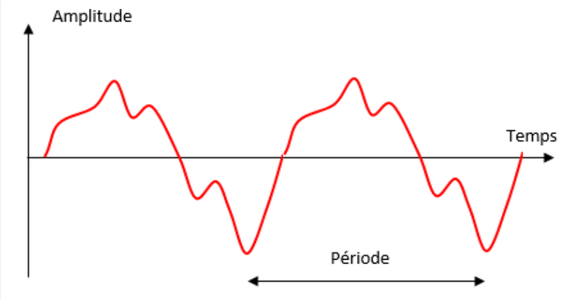
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Project SIR

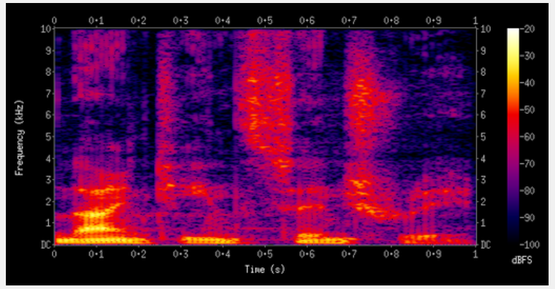
Accélération du calcul du niveau de pression acoustique

Maxime Chaffraix, Jules Nogales, Leo Perret, Reda Khatid
Encadrant Anastasia Volkova, Florent de Dinechin et Romain Michon

La mesure du niveau de pression acoustique pondéré, par exemple le SPL-A, repose sur une analyse fréquentielle à bande étroite.



Tier Octave



Probleme :

Comment designer les filtres ? Comment les quantifiers ? Comment on les implémente ?, etc

Référence :

Design and Implementation of Low-Power ANSI S1.11 Filter Bank for Digital Hearing Aids, Yu-Ting Kuo, Tay-Jyi Lin, Member, IEEE, Yueh-Tai Li, and Chih-Wei Liu

Plan

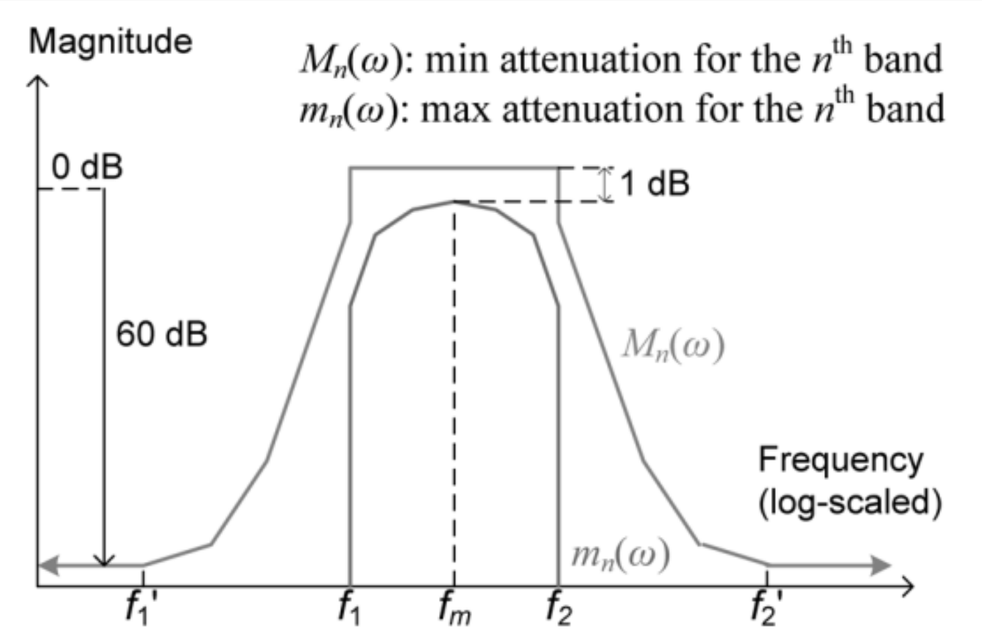
01. Design Space Exploration

02. Vers une implémentation matérielle

01. Design Space Exploration

Conception et sélection des filtres de tiers d'octave (norme ANSI)

Le calcul du SPL est réalisé à l'aide d'un banc de filtres passe-bande répartis en tiers d'octave (bon compromis entre résolution fréquentielle et complexité algorithmique).



$$f_1(n) = f_m(n) \times 2^{\frac{-1}{6}}, \text{ and } f_2(n) = f_m(n) \times 2^{\frac{1}{6}}$$

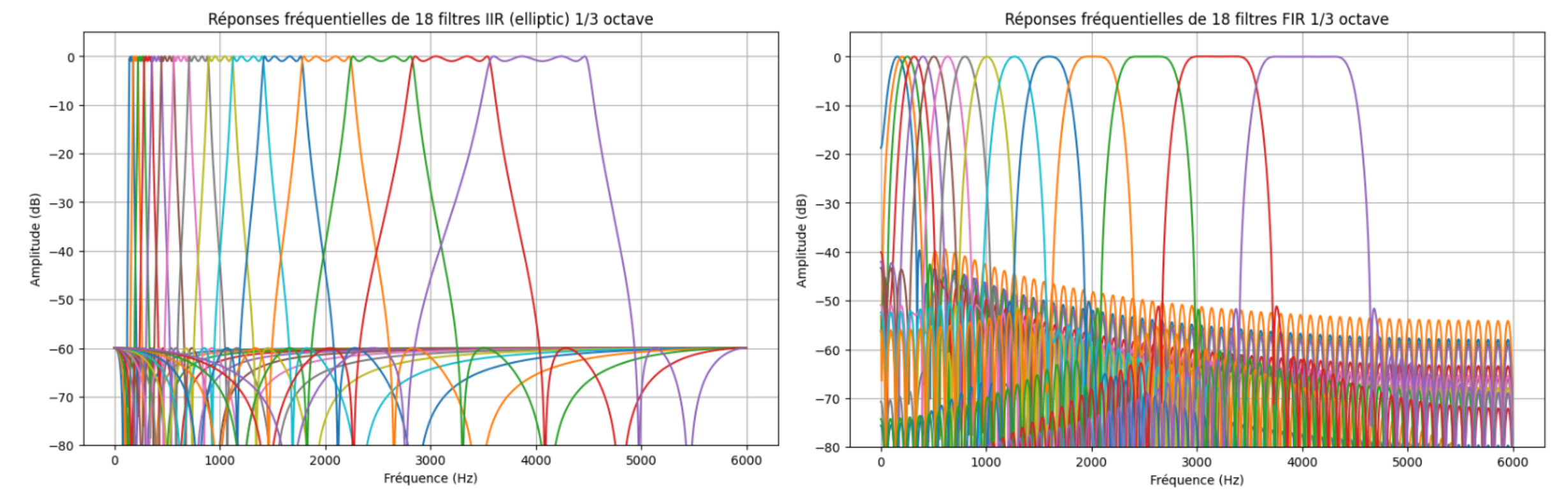
$$f_m(n) = 2^{\left(\frac{n-30}{3}\right)} \times f_r$$

Table B1. Limits on relative attenuation for one-third-octave-band filters.

