

SQUIDs et méthodes de multiplexage

ou “comment utiliser intelligemment un amplificateur supracon.”

Damien PRÊLE

damien.prele@apc.univ-paris7.fr



Détection de Rayonnement à Très Basse Température

(6ième école thématique : perspectives des détecteurs cryogéniques, Fréjus, 10-15 mai 2009)



Introduction

Développement de **grandes matrices** de détecteurs cryogéniques

- Isolation thermique (autonomie)
- Réduction du câblage (source de panne)

Multiplexage

- Polarisation en tension des bolomètres supra. (lecture en courant)
- Fonctionnement à température cryogénique

SQUID

Introduction (2)

- Marge de bande passante $BW_{\text{SQUID}} (> 1 \text{ MHz}) / BW_{\text{TES}} (\cong \text{kHz})$:

Nombre de détecteurs multiplexés $\cong \mathbf{BW_{MULTIPLEXEUR} / BW_{DETECTEUR}}$

- Marge de bruit $in_{\text{TES}} (\cong \text{qq } 10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}) / in_{\text{SQUID}} (\cong \text{pA}/\sqrt{\text{Hz}})$:

Nombre de détecteurs multiplexés $\cong (\mathbf{in_{DETECTEUR} / in_{MULTIPLEXEUR}})^2$

Plan

- **Partie 1** : Techniques de multiplexage

Multiplexage temporel et fréquentiel

- **Partie 2** : SQUID et multiplexage cryogénique appliqué

SQUID

Multiplexeurs à SQUID

Partie I

Techniques de multiplexage

Multiplexage

- *Action d'assembler des signaux indépendants en un seul signal composite à partir duquel ils peuvent être restitués.*

- **Temporel** : Multiplexage dans lequel des signaux indépendants occupent des **créneaux temporels distincts** dans le signal composite. **TDM**

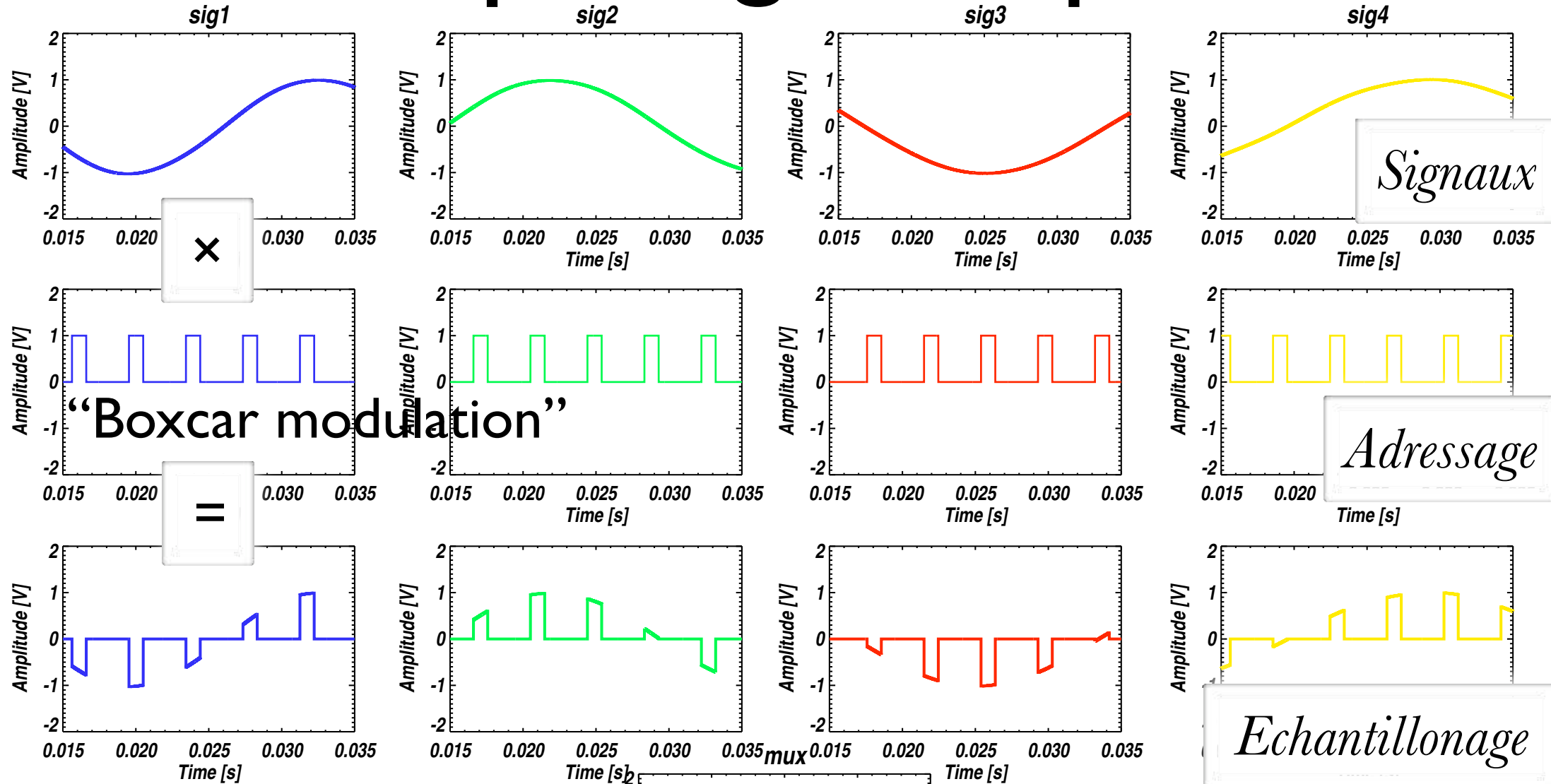
- **Fréquentiel** : Multiplexage dans lequel des signaux indépendants occupent des **bandes de fréquences distinctes** dans le signal composite. **FDM**

