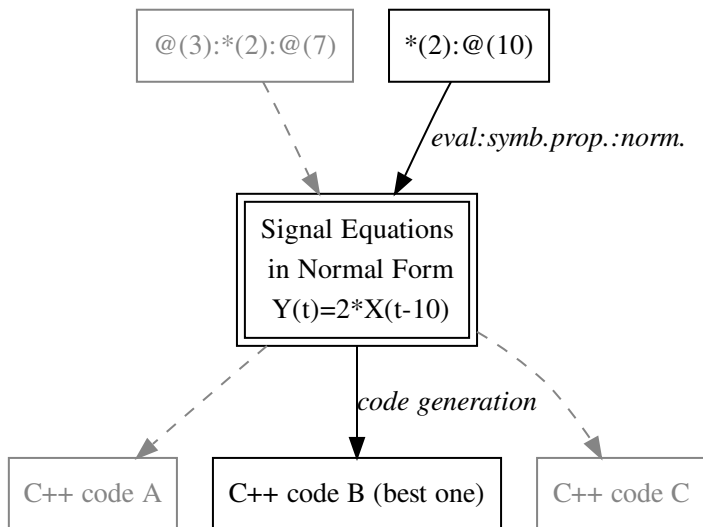
- The DSP specification (the math) is provided by the user.
- The choice of the best implementation (the C++ code) is the responsibility of the compiler.

Clear separation between Specification and Implementation

- The DSP specification (the math) is provided by the user.
- The choice of the best implementation (the C++ code) is the responsibility of the compiler.

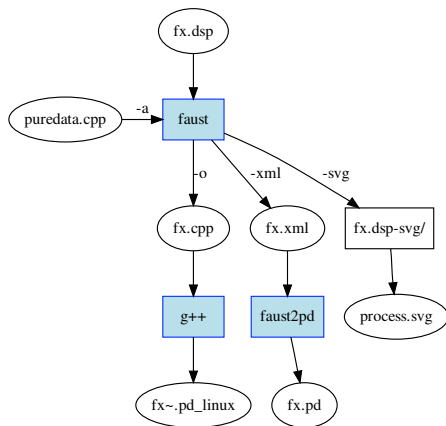
Clear separation between Specification and Implementation

- The DSP specification (the math) is provided by the user.
- The choice of the best implementation (the C++ code) is the responsibility of the compiler.



FAUST Workflow

The example of PD externals



Block-Diagram Concept

The concept of block-diagram, where you connect functions, is familiar to musicians :



Figure: the Moog modular synthesizer

Block-Diagram Concept

Block-diagrams were also used to program the first electronic computers :

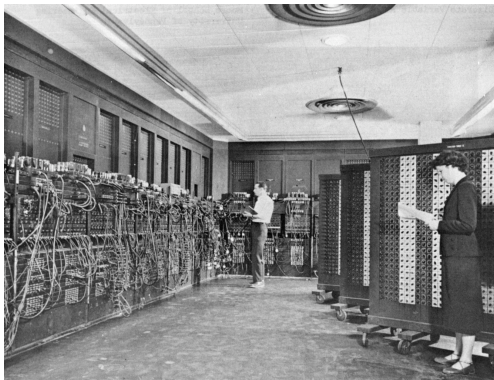


Figure: the ENIAC computer

Block-Diagram Concept

Block-diagrams are widely used in Visual Programming Languages like Max/MSP:

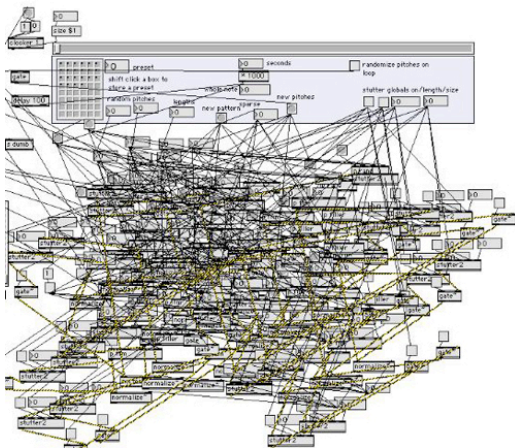


Figure: Block-diagrams can be a mess

Faust allows structured block-diagrams

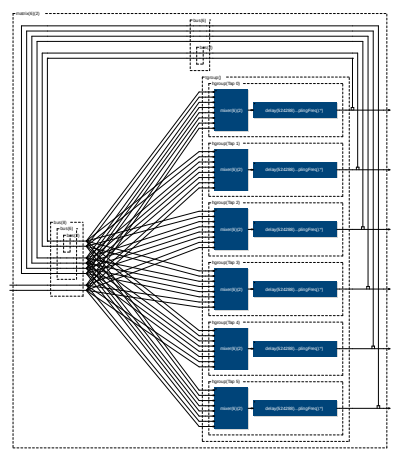


Figure: A complex but structured block-diagram

Block-Diagram Algebra

Faust syntax is based on a *block diagram algebra*

5 Composition Operators

- (A, B) parallel composition
- $(A : B)$ sequential composition
- $(A < : B)$ split composition
- $(A : > B)$ merge composition
- $(A \sim B)$ recursive composition

2 Constants

- $!$ cut
- $_$ wire

Block-Diagram Algebra

Parallel Composition

The *parallel composition* (A, B) is probably the simplest one. It places the two block-diagrams one on top of the other, without connections.

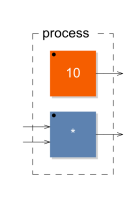


Figure: Example of parallel composition $(10, *)$

The *sequential composition* $(A : B)$ connects the outputs of A to the inputs of B . $A[0]$ is connected to $[0]B$, $A[1]$ is connected to $[1]B$, and so on.