Breakpoint normalized frequency, f/f_m for Ω_h and Ω_l		Minimum; maximum attenuation limits, dB		
		Filter class		
base-ten	base-two	0	1	2
1.000,00	1.000,00	–0.15; +0.15	–0.3; +0.3	–0.5; +0.5
1.026,67 / 0.974,02	1.026,76 / 0.973,94	–0.15; +0.2	–0.3; +0.4	–0.5; +0.6
1.055,75 / 0.947,19	1.055,94 / 0.947,02	–0.15; +0.4	–0.3; +0.6	–0.5; +0.8
1.087,46 / 0.919,58	1.087,76 / 0.919,32	–0.15; +1.1	–0.3; +1.3	–0.5; +1.6
1.122,02 / 0.891,25	1.122,46 / 0.890,90	–0.15; +4.5	–0.3; +5.0	–0.5; +5.5
1.122,02 / 0.891,25	1.122.46 / 0.890.90	+2.3; +4.5[a]	+2.0; +5.0[a]	+1.6; +5.5[a]
1.294,37 / 0.772,57	1.295,65 / 0.771,81	+18.0; +∞	+17.5; +∞	+16.5; +∞
1.881,73 / 0.531,43	1.886,95 / 0.529,96	+42.5; +∞	+42; +∞	+41; +∞
3.053,65 / 0.327,48	3.069,55 / 0.325,78	+62; +∞	+61; +∞	+55; +∞
≥5.391,95 / ≤0.185,46	≥5.434,74 / ≤0.184,00	+75; +∞	+70; +∞	+60; +∞

ANSI S1.11: Specification for Octave, Half-Octave, and Third Octave Band Filter Sets

Tracé réponses fréquentielles ⅓ octaves



Estimation ordre filtre pour satisfaire ANSI

Bande ANSI	Ordre FIR estimé	Ordre Butterworth estimé	Ordre Chebyshev1 estimé	Ordre Chebyshev2 estimé	Ordre Elliptic estimé
22	13988	8	5	5	4
23	29239	8	5	5	4
24	37322	8	5	5	4
25	26927	8	5	5	4
26	19229	8	5	5	4
27	18662	8	5	5	4
28	19277	8	5	5	4
29	32017	8	5	5	4
30	675803	8	5	5	4
31	23275	8	5	5	4
32	16009	8	5	5	4
33	338126	8	5	5	4
34	11638	8	6	6	4
35	51170	8	6	6	4
36	169287	8	6	6	4

Les Filtres IIR elliptiques ont été retenus :

À ordre équivalent, ils offrent la meilleure sélectivité fréquentielle

Permet de réduire le nombre d'opérations arithmétiques

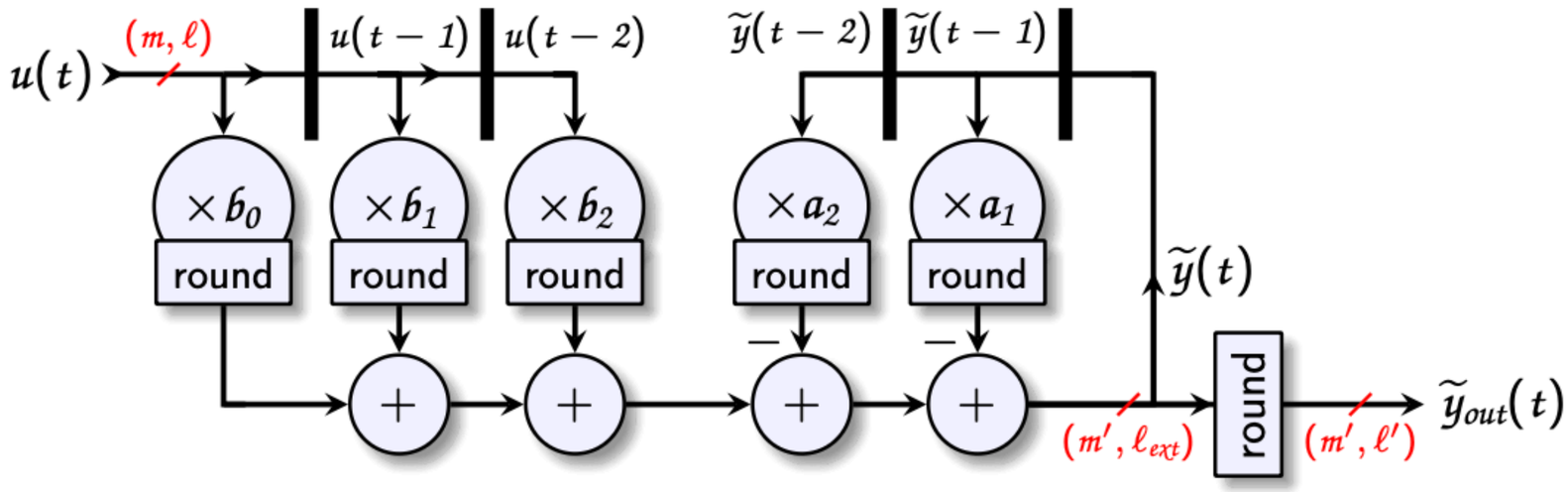
Plus sensibles aux erreurs de quantification

Quantification des filtres

L'utilisation d'une arithmétique en virgule fixe est indispensable pour réduire la consommation énergétique et la surface logique

SciPy

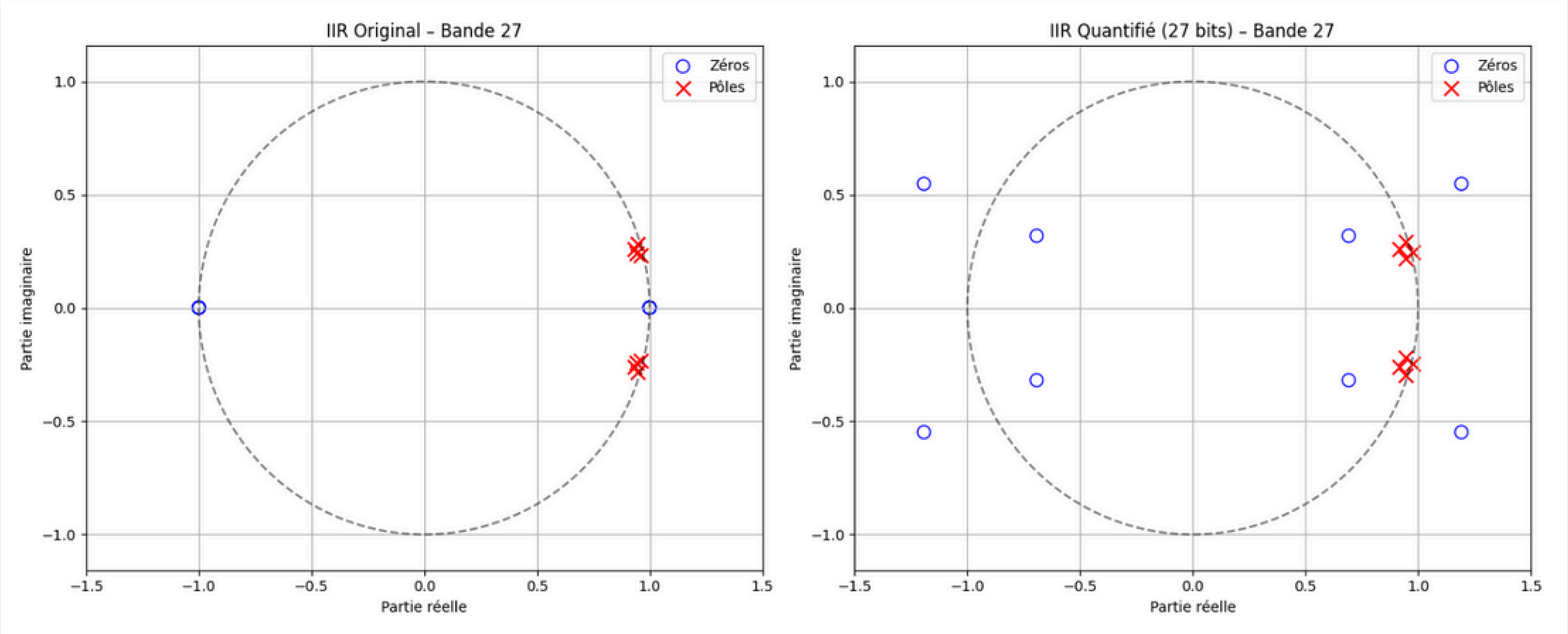
format fixe signé Q(m,l)