Multiplexage temporel

Time-Division Multiplexing TDM

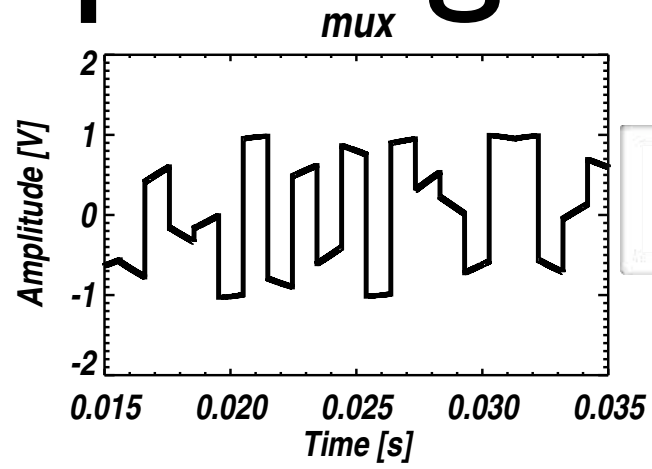


Multiplexage Temporel

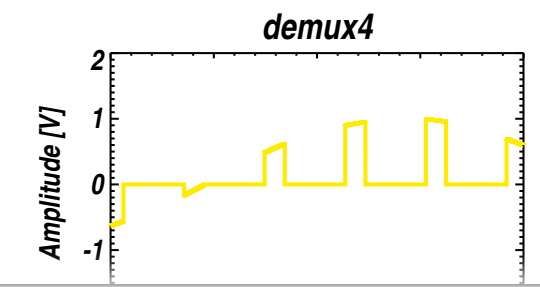
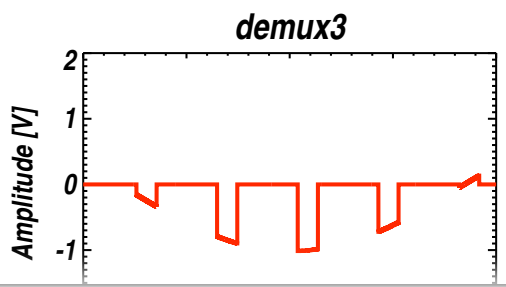
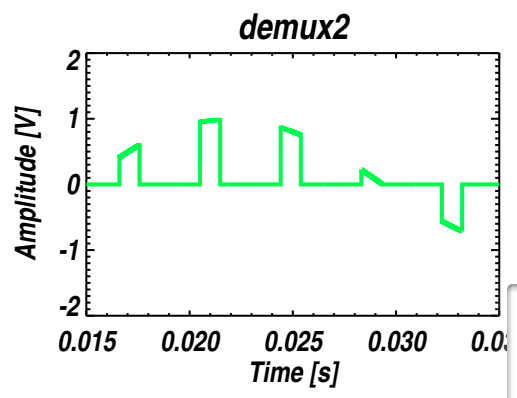
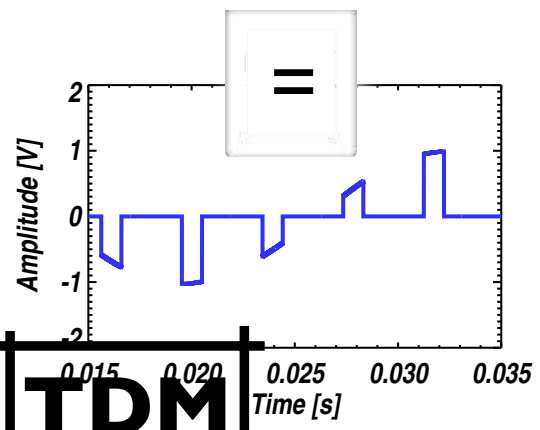
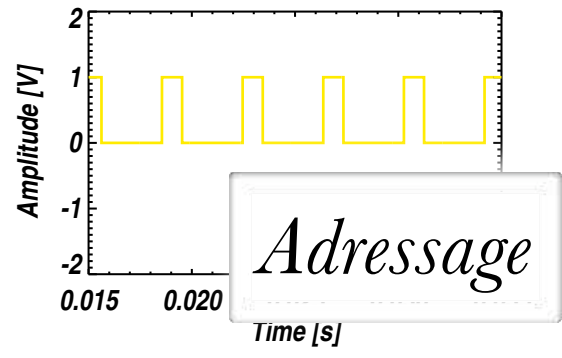
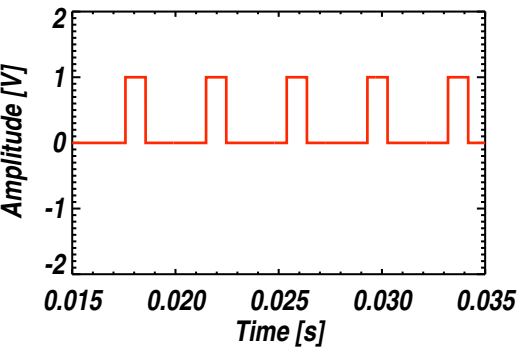
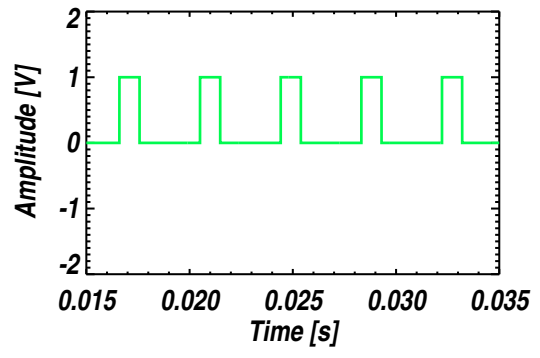
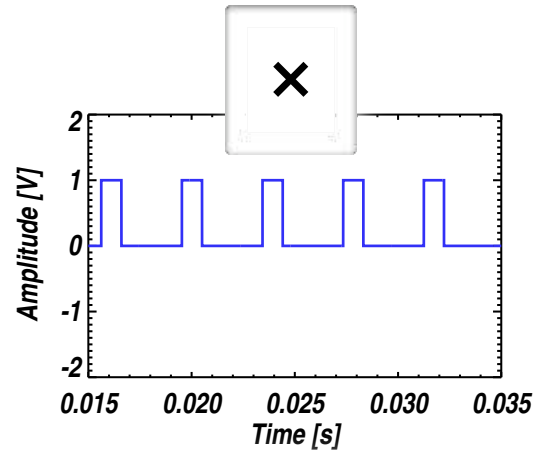