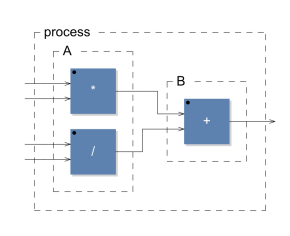


Figure: Example of sequential composition $((*, /) : +)$

Block-Diagram Algebra

Split Composition

The *split composition* ($A <: B$) operator is used to distribute the outputs of A to the inputs of B

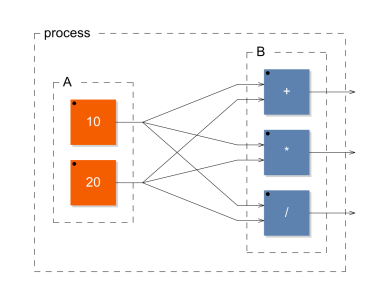


Figure: example of split composition $((10, 20) <: (+, *, /))$

Block-Diagram Algebra

Merge Composition

The *merge composition* ($A :> B$) is used to connect several outputs of A to the same inputs of B .

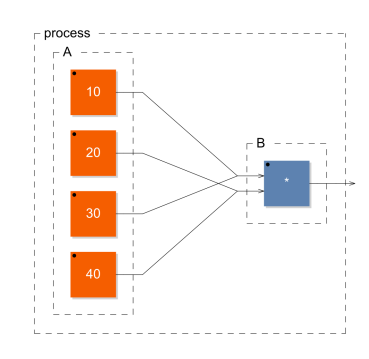


Figure: example of merge composition $((10, 20, 30, 40) :> *)$

Block-Diagram Algebra

Recursive Composition

The *recursive composition* ($A \sim B$) is used to create cycles in the block-diagram in order to express recursive computations.

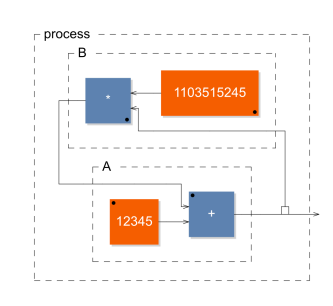


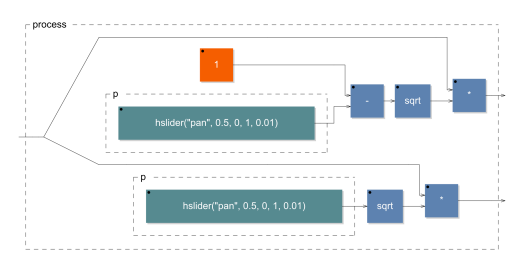
Figure: example of recursive composition $+(12345) \sim *(1103515245)$

Block-Diagram Algebra

Example 1

Stereo Pan

```
p = hslider("pan", 0.5, 0, 1, 0.01);\\  
process = _ <: *(sqrt(1 - p)), *(sqrt(p));
```

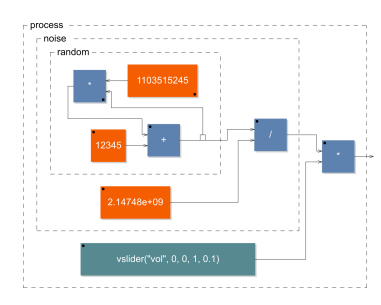


Block-Diagram Algebra

Example 2

Noise Generator

```
random = +(12345)~*(1103515245);  
noise = random/2147483647.0;  
process = noise * vslider("vol", 0, 0, 1, 0.1);
```

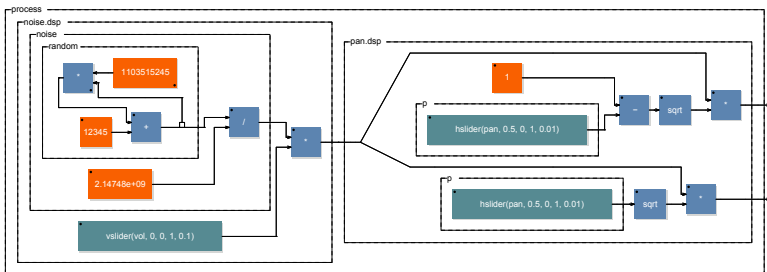


Block-Diagram Algebra

Example 3

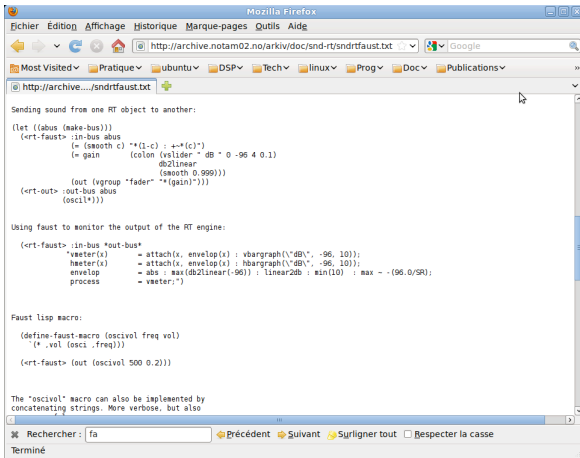
Stereo Noise

```
process=component ("noise.dsp") : component ("pan.dsp") ;
```



Availability

Softwares allowing to write Faust programs



The screenshot shows a Mozilla Firefox browser window with the address bar containing `http://archive.notam02.no/arkiv/doc/snd-rt/sndrtfaust.txt`. The page content includes:

```
Sending sound from one RT object to another:

(let ((abus (make-bus)))
  (<rt-faust> :in-bus abus
    (= (smooth c) ***(1-c) : +*(c)*)
    (= gain      (colon (vslider " dB " 0 -96 4 0.1)
                       db2linear
                       (smooth 0.999)))
    (out (vgroup "fader" ***(gain)**))
    (<rt-out> :out-bus abus
      (oscl**)))

Using faust to monitor the output of the RT engine:

(<rt-faust> :in-bus *out-bus*
  *vmeter(x)      = attach(x, envelop(x) : vbargraph("\dB", -96, 10));
  hmeter(x)       = attach(x, envelop(x) : hbargraph("\dB", -96, 10));
  envelop         = abs : max(db2linear(-96)) : linear2db : min(10) : max - (96.0/SR);
  process         = vmeter;*)

Faust lisp macro:

(define-faust-macro (oscivol freq vol)
  (* .vol (oscl .freq)))

(<rt-faust> (out (oscivol 500 0.2)))

The 'oscivol' macro can also be implemented by
concatenating strings. More verbose, but also
```

At the bottom of the browser window, there is a search bar with the text "fa" and navigation buttons: "Précédent", "Suivant", "Surligner tout", and "Respecter la casse". The status bar at the very bottom of the browser window says "Terminé".