l_ext est directement calculé par FloPoCo WCPG

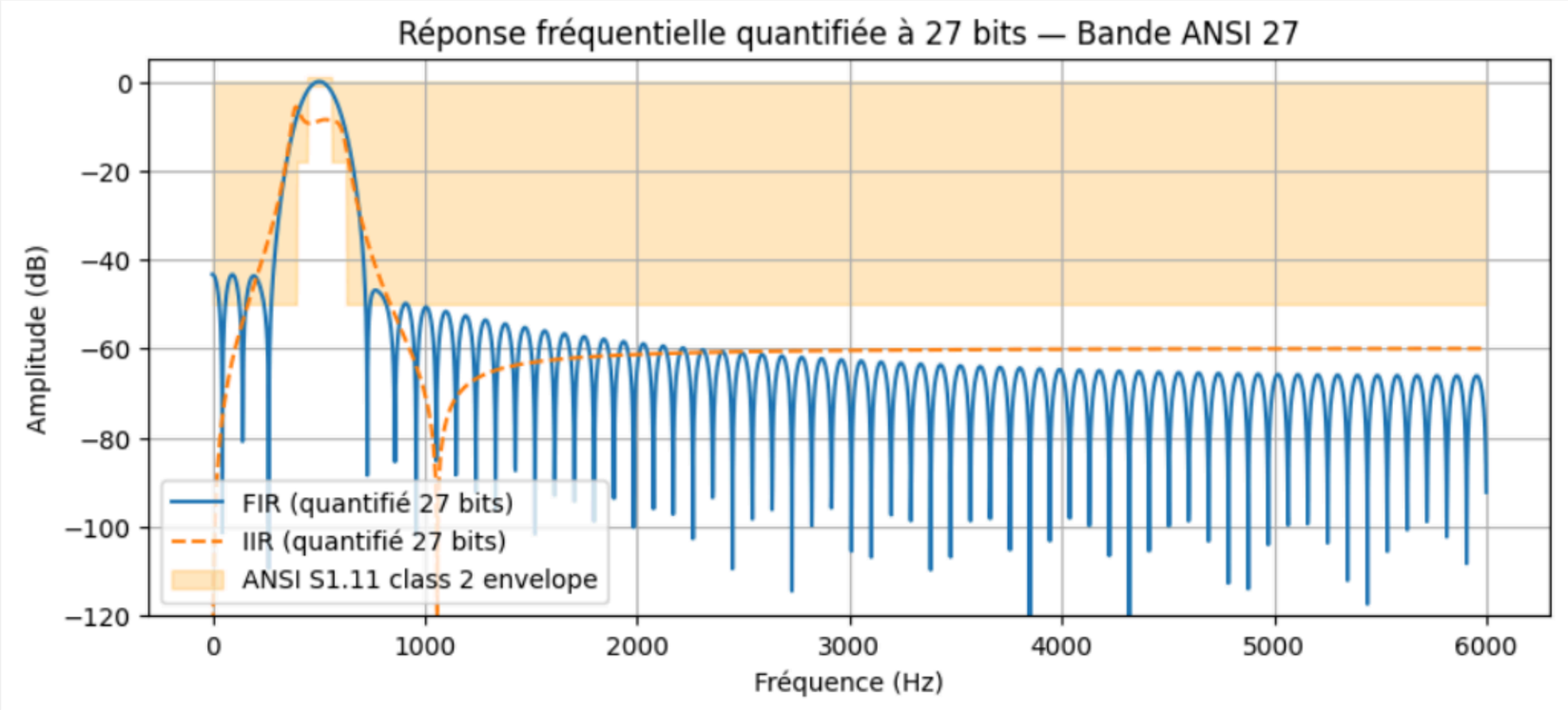
Quantification des filtres - Problèmes potentiels

bit de signe - bits pour partie entiere - bits fractionnaire



Dimensionnement de la précision interne

Etape 1 :



Dimensionnement de la précision interne

Etape 2 :

Appel au Worst-Case Peak Gain de FloPoCo

Ordre N	delta_rel_%	wl	integer_bits	frac_bits	lsbExt	H	Heps	guard_bits
4	5	18	5	13	-23	2.24312	533.598	10
4	10	17	5	12	-23	2.26435	556.72	10
4	15	16	5	11	-23	2.0506	543.941	10
4	20	16	5	11	-23	2.0506	543.941	10
5	5	22	7	15	-25	2.51954	3948.34	12
5	10	22	7	15	-25	2.51954	3948.34	12
5	15	22	7	15	-25	2.51954	3948.34	12
5	20	22	7	15	-25	2.51954	3948.34	12
6	5	26	8	18	-28	3.09274	30902.8	15
6	10	26	8	18	-28	3.09274	30902.8	15
6	15	26	8	18	-28	3.09274	30902.8	15
6	20	26	8	18	-28	3.09274	30902.8	15