TDM

De-multiplexage Temporel



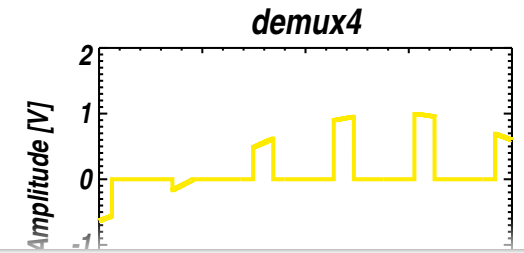
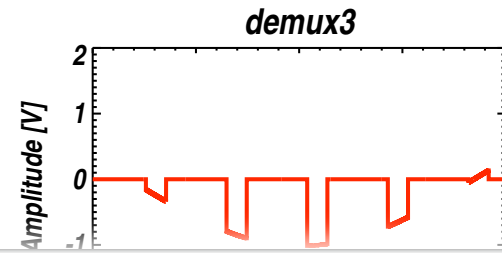
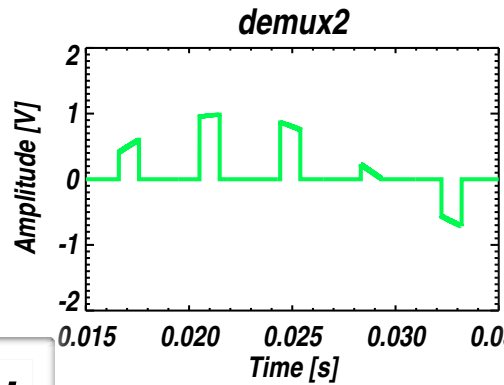
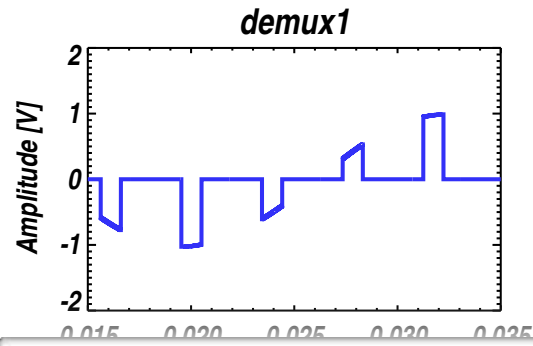
Signal composite



Signaux démultiplexés (échantillonnés)

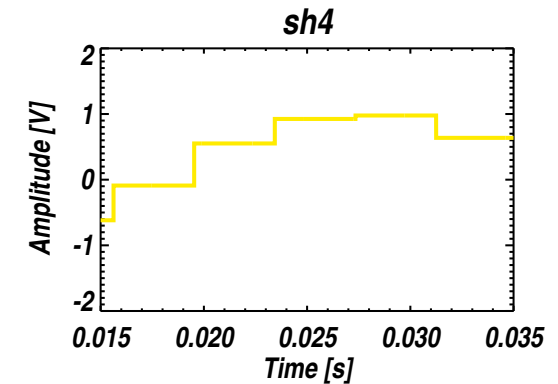
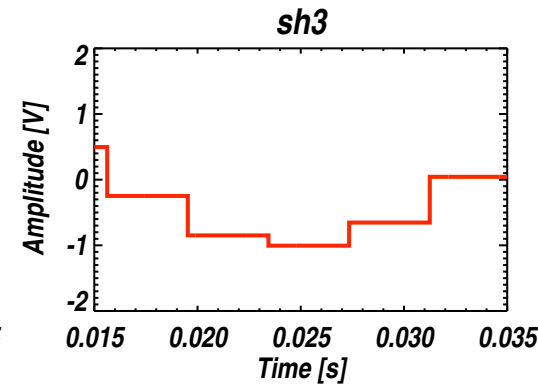
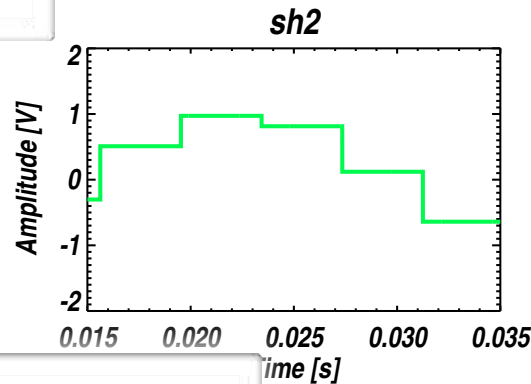
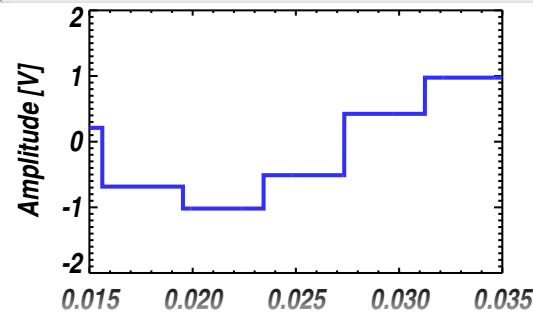
TDM