Figure: FAUST programming with SND-RT

Availability

Softwares allowing to write Faust programs

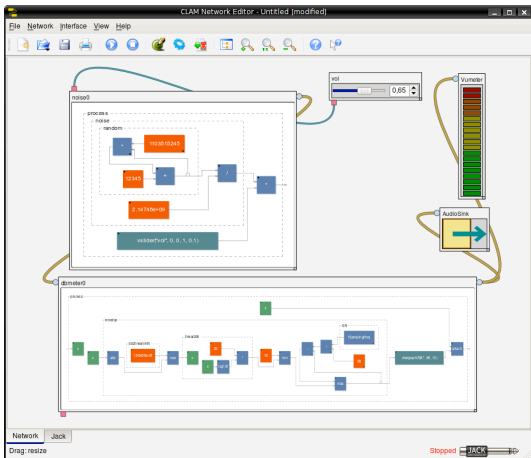


Figure: FAUST components inside CLAM, a software framework for research and application development in the Audio and Music Domain (MTG, U. of Barcelona)

Availability

Softwares allowing to write Faust programs

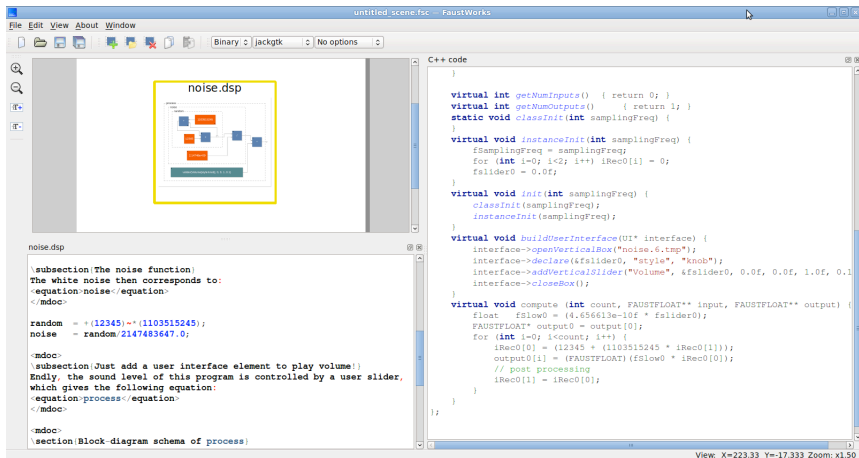


Figure: FaustWorks is an IDE to develop audio applications and plugins based on FAUST (GRAME)

Availability

Softwares based on Faust



Figure: Guitarix

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

Availability

Softwares accepting Faust components

- MaxMSP
- PureData
- CSOUND
- SuperCollider
- Chuck
- Adobe Flash
- Pure
- any VST Host
- any LADSPA Host

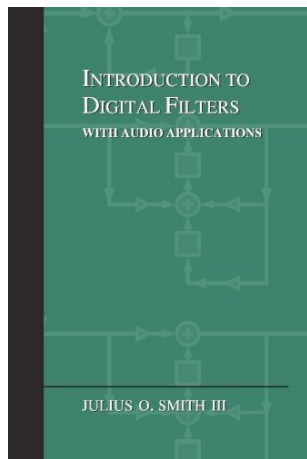


Figure: «*Introduction To Digital Filters with Audio Applications*», prof. Julius O. Smith III, W3K publishing

Availability

- online compiler (<http://faust.grame.fr>)
- sourceforge (<http://sourceforge.net/projects/faudiostream>)
- Linux distributions : Debian, Ubuntu, Fedora, OpenSuse, Planet CCRMA, . . .

The logo for ASTREE is a blue rounded rectangle containing the text "<:A,s:t,rée:>". The text is white with a slight shadow. The characters are: an opening angle bracket, a colon, the letter 'A', a comma, the letter 's', a colon, the letter 't', a comma, the word 'rée', a colon, and a closing angle bracket. The logo is centered on a white background with a grid of vertical lines. The first and last lines are black, while the others are gray.

<:A,s:t,rée:>

ASTREE :

- ASTREE = Analyse/Synthèse de processus Temps-Réel
- ANR-08-CORD-003

Partenaires :

- IRCAM
- GRAME
- CRI (Ecole des Mines de Paris)
- CIEREC (U. Jean-Monnet)

ASTREE :

- ASTREE = Analyse/Synthèse de processus Temps-Réel
- ANR-08-CORD-003

Partenaires :

- IRCAM
- GRAME
- CRI (Ecole des Mines de Paris)
- CIEREC (U. Jean-Monnet)

ASTREE :

- ASTREE = Analyse/Synthèse de processus Temps-Réel
- ANR-08-CORD-003

Partenaires :

- IRCAM
- GRAME
- CRI (Ecole des Mines de Paris)
- CIEREC (U. Jean-Monnet)

ASTREE :

- ASTREE = Analyse/Synthèse de processus Temps-Réel
- ANR-08-CORD-003

Partenaires :

- IRCAM
- GRAME
- CRI (Ecole des Mines de Paris)
- CIEREC (U. Jean-Monnet)

ASTREE :

- ASTREE = Analyse/Synthèse de processus Temps-Réel
- ANR-08-CORD-003

Partenaires :

- IRCAM
- GRAME
- CRI (Ecole des Mines de Paris)
- CIEREC (U. Jean-Monnet)

ASTREE :

- ASTREE = Analyse/Synthèse de processus Temps-Réel
- ANR-08-CORD-003

Partenaires :

- IRCAM
- GRAME
- CRI (Ecole des Mines de Paris)
- CIEREC (U. Jean-Monnet)

Motivation :

Préservation à long terme des processus numériques temps réel utilisés dans la création artistique contemporaine

Constat :

La préservation des programmes n'est pas suffisante:

- obsolescence rapide des langages
- des systèmes
- des matériels

Principe :

Il faut donc conserver la *signification mathématique* de ces programmes, indépendamment de tout langage de programmation

Motivation :

Préservation à long terme des processus numériques temps réel utilisés dans la création artistique contemporaine