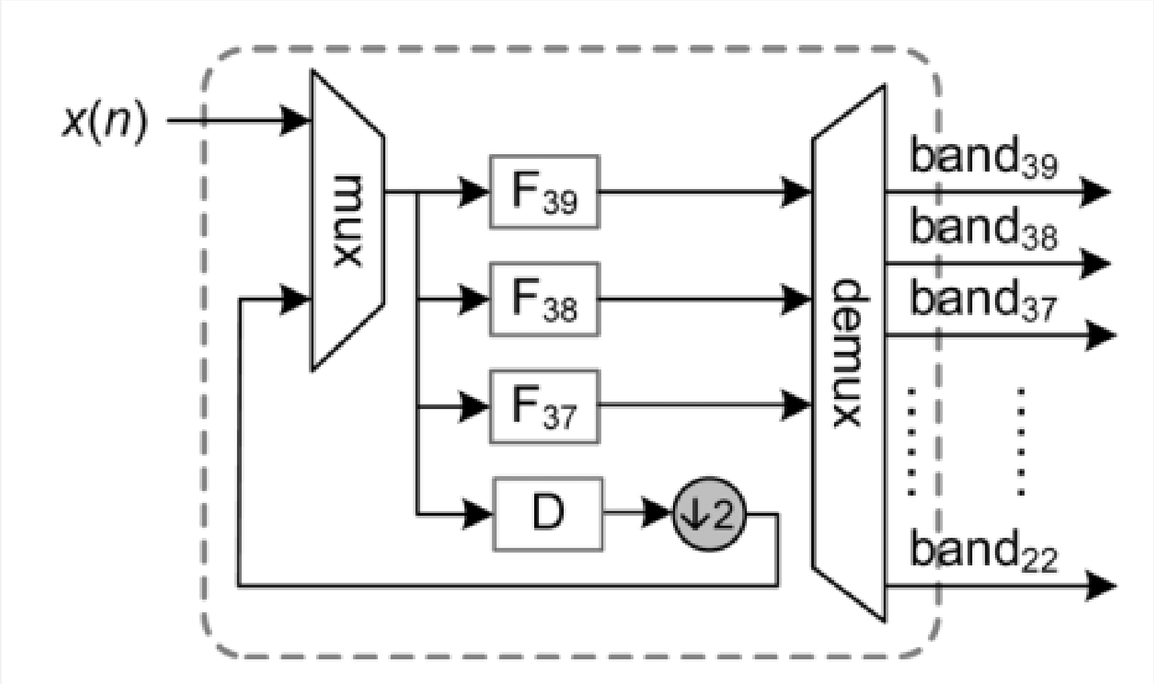
Synthèse des paramètres de quantification et métriques numériques pour filtre IIR elliptic (bande 39, entre 7127 et 8980 Hz)

Implémentation Multi Rate

Pour les bandes de tiers d'octave, la fréquence d'échantillonnage initiale de 48 kHz est largement surdimensionnée

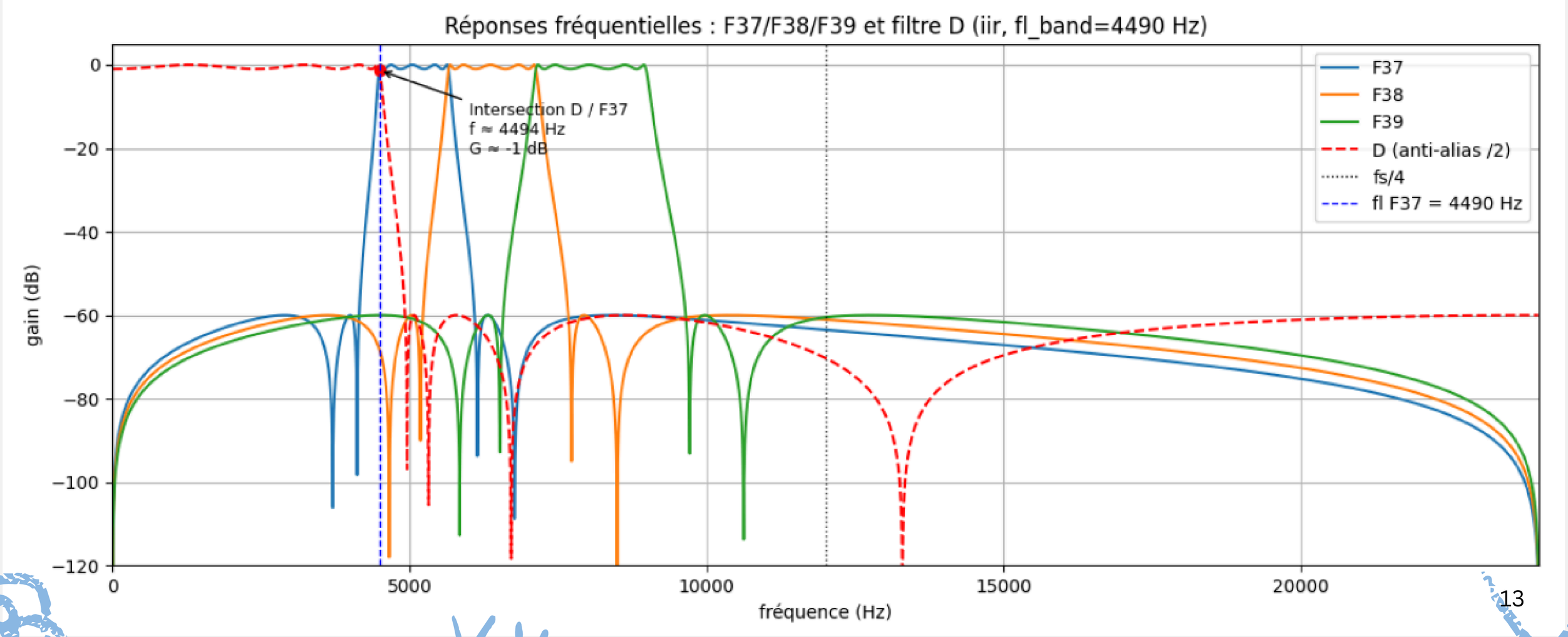
Exemple bande 39 :

$f_c \approx 10\ \text{kHz},\ \ f_u \approx 11{,}2\ \text{kHz} \ll f_s/2 = 24\ \text{kHz}$



Permet de traiter les octaves successives à des fréquences d'échantillonnage de plus en plus faibles.