Sample and hold & filtrage

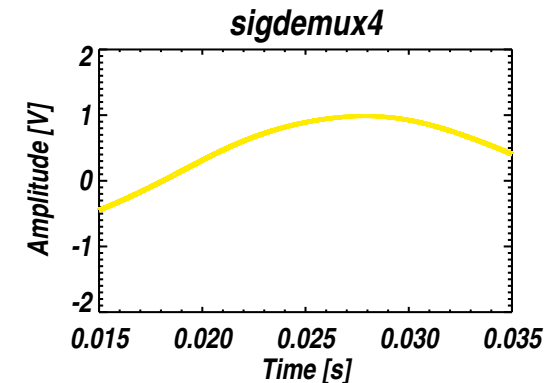
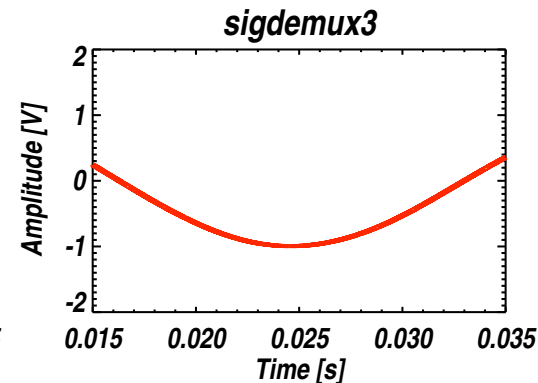
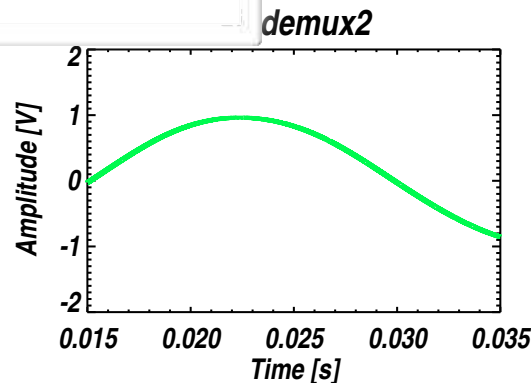
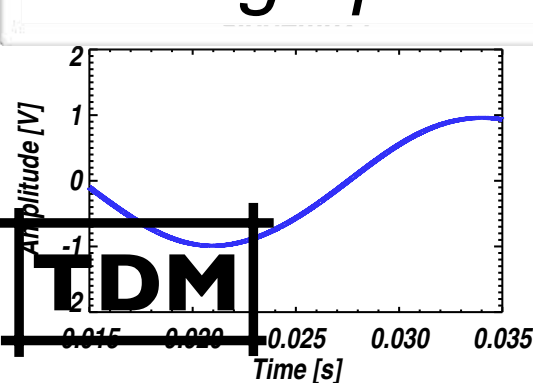


Signaux démultiplexés (échantillonnés)

sample & hold



filtrage passe bas



TDM

Multiplexage Temporel

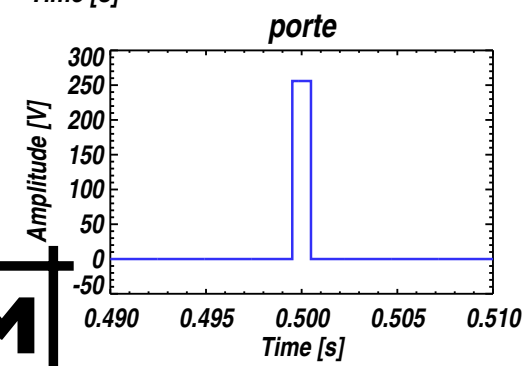
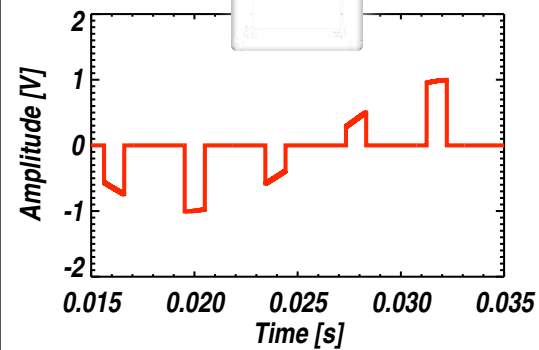
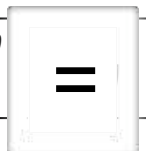
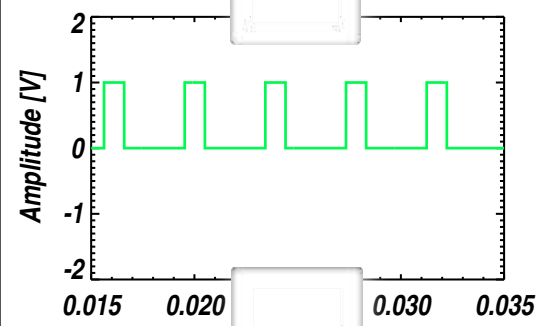
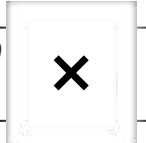
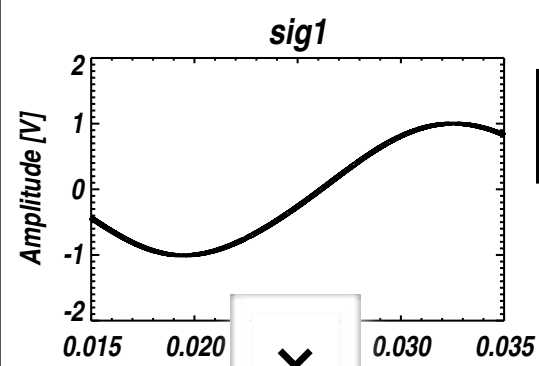
- Echantillonnage : modulation d'amplitude impulsionnelle
- Filtrage
- Sample & hold
- Switch (Adressage)