Constat :

La préservation des programmes n'est pas suffisante:

- obsolescence rapide des langages
- des systèmes
- des matériels

Principe :

Il faut donc conserver la *signification mathématique* de ces programmes, indépendamment de tout langage de programmation

Motivation :

Préservation à long terme des processus numériques temps réel utilisés dans la création artistique contemporaine

Constat :

La préservation des programmes n'est pas suffisante:

- obsolescence rapide des langages
- des systèmes
- des matériels

Principe :

Il faut donc conserver la *signification mathématique* de ces programmes, indépendamment de tout langage de programmation

Motivation :

Préservation à long terme des processus numériques temps réel utilisés dans la création artistique contemporaine

Constat :

La préservation des programmes n'est pas suffisante:

- obsolescence rapide des langages
- des systèmes
- des matériels

Principe :

Il faut donc conserver la *signification mathématique* de ces programmes, indépendamment de tout langage de programmation

- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.

- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.

- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.

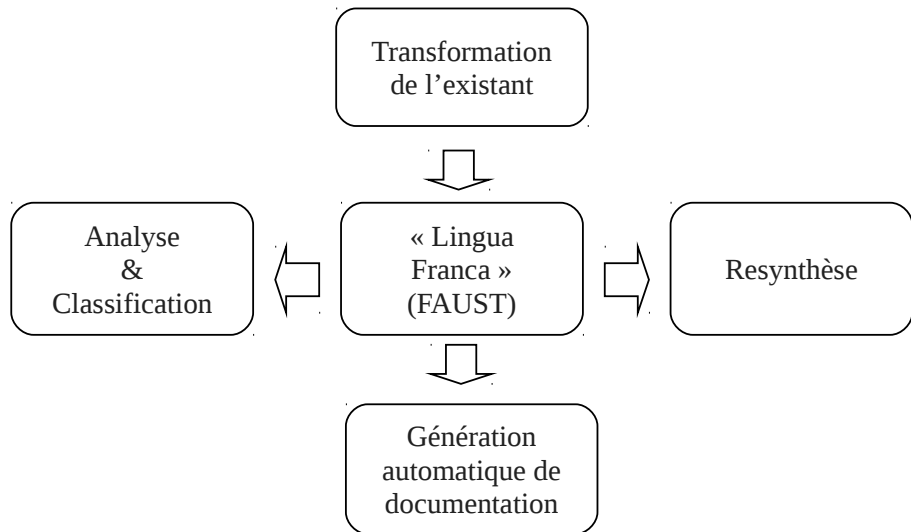
- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.

- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.

- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.

- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.

- Etudier les usages dans le domaine des outils de traitement audio temps réel
- Développer les outils permettant de traduire les traitements existants (principalement en Max/MSP et PD) en FAUST
- Développer des méthodes d'analyse et de classification de ces traitements
- Etudier et formaliser les propriétés du langage Faust
- Etendre FAUST aux signaux non-scalaires et multirate, générer du code vectoriel et parallèle
- Générer automatique d'une documentation suffisamment précise pour pouvoir servir de support à la réimplémentation
- Valider la documentation produite, les connaissances générées, et les programmes réimplémentés.



Préserver l'information n'est pas suffisant, il faut également préserver sa signification!

- La préservation des programmes utilisés dans les pièces est insuffisante à cause de l'obsolescence rapide des langages, des systèmes et des matériels.
- Il faut donc conserver également la *signification* de ces programmes, et ce indépendamment de tout langage de programmation.
- Le langage mathématique a la puissance expressive et la stabilité pour exprimer cette signification de manière précise et pérenne.

Préserver l'information n'est pas suffisant, il faut également préserver sa signification!

- La préservation des programmes utilisés dans les pièces est insuffisante à cause de l'obsolescence rapide des langages, des systèmes et des matériels.
- Il faut donc conserver également la *signification* de ces programmes, et ce indépendamment de tout langage de programmation.
- Le langage mathématique a la puissance expressive et la stabilité pour exprimer cette signification de manière précise et pérenne.

Préserver l'information n'est pas suffisant, il faut également préserver sa signification!

- La préservation des programmes utilisés dans les pièces est insuffisante à cause de l'obsolescence rapide des langages, des systèmes et des matériels.
- Il faut donc conserver également la *signification* de ces programmes, et ce indépendamment de tout langage de programmation.
- Le langage mathématique a la puissance expressive et la stabilité pour exprimer cette signification de manière précise et pérenne.

Préserver l'information n'est pas suffisant, il faut également préserver sa signification!

- La préservation des programmes utilisés dans les pièces est insuffisante à cause de l'obsolescence rapide des langages, des systèmes et des matériels.
- Il faut donc conserver également la *signification* de ces programmes, et ce indépendamment de tout langage de programmation.
- Le langage mathématique a la puissance expressive et la stabilité pour exprimer cette signification de manière précise et pérenne.

Le système de documentation automatique que nous avons développé permet :

- de générer une documentation de manière purement automatique, à partir d'un code Faust standard;
- de contrôler la génération de la documentation à partir d'un code Faust commenté avec des balises spéciales;
- de choisir la langue à utiliser (français, anglais, allemand et italien);
- il peut être invoqué soit par l'option `-mdoc` du compilateur Faust;
- le script `faust2mathdoc` crée une documentation complète qui peut être directement archivée.

Le système de documentation automatique que nous avons développé permet :

- de générer une documentation de manière purement automatique, à partir d'un code Faust standard;
- de contrôler la génération de la documentation à partir d'un code Faust commenté avec des balises spéciales;
- de choisir la langue à utiliser (français, anglais, allemand et italien);
- il peut être invoqué soit par l'option `-mdoc` du compilateur Faust;
- le script `faust2mathdoc` créé une documentation complète qui peut être directement archivée.

Le système de documentation automatique que nous avons développé permet :

- de générer une documentation de manière purement automatique, à partir d'un code Faust standard;
- de contrôler la génération de la documentation à partir d'un code Faust commenté avec des balises spéciales;
- de choisir la langue à utiliser (français, anglais, allemand et italien);
- il peut être invoqué soit par l'option `-mdoc` du compilateur Faust;
- le script `faust2mathdoc` créé une documentation complète qui peut être directement archivée.