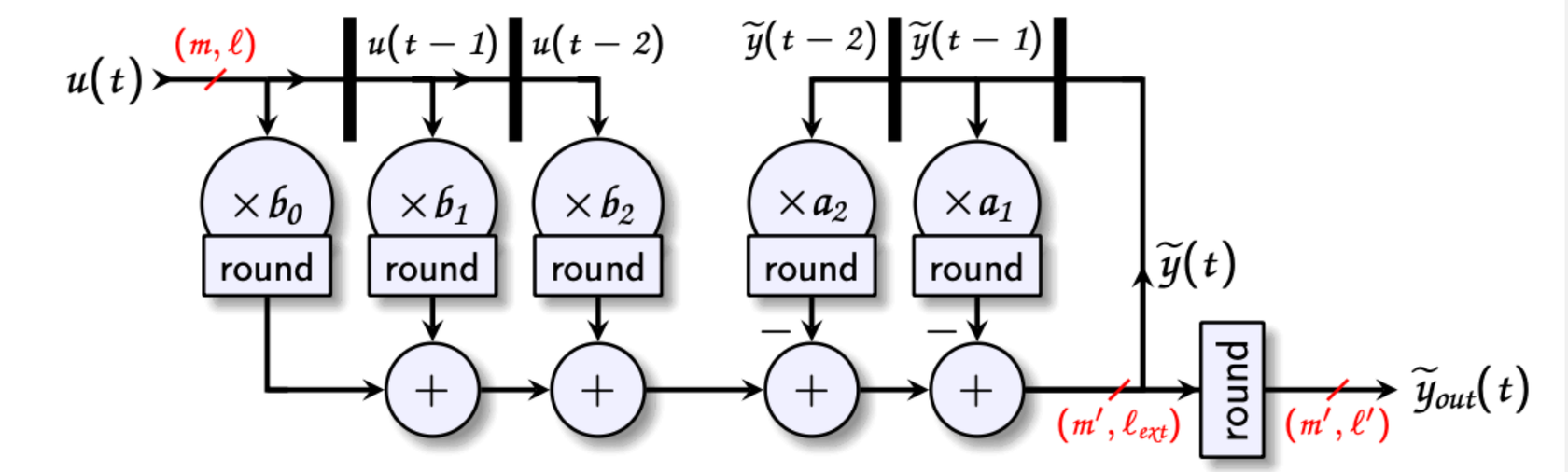
Implémentation Multi Rate



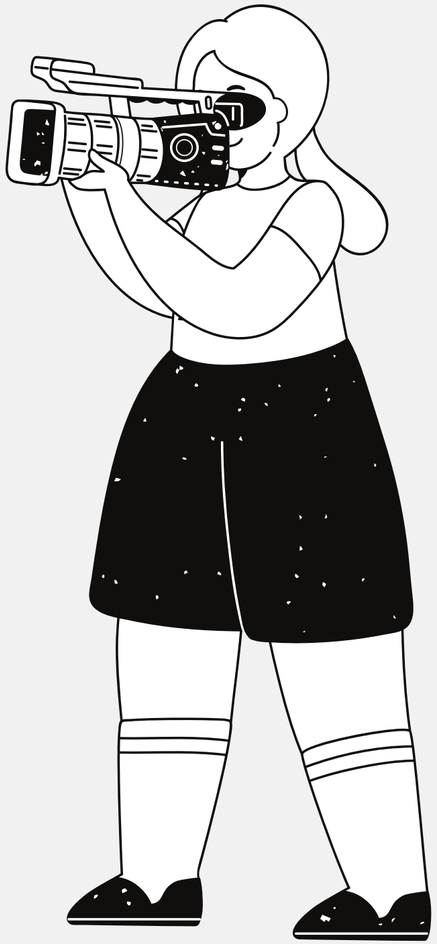
Simulateur Python

Reproduit l'intégralité de la chaîne de traitement et compare une implémentation en virgule fixe à une référence flottante.

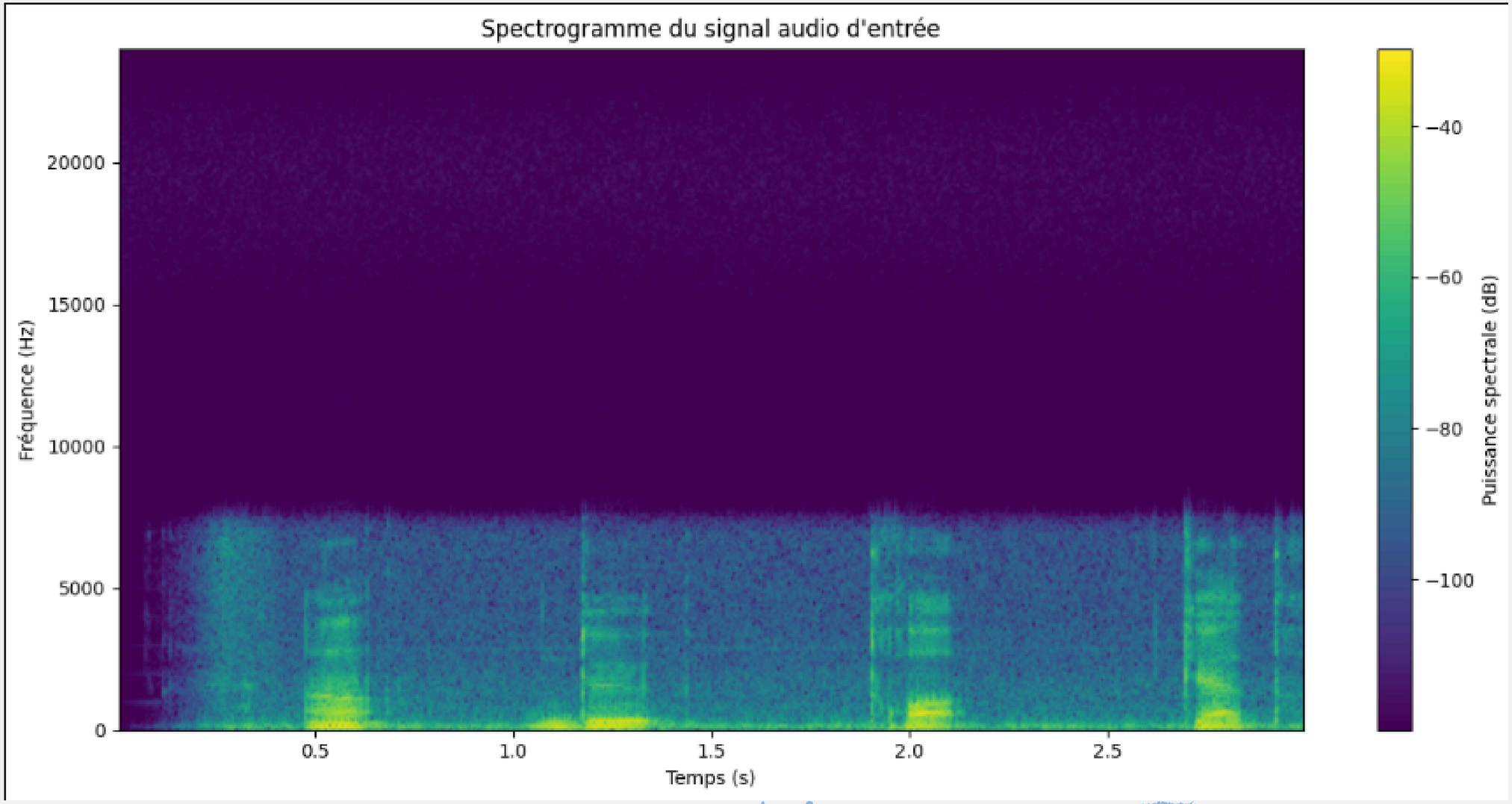
format fixe signé Q(m,l)