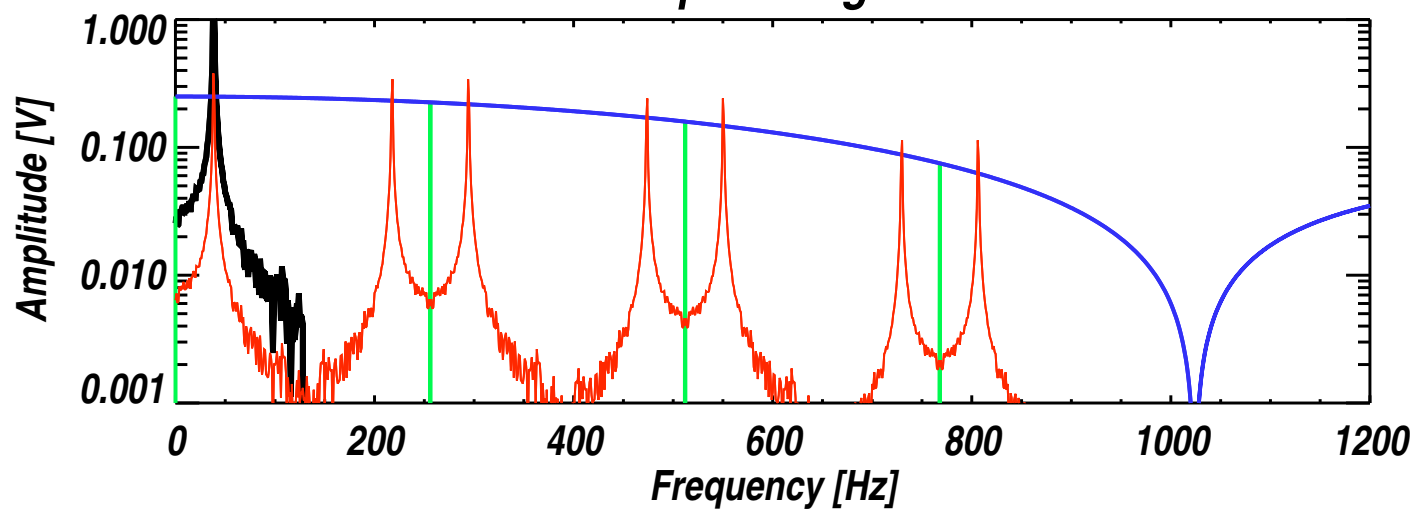
Echantillonnage temporel

- Modulation d'amplitude impulsionnelle

Le spectre d'un tel échantillonnage est le produit de la périodisation par $1/T$ du spectre du signal échantillonné par une fonction sinus cardinale de largeur $1/\tau$ (avec T la durée entre deux impulsions et τ leur durée).



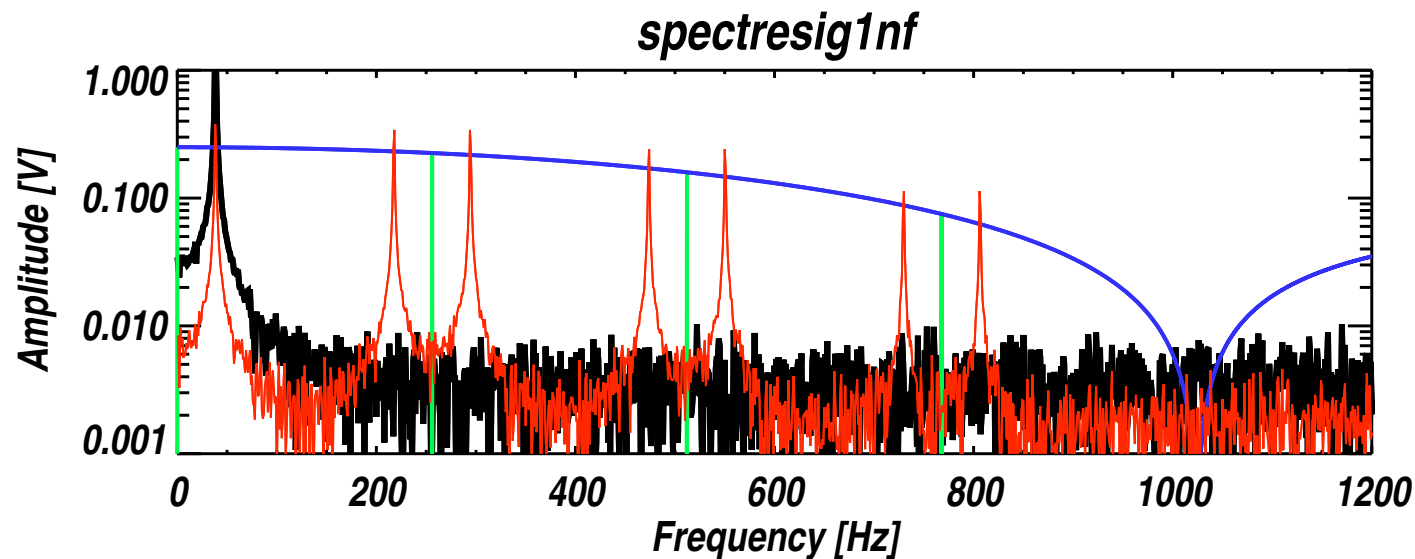
spectresig1



Echantillonnage(2) : Théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon

“la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal.”