Le système de documentation automatique que nous avons développé permet :

- de générer une documentation de manière purement automatique, à partir d'un code Faust standard;
- de contrôler la génération de la documentation à partir d'un code Faust commenté avec des balises spéciales;
- de choisir la langue à utiliser (français, anglais, allemand et italien);
- il peut être invoqué soit par l'option `-mdoc` du compilateur Faust;
- le script `faust2mathdoc` créé une documentation complète qui peut être directement archivée.

Le système de documentation automatique que nous avons développé permet :

- de générer une documentation de manière purement automatique, à partir d'un code Faust standard;
- de contrôler la génération de la documentation à partir d'un code Faust commenté avec des balises spéciales;
- de choisir la langue à utiliser (français, anglais, allemand et italien);
- il peut être invoqué soit par l'option `-mdoc` du compilateur Faust;
- le script `faust2mathdoc` créé une documentation complète qui peut être directement archivée.

Le système de documentation automatique que nous avons développé permet :

- de générer une documentation de manière purement automatique, à partir d'un code Faust standard;
- de contrôler la génération de la documentation à partir d'un code Faust commenté avec des balises spéciales;
- de choisir la langue à utiliser (français, anglais, allemand et italien);
- il peut être invoqué soit par l'option `-mdoc` du compilateur Faust;
- le script `faust2mathdoc` créé une documentation complète qui peut être directement archivée.

Le dossier d'archivage créé avec `faust2mathdoc` comprend :

- le dossier `src/` qui contient tous les fichiers sources Faust utilisés, y compris les bibliothèques;
- le dossier `svg/` qui contient tous les bloc-diagrammes graphiques au format SVG;
- le dossier `tex/` qui contient la version \LaTeX de la documentation;
- le dossier `pdf/` qui contient la version PDF de la documentation;
- le dossier `cpp/` qui contient la version en C++ du programme Faust.

Le dossier d'archivage créé avec `faust2mathdoc` comprend :

- le dossier `src/` qui contient tous les fichiers sources Faust utilisés, y compris les librairies;
- le dossier `svg/` qui contient tous les bloc-diagrammes graphiques au format SVG;
- le dossier `tex/` qui contient la version \LaTeX de la documentation;
- le dossier `pdf/` qui contient la version PDF de la documentation;
- le dossier `cpp/` qui contient la version en C++ du programme Faust.

Le dossier d'archivage créé avec `faust2mathdoc` comprend :

- le dossier `src/` qui contient tous les fichiers sources Faust utilisés, y compris les bibliothèques;
- le dossier `svg/` qui contient tous les bloc-diagrammes graphiques au format SVG;
- le dossier `tex/` qui contient la version \LaTeX de la documentation;
- le dossier `pdf/` qui contient la version PDF de la documentation;
- le dossier `cpp/` qui contient la version en C++ du programme Faust.

Le dossier d'archivage créé avec `faust2mathdoc` comprend :

- le dossier `src/` qui contient tous les fichiers sources Faust utilisés, y compris les bibliothèques;
- le dossier `svg/` qui contient tous les bloc-diagrammes graphiques au format SVG;
- le dossier `tex/` qui contient la version $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ de la documentation;
- le dossier `pdf/` qui contient la version PDF de la documentation;
- le dossier `cpp/` qui contient la version en C++ du programme Faust.

Le dossier d'archivage créé avec `faust2mathdoc` comprend :

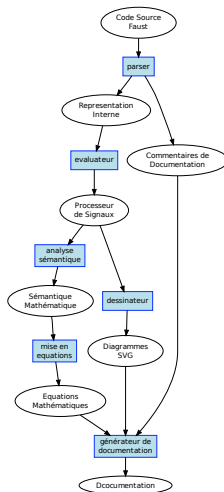
- le dossier `src/` qui contient tous les fichiers sources Faust utilisés, y compris les bibliothèques;
- le dossier `svg/` qui contient tous les bloc-diagrammes graphiques au format SVG;
- le dossier `tex/` qui contient la version $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ de la documentation;
- le dossier `pdf/` qui contient la version PDF de la documentation;
- le dossier `cpp/` qui contient la version en C++ du programme Faust.

Le dossier d'archivage créé avec `faust2mathdoc` comprend :

- le dossier `src/` qui contient tous les fichiers sources Faust utilisés, y compris les bibliothèques;
- le dossier `svg/` qui contient tous les bloc-diagrammes graphiques au format SVG;
- le dossier `tex/` qui contient la version $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ de la documentation;
- le dossier `pdf/` qui contient la version PDF de la documentation;
- le dossier `cpp/` qui contient la version en C++ du programme Faust.

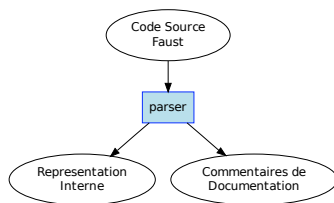
Préservation

Organisation des traitements



Le parser est étendu pour lire un nouveau type d'information de documentation. Il s'agit d'un texte délimité par des balises :

```
<mdoc>  
...documentation...  
</mdoc>
```



Les commentaires de documentation doivent pouvoir faire référence à des expressions Faust que le système de documentation va convertir :

- en tant qu'équations sur les signaux

```
<equation> expression-faust </equation>
```

- en tant que diagramme

```
<diagram> expression-faust </diagram>
```

Les commentaires de documentation doivent pouvoir également faire référence aux métadonnées déclarées dans le programme, par exemple :

- nom du programme : `<metadata> name </metadata>`
- nom de l'auteur : `<metadata> author </metadata>`
- copyright : `<metadata> copyright </metadata>`

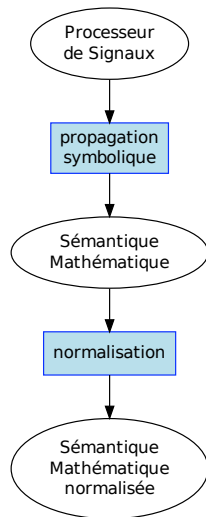
Enfin des balises permettent de contrôler :

- l'ajout d'une notice d'explication : `<notice/>`;
- l'ajout du listing du programme : `<listing [attr]/>`;
- le contenu du listing est contrôlé par trois attributs :
 - ▶ inclure ou non les dépendances
`dependencies = "true" | "false"`
 - ▶ laisser les tags de documentation dans le listing
`mdoctags = "true" | "false"`
 - ▶ répartir ou grouper le listing `distributed = "true" | "false"`

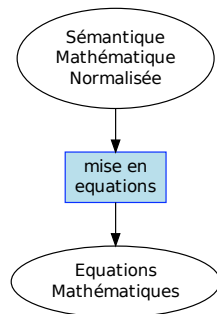
L'analyse sémantique a pour but de découvrir la signification d'un programme Faust.