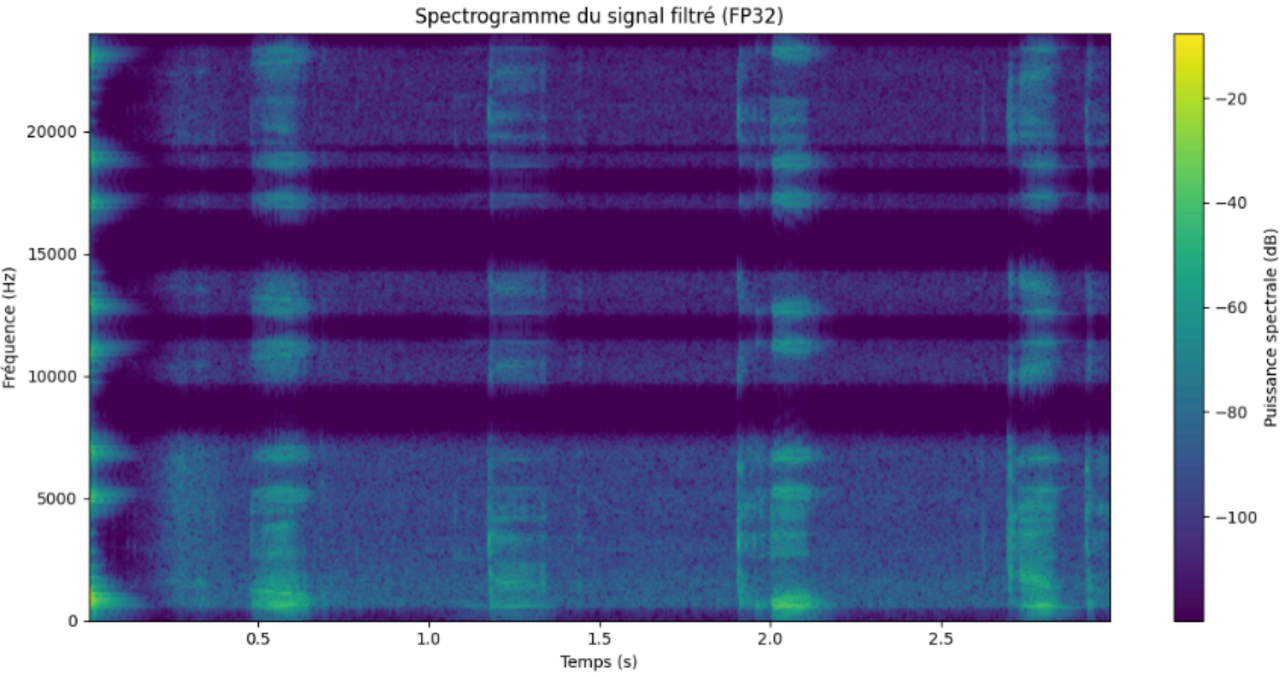
l_ext est directement calculé par FloPoCo WCPG

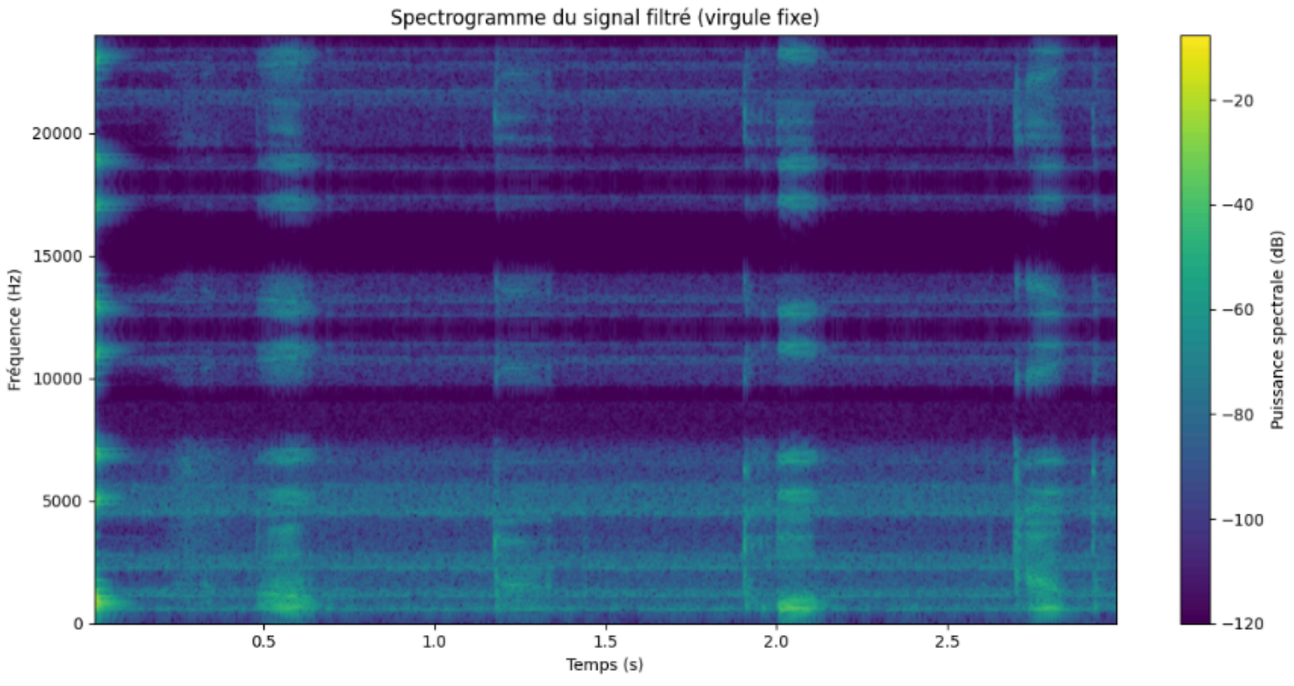


Spectrogramme - comptage de 1 à 4



Spectrogramme - comptage de 1 à 4





Comparaison des performances

Octave	Bande	ΔE (dB)
0	0	4.67
0	1	0.26
0	2	0.06
1	0	2.32
1	1	0.05
1	2	0
2	0	0.05
2	1	−0.01
2	2	0
3	0	0.06
3	1	0
3	2	0

$$RMS(y) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_n y[n]^2}$$

$$RMS_{err}(y) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_n (y_{fx}[n] - y_{fp}[n])^2}$$

$$SNR = 20log_{10}\left(\frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_n y_{fp}[n]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_n (y_{fx}[n] - y_{fp}[n])^2}}\right)$$

$$\Delta E = 20log_{10}\left(\frac{RMS(y_{fx})}{RMS(y_{fp})}\right)$$

Octave	RMS FP	RMS FX	RMS err	SNR (dB)
0	2.83E-03	4.19E-03	3.06E-03	-0.68
1	6.30E-03	7.02E-03	3.09E-03	6.2
2	2.64E-02	2.66E-02	3.06E-03	18.73
3	1.79E-01	1.80E-01	3.19E-03	35.01

02. Vers une implémentation matérielle

RPA Scheduling : le principe fondamental

Idée clé :
On ne calcule pas toutes les octaves à chaque tic d'horloge => On adapte la fréquence de calcul selon l'octave.