Fréquence d'échantillonnage ≥ 2 fréquence max

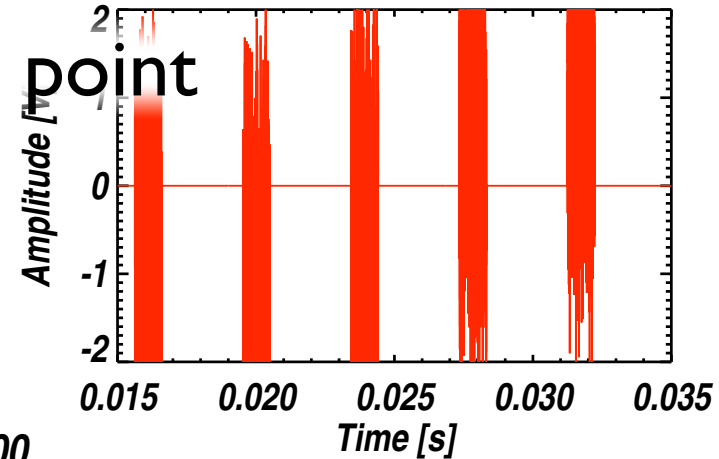
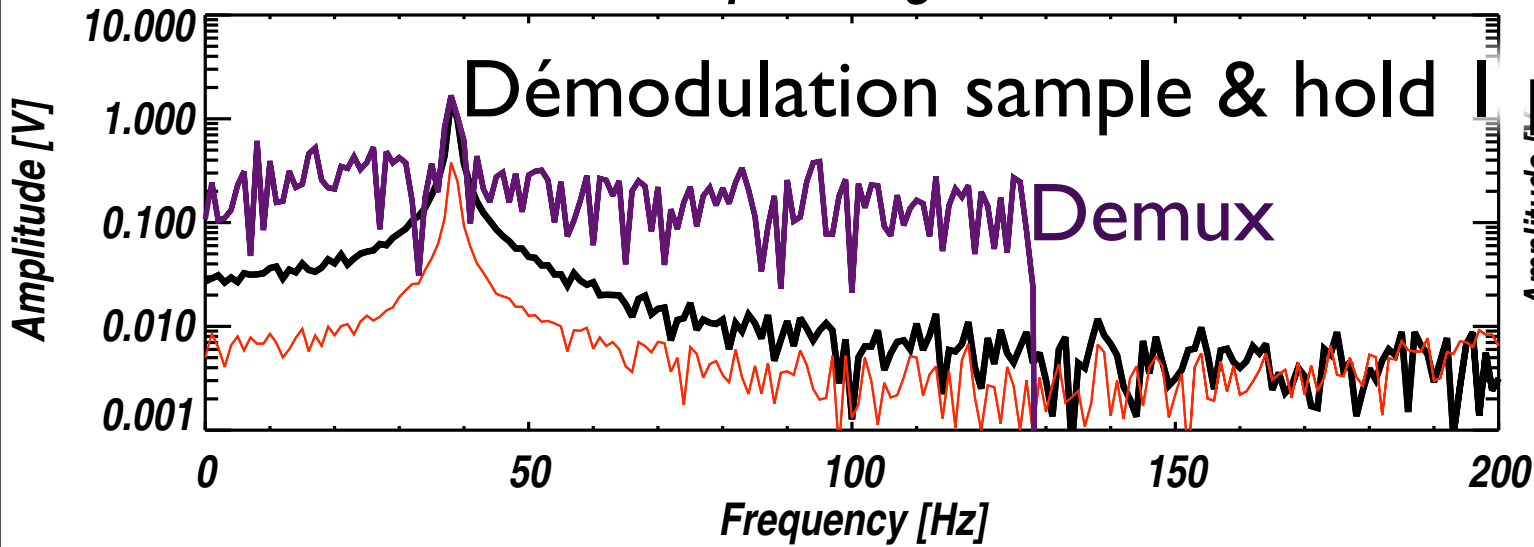


Echantillonnage (3) : Démodulation sans **filtrage**

Bruit en $V_{eff} = \sqrt{(DSP * BW)}$!

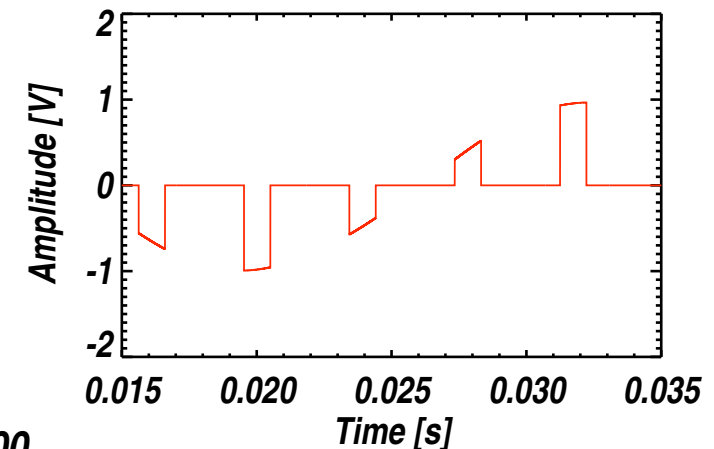
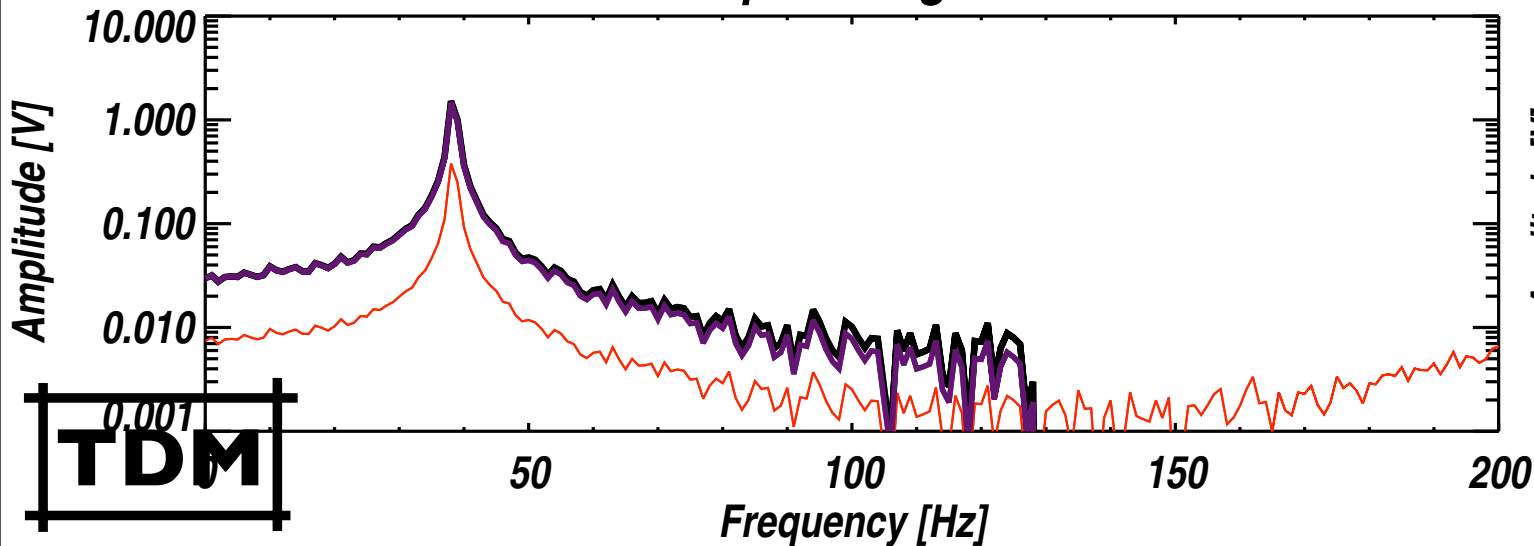
spectresig1nf