Elle procède en deux étapes :

- 1 la propagation symbolique des signaux;
- 2 la normalisation des équations.

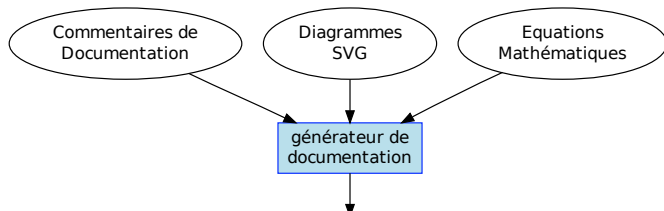


- Le but de la Mise en Équations est de découper les formules issues de l'Analyse Sémantique, pour les rendre lisibles.
- Sont candidates au découpage:
 - ▶ les expressions récursives;
 - ▶ les expressions communes à plusieurs autres;
 - ▶ les expressions retardées.



Le générateur de documentation est la dernière phase du processus:

- il se charge de construire un document à partir des commentaires de documentation;
- il prend en compte la langue;
- il remplace les balises `<equation>` et `<diagram>` par les équations et les diagrammes appropriés;
- il remplace la balise `<notice/>` par la notice explicative adaptée;
- il remplace la balise `<listing/>` par le listing, en fonction des attributs.



Exemple de Documentation Automatique

Source Faust

Pour illustrer le principe, voici un exemple de source Faust standard:

Fichier : /home/orlarey/Bureau/faust-me...e-doc3/examples/noisenodoc.dsp

Page 1 :

```
declare name      "Noise";
declare version  "1.2";
declare author   "Grame";
declare license  "BSD";
declare copyright "(c)GRAME 2009";

random = +(12345)~*(1103515245);
noise  = random/2147483647.0;
process = noise * vslider("Volume[style:knob]", 0, 0, 1, 0.1);
```


Exemple de Documentation Automatique

Documentation résultante (pages 1-2)

Noise
Grame
March 5, 2010

name	Noise
version	1.0
author	Grame
license	BSD
copyright	© 2010 Grame

This document provides a mathematical description of the Faust program text found in the subdirectory `src/`. See the notice in Section 3 (page 2) for details.

1 Mathematical definition of process

The automatic program evaluates the signal transformers described by process, which is mathematically defined as follows.

- Output signal y such that
$$y(t) = p_1(t) * x(t)$$
- Input signal (none)
- User-interface input signal x_{in} such that
"Values" $x_{in}(t) \in [0, 1]$ (default value = 0)
- Intermediate signals g_1 and v_1 such that
$$p_1(t) = 4.459612872458 \cdot 10^{-10} \cdot x_{in}(t)$$
$$v_1(t) = 12345 \oplus 114652345 \oplus v_1(t) - 1$$

2 Block diagram of process

The block diagram of process is shown on Figure 1 (page 2).

1

The block diagram, titled 'Figure 1: Block diagram of process', shows a signal flow starting from an input block 'x_in' (orange) which feeds into a 'mul' block (blue). The output of 'mul' goes to another 'mul' block (blue), which then feeds into a 'sig~' block (blue). The output of 'sig~' goes to a 'sig~' block (blue), which then feeds into a 'sig~' block (blue). The output of the final 'sig~' block goes to an 'out' block (orange). There are also feedback loops from the 'out' block back to the 'mul' and 'sig~' blocks. A 'sig~' block (blue) is also connected to the 'out' block. The entire diagram is enclosed in a dashed box labeled 'process'.

Figure 1: Block diagram of process

3 Notice

- This document was generated using Faust version 0.9.13 on March 05, 2010.
- The value of a Faust program is the result of applying the signal transformer described by the expression to which the process identifier is bound to input signals, running at the f_s sampling frequency.
- Faust (Functional Audio Stream) is a functional programming language designed for synchronous real-time signal processing and systems applications. A Faust program is a set of building of identifiers to represent that describe signal transformers. A signal x in S is a function mapping time $t \in \mathbb{Z}$ to values $x(t) \in R$, while a signal transformer is a function from S' to S'' , where $S, S' \in S$. See the Faust manual for additional information (<http://faust.grame.fr>).
- Every mathematical formula derived from a Faust expression is assessed.

2

Exemple de Documentation Automatique

Documentation résultante (pages 3-4)

In this document, having been normalized (in an implementation-dependent manner) by the Faust compiler.

- A block diagram is a graphical representation of the Faust binding of an identifier I to an expression E ; each graph is put in a box labeled by I . Subexpressions of E are recursively displayed as long as the whole picture fits in one page.

- This document uses the following integer operations:

operation	name	expression
0	<code>int2int_zero</code>	<code>integer addition</code>
$+$	<code>int2int_plus</code>	<code>integer multiplication</code>

Integer operations in Faust are inspired by the semantics of operations on the `int` type's complement representation of integer numbers; they are internal composition laws on the subset $\{-2^{N-1}, 2^{N-1}-1\}$ of \mathbb{Z} , with $n = 2N$. For any integer binary operation \circ on \mathbb{Z} , the \circ operation is defined as $i \circ j = \text{normalize}(i \circ j)$, with

$$\text{normalize}(i) = i - N \cdot \text{sign}(i) \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq N/2 + \text{sign}(i) - 1 \leq 2 \\ 0 \leq N/2 - 1 \end{array} \right.$$

where $N = 2^n$ and $\text{sign}(i) = 0$ if $i = 0$ and ± 1 otherwise. Unary integer operations are defined likewise.