Règle d'ordonnancement :
Chaque octave est calculée deux fois moins souvent que la précédente :

Octave 1 → 1 / 2
Octave 2 → 1 / 4
Octave 3 → 1 / 8
...
Octave 8 → 1 / 256

Pourquoi ça marche :

- Les hautes octaves portent plus d'énergie perceptive
- Les basses octaves évoluent plus lentement
- L'architecture de calcul est partagée

Gain :
=> Forte réduction de la complexité
=> Résolution temporelle préservée

RPA Scheduling

TABLE II
RPA SCHEDULING

Time slot	Samples being calculated	# octave
T=0	$y_{37}[0], y_{38}[0], y_{39}[0], x_2[0]$	1
T=1	$y_{34}[0], y_{35}[0], y_{36}[0], x_3[0]$	2
T=2	$y_{37}[1], y_{38}[1], y_{39}[1]$	1
T=3	$y_{31}[0], y_{32}[0], y_{33}[0], x_4[0]$	3
T=4	$y_{37}[2], y_{38}[2], y_{39}[2], x_2[1]$	1
T=5	$y_{34}[1], y_{35}[1], y_{36}[1]$	2
T=6	$y_{37}[3], y_{38}[3], y_{39}[3]$	1
T=7	$y_{28}[0], y_{29}[0], y_{30}[0], x_5[0]$	4
T=8	$y_{37}[4], y_{38}[4], y_{39}[4], x_2[2]$	1
T=9	$y_{34}[2], y_{35}[2], y_{36}[2], x_3[1]$	2
T=10	$y_{37}[5], y_{38}[5], y_{39}[5]$	1
T=11	$y_{31}[1], y_{32}[1], y_{33}[1]$	3
T=12	$y_{37}[6], y_{38}[6], y_{39}[6]\ x_2[3]$	1
T=13	$y_{34}[3], y_{35}[3], y_{36}[3]$	2
...	...	...

Séquence RPA : construction récursive

Construction manuelle (exemples) :

2 octaves : 1 2 1 X
3 octaves : 1 2 1 3 1 2 1 X
4 octaves : 1 2 1 3 1 2 1 4 1 2 1 3 1 2 1 X
X = calcul effectué mais non stocké

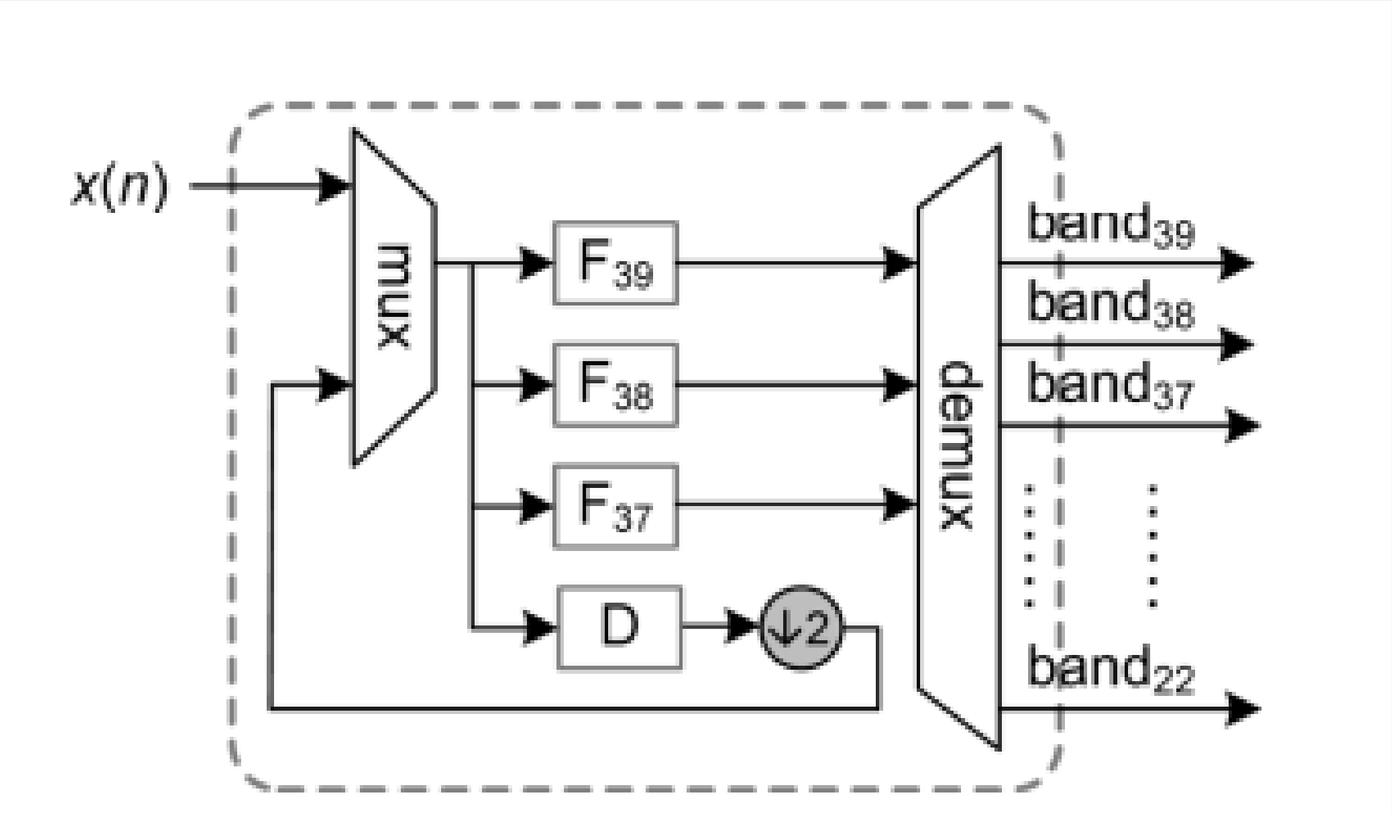
Observation essentielle :

- La séquence est récursive
- Chaque nouvelle octave s'insère à intervalles réguliers
- Le motif se généralise naturellement jusqu'à 8 octaves

Conséquence :