Bande de bruit = 1 MHz



spectresig1f

Bande de bruit = 128 Hz

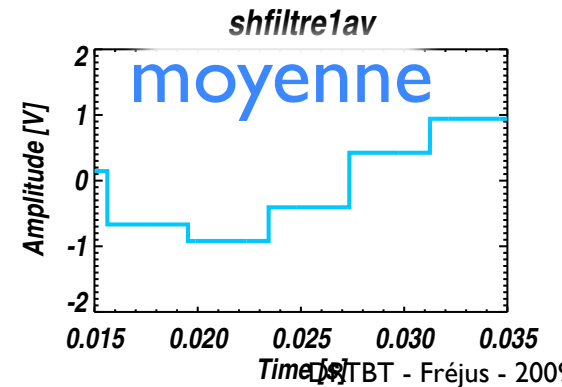
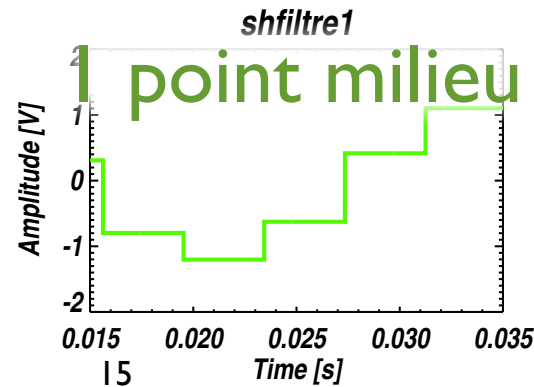
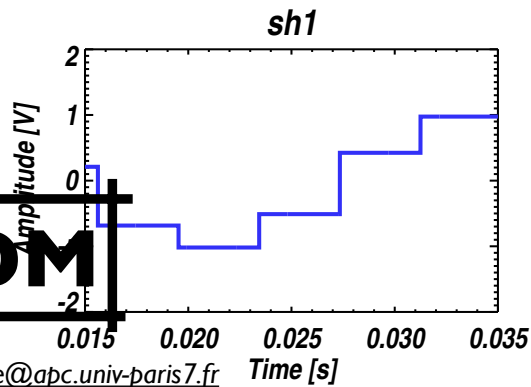
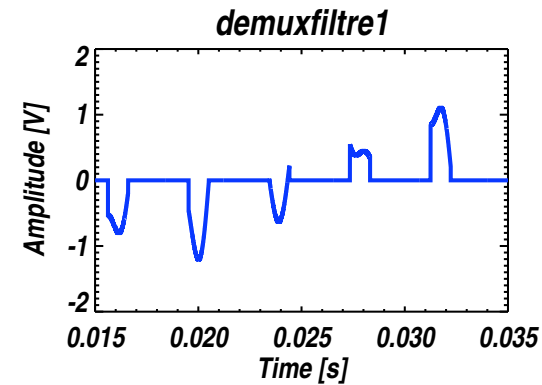
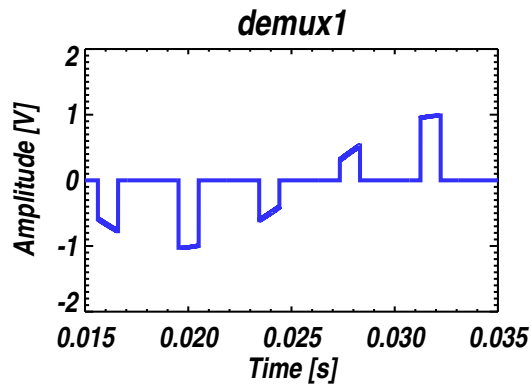
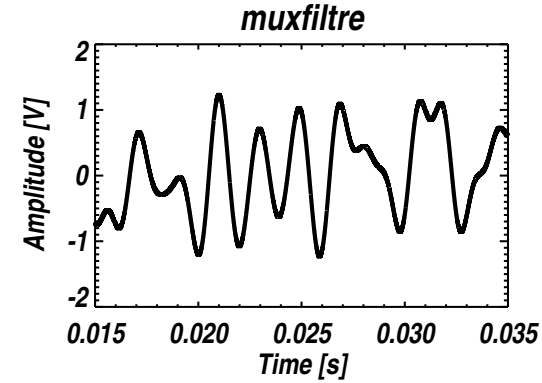
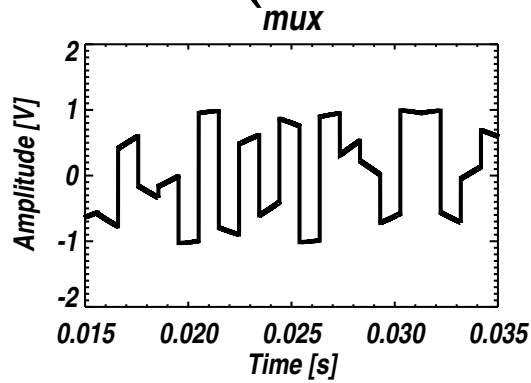


0.001
TDM

Sample & hold

Cas Idéal ($MUX_{BW} = \infty$)

Cas réel (BW finie)