- The `normalize-ints/` directory may also include the following sub-directories:

- `app/` for Faust compiled code
- `pdf/` which contains this document;
- `src/` for all Faust sources used (see `listing1`);
- `svg/` for block diagrams, generated using the Scalable Vector Graphics format (<http://www.w3.org/Graphics/SVG/>);
- `tex/` for the `PDFX` source of this document.

4 Faust code listing

This section provides the listing of the Faust code used to generate this document.

```
Listing 1: normalize_ints.dsp
```

```
1 normalize_ints = "normalize_ints.dsp";
```

```
1 normalize_ints = "normalize_ints.dsp";
```

Exemple de Documentation Dirigée

Source Faust commenté avec balises de contrôle

Pour illustrer le principe, voici un exemple de source Faust avec des balises de contrôle :

Fichier : /home/orlarey/Bureau/faust-me...oc3/examples/noisemetadata.dsp

Page 1 sur 2

```
<mdoc>
\title{<metadata>name</metadata>}
\author{<metadata>author</metadata>}
\date{\today}
\maketitle

\begin{tabular}{ll}
\hline
\textbf{name} & <metadata>name</metadata> \\\
\textbf{version} & <metadata>version</metadata> \\\
\textbf{author} & <metadata>author</metadata> \\\
\textbf{license} & <metadata>license</metadata> \\\
\textbf{copyright} & <metadata>copyright</metadata> \\\
\hline
\end{tabular}
\bigskip
</mdoc>
//-----
// Noise generator and demo file for the Faust math documentation
//-----

declare name "Noise";
declare version "1.1";
declare author "Grame";
declare author "Yghe";
declare license "BSD";
declare copyright "(c)GRAME 2009";

<mdoc>
\section{Presentation of the "noise.dsp" Faust program}
This program describes a white noise generator with an interactive volume, using a random function.

\subsection{The random function}
</mdoc>

random = +(12345)-*(1103515245);
```

Exemple de Documentation Dirigée

Documentation résultante (pages 1-2)

Noise

Grame, Ylfa
March 5, 2010

name	Noise
version	1.1
author	Grame, Ylfa
license	BSD
homepage	http://www.grame.fr

1 Presentation of the "noise dsp" Faust program

This program describes a white noise generator with an interactive volume, using a random function.

1.1 The random function

The random function describes a generator of random numbers, which equation follows. You should notice beside the use of an integer arithmetic on 22 bits, adding an integer wrapping for big numbers.

- Output signal y such that
$$y(t) = r(t)$$
- Input signal (none)
- Intermediate signal r_1 such that
$$r_1(t) = 12345 + 1166552145 * r_1(t-1)$$

1.2 The noise function

The white noise then corresponds to

- Output signal y such that
$$y(t) = 4.6566128721458 * 10^{-10} * r_1(t)$$
- Input signal (none)

1

1.3 Just add a user interface element to play volume!

Finally, the second level of this program is controlled by a user dialer, which gives the following equation:

- Output signal y such that
$$y(t) = v_1(t) * r_1(t)$$
- Input signal (none)
- User-interface input signal v_1 , such that
$$v_1(t) = \text{slider}(t) * 0.1$$
 (default value = 0)
- Intermediate signal r_1 such that
$$r_1(t) = 4.6566128721458 * 10^{-10} * r_1(t)$$

2 Block-diagram schema of process

This process is illustrated on figure 1.

3 Notice of this documentation

You might be careful of certain information and naming conventions used in this documentation:

- This document was generated using Faust version 0.9.13 on March 05, 2010.
- The value of a Faust program is the result of applying the signal transformer described by the expressions to which the program describes a bound to input signals, running at the f_s sampling frequency.
- Faust (Functional Audio Stream) is a functional programming language designed for synchronous real-time signal processing and systems applications. A Faust program is a set of building blocks to expressions that describe signal transformers. A signal x in S is a function mapping time $t \in \mathbb{Z}$ to values $x(t) \in \mathbb{R}$, while a signal transformer is a function from S^1 to S^2 , where $s_1, s_2 \in S$. See the Faust manual for additional information (<http://baobab.grame.fr>).
- Every mathematical formula derived from a Faust expression is assumed, in this document, to having been normalised (in an implementation-dependent manner) by the Faust compiler.

2

Exemple de Documentation Dirigée

Documentation résultante (pages 3-4)

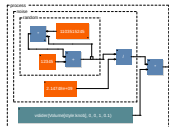


Figure 1: Block diagram of process

- A block diagram is a graphical representation of the Faust binding of an identifier I to an expression E ; each graph is put in a box labeled by I . Subexpressions of E are recursively displayed as long as the whole picture fits in one page.
- This document uses the following integer operations:

operation	name	description
$+$	intAdd	integer addition
$*$	intMul	integer multiplication

Integer operations in Faust are inspired by the semantics of operations on the n -bit two's complement representation of integer numbers; they are natural operations here on the subset $\{-2^{n-1}, 2^{n-1}-1\}$ of \mathbb{Z} , with $n = 32$. For any integer binary operation \circ on \mathbb{Z} , the \odot operation is defined as $i \odot j = \text{intmod}(i \circ j, N)$, with

$$\text{intmod}(i) = i - N \cdot \text{sign}(i) \quad \left[\begin{array}{l} i > 0 \\ i < 0 \end{array} \right]$$

where $N = 2^n$ and $\text{sign}(i) = 0$ if $i = 0$ and $\text{sign}(i) \in \{-1, 1\}$ otherwise. Unary integer operations are defined likewise.

3

- The `src/metatata-who/` directory may also include the following sub-directories:
 - `app/` for Faust compiled code;
 - `pdf/` which contains this document;
 - `src/` for all Faust sources used (see `librairie`);
 - `svg/` for block diagrams, rendered using the Scalable Vector Graphics format (<http://www.w3.org/Graphics/SVG/>);
 - `tex/` for the L^AT_EX sources of this document.