=> Ordonnancement déterministe

Ordonnancement FPGA en tiers d'octave



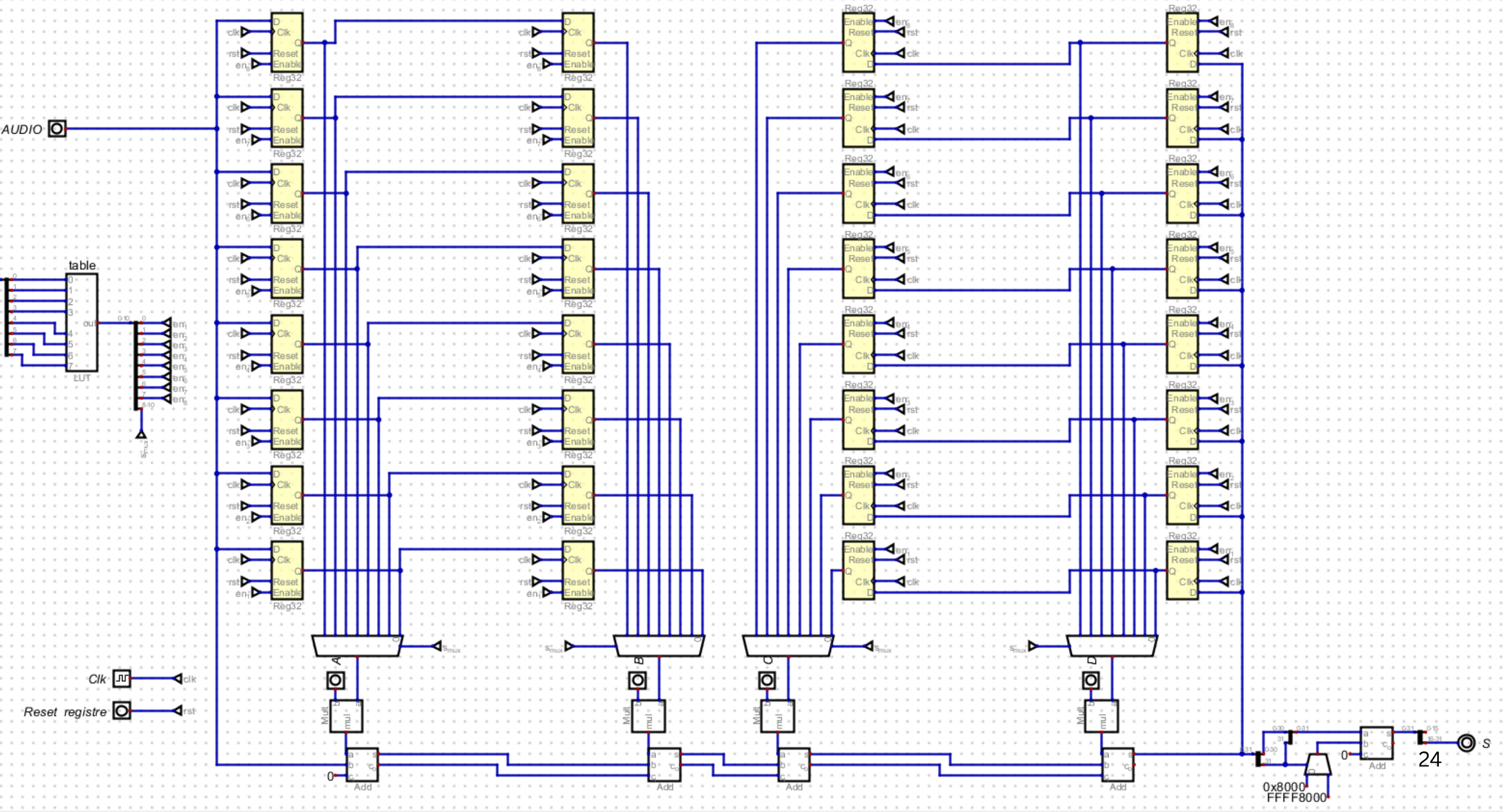
Implémentation RPA pour les tiers d’octave

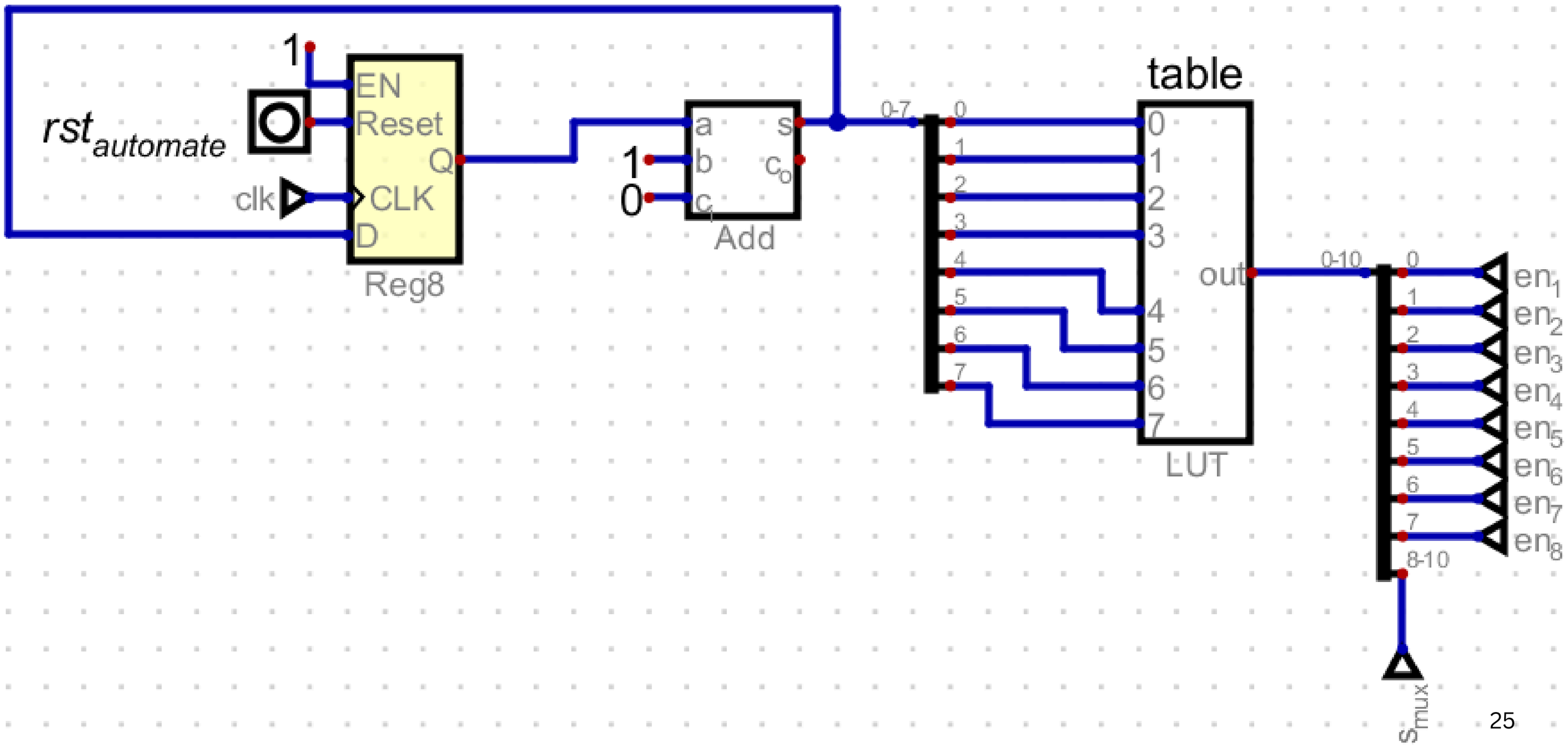
Dernière itération :

- la sortie de D n’est pas utilisée
- aucune octave n’est calculée

Effet :

- pattern respecté
- séquence cohérente
- aucune valeur invalide stockée


AUDIO
table
LUT
Clk
Reset registre
Reg32
Mult
Add
0x8000
FFFF8000
S


1
EN
Reset
Q
CLK
D
Reg8
rst automate
clk
a
b
c
s
c_o
Add
1
0
0-7
table
out
LUT
0-10
8-10
en1
en2
en3
en4
en5
en6
en7
en8
s_mux

Conclusion

Merci !