4 Listing of the input code

The following listing shows the input Faust code, passed to compile this mathematical documentation.

```
Listing 1: src/metatata-who  
1 // Faust generator and data files for the Faust math documentation.  
2  
3 //  
4 //  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117  
118  
119  
120  
121  
122  
123  
124  
125  
126  
127  
128  
129  
130  
131  
132  
133  
134  
135  
136  
137  
138  
139  
140  
141  
142  
143  
144  
145  
146  
147  
148  
149  
150  
151  
152  
153  
154  
155  
156  
157  
158  
159  
160  
161  
162  
163  
164  
165  
166  
167  
168  
169  
170  
171  
172  
173  
174  
175  
176  
177  
178  
179  
180  
181  
182  
183  
184  
185  
186  
187  
188  
189  
190  
191  
192  
193  
194  
195  
196  
197  
198  
199  
200  
201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212  
213  
214  
215  
216  
217  
218  
219  
220  
221  
222  
223  
224  
225  
226  
227  
228  
229  
230  
231  
232  
233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240  
241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251  
252  
253  
254  
255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264  
265  
266  
267  
268  
269  
270  
271  
272  
273  
274  
275  
276  
277  
278  
279  
280  
281  
282  
283  
284  
285  
286  
287  
288  
289  
290  
291  
292  
293  
294  
295  
296  
297  
298  
299  
300  
301  
302  
303  
304  
305  
306  
307  
308  
309  
310  
311  
312  
313  
314  
315  
316  
317  
318  
319  
320  
321  
322  
323  
324  
325  
326  
327  
328  
329  
330  
331  
332  
333  
334  
335  
336  
337  
338  
339  
340  
341  
342  
343  
344  
345  
346  
347  
348  
349  
350  
351  
352  
353  
354  
355  
356  
357  
358  
359  
360  
361  
362  
363  
364  
365  
366  
367  
368  
369  
370  
371  
372  
373  
374  
375  
376  
377  
378  
379  
380  
381  
382  
383  
384  
385  
386  
387  
388  
389  
390  
391  
392  
393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403  
404  
405  
406  
407  
408  
409  
410  
411  
412  
413  
414  
415  
416  
417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427  
428  
429  
430  
431  
432  
433  
434  
435  
436  
437  
438  
439  
440  
441  
442  
443  
444  
445  
446  
447  
448  
449  
450  
451  
452  
453  
454  
455  
456  
457  
458  
459  
460  
461  
462  
463  
464  
465  
466  
467  
468  
469  
470  
471  
472  
473  
474  
475  
476  
477  
478  
479  
480  
481  
482  
483  
484  
485  
486  
487  
488  
489  
490  
491  
492  
493  
494  
495  
496  
497  
498  
499  
500  
501  
502  
503  
504  
505  
506  
507  
508  
509  
510  
511  
512  
513  
514  
515  
516  
517  
518  
519  
520  
521  
522  
523  
524  
525  
526  
527  
528  
529  
530  
531  
532  
533  
534  
535  
536  
537  
538  
539  
540  
541  
542  
543  
544  
545  
546  
547  
548  
549  
550  
551  
552  
553  
554  
555  
556  
557  
558  
559  
560  
561  
562  
563  
564  
565  
566  
567  
568  
569  
570  
571  
572  
573  
574  
575  
576  
577  
578  
579  
580  
581  
582  
583  
584  
585  
586  
587  
588  
589  
590  
591  
592  
593  
594  
595  
596  
597  
598  
599  
600  
601  
602  
603  
604  
605  
606  
607  
608  
609  
610  
611  
612  
613  
614  
615  
616  
617  
618  
619  
620  
621  
622  
623  
624  
625  
626  
627  
628  
629  
630  
631  
632  
633  
634  
635  
636  
637  
638  
639  
640  
641  
642  
643  
644  
645  
646  
647  
648  
649  
650  
651  
652  
653  
654  
655  
656  
657  
658  
659  
660  
661  
662  
663  
664  
665  
666  
667  
668  
669  
670  
671  
672  
673  
674  
675  
676  
677  
678  
679  
680  
681  
682  
683  
684  
685  
686  
687  
688  
689  
690  
691  
692  
693  
694  
695  
696  
697  
698  
699  
700  
701  
702  
703  
704  
705  
706  
707  
708  
709  
710  
711  
712  
713  
714  
715  
716  
717  
718  
719  
720  
721  
722  
723  
724  
725  
726  
727  
728  
729  
730  
731  
732  
733  
734  
735  
736  
737  
738  
739  
740  
741  
742  
743  
744  
745  
746  
747  
748  
749  
750  
751  
752  
753  
754  
755  
756  
757  
758  
759  
760  
761  
762  
763  
764  
765  
766  
767  
768  
769  
770  
771  
772  
773  
774  
775  
776  
777  
778  
779  
780  
781  
782  
783  
784  
785  
786  
787  
788  
789  
790  
791  
792  
793  
794  
795  
796  
797  
798  
799  
800  
801  
802  
803  
804  
805  
806  
807  
808  
809  
810  
811  
812  
813  
814  
815  
816  
817  
818  
819  
820  
821  
822  
823  
824  
825  
826  
827  
828  
829  
830  
831  
832  
833  
834  
835  
836  
837  
838  
839  
840  
841  
842  
843  
844  
845  
846  
847  
848  
849  
850  
851  
852  
853  
854  
855  
856  
857  
858  
859  
860  
861  
862  
863  
864  
865  
866  
867  
868  
869  
870  
871  
872  
873  
874  
875  
876  
877  
878  
879  
880  
881  
882  
883  
884  
885  
886  
887  
888  
889  
890  
891  
892  
893  
894  
895  
896  
897  
898  
899  
900  
901  
902  
903  
904  
905  
906  
907  
908  
909  
910  
911  
912  
913  
914  
915  
916  
917  
918  
919  
920  
921  
922  
923  
924  
925  
926  
927  
928  
929  
930  
931  
932  
933  
934  
935  
936  
937  
938  
939  
940  
941  
942  
943  
944  
945  
946  
947  
948  
949  
950  
951  
952  
953  
954  
955  
956  
957  
958  
959  
960  
961  
962  
963  
964  
965  
966  
967  
968  
969  
970  
971  
972  
973  
974  
975  
976  
977  
978  
979  
980  
981  
982  
983  
984  
985  
986  
987  
988  
989  
990  
991  
992  
993  
994  
995  
996  
997  
998  
999  
1000
```

4