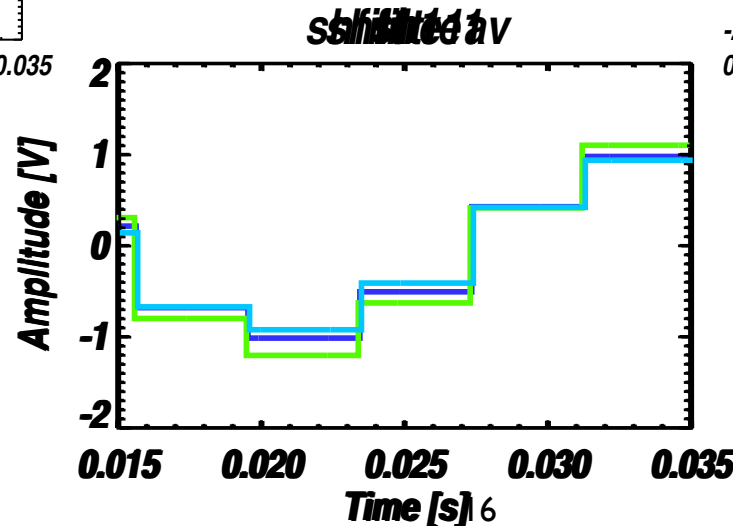
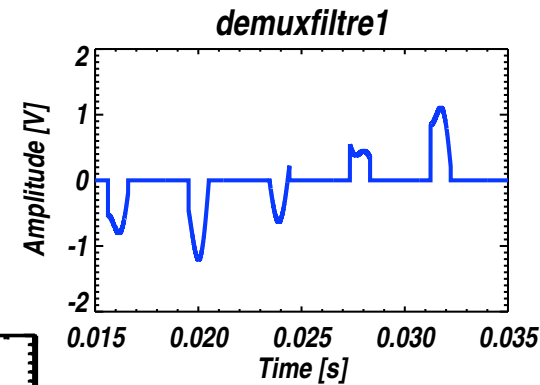
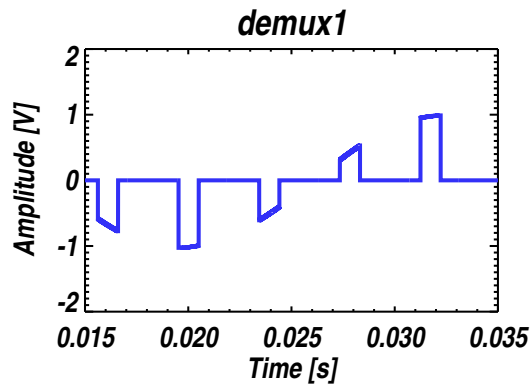
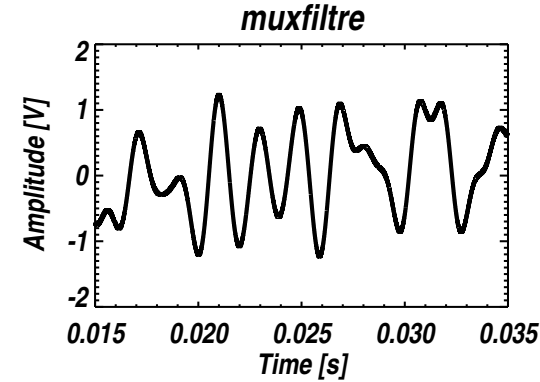
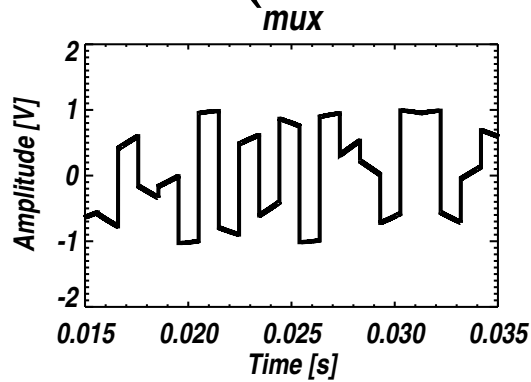


TDM

Sample & hold

Cas Idéal ($MUX_{BW} = \infty$)

Cas réel (BW finie)



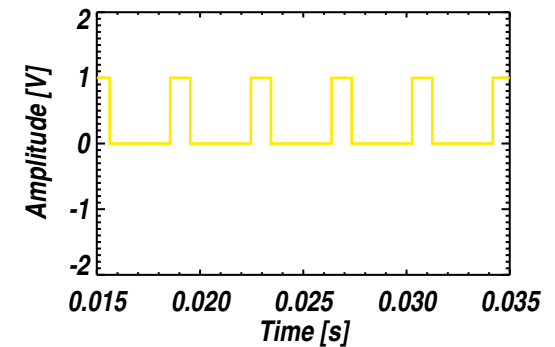
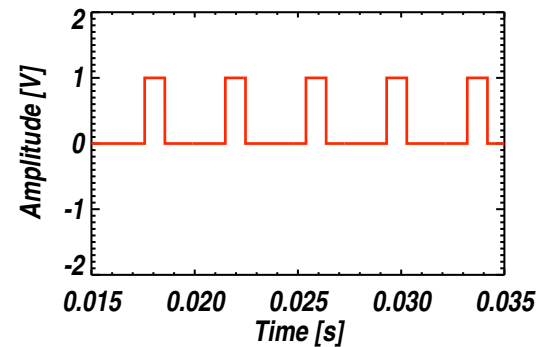
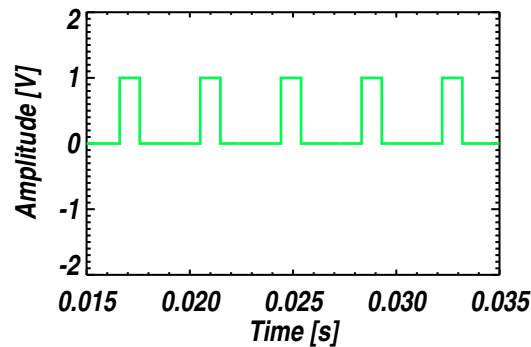
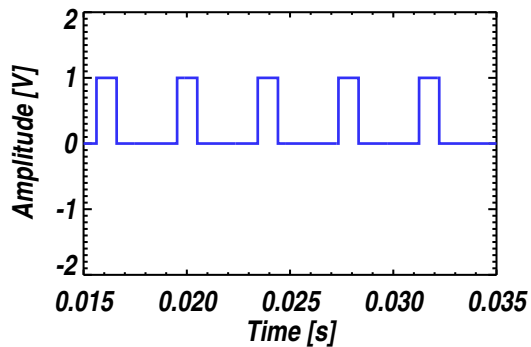
Ideal

Moyenne

I point milieu



Adressage (switch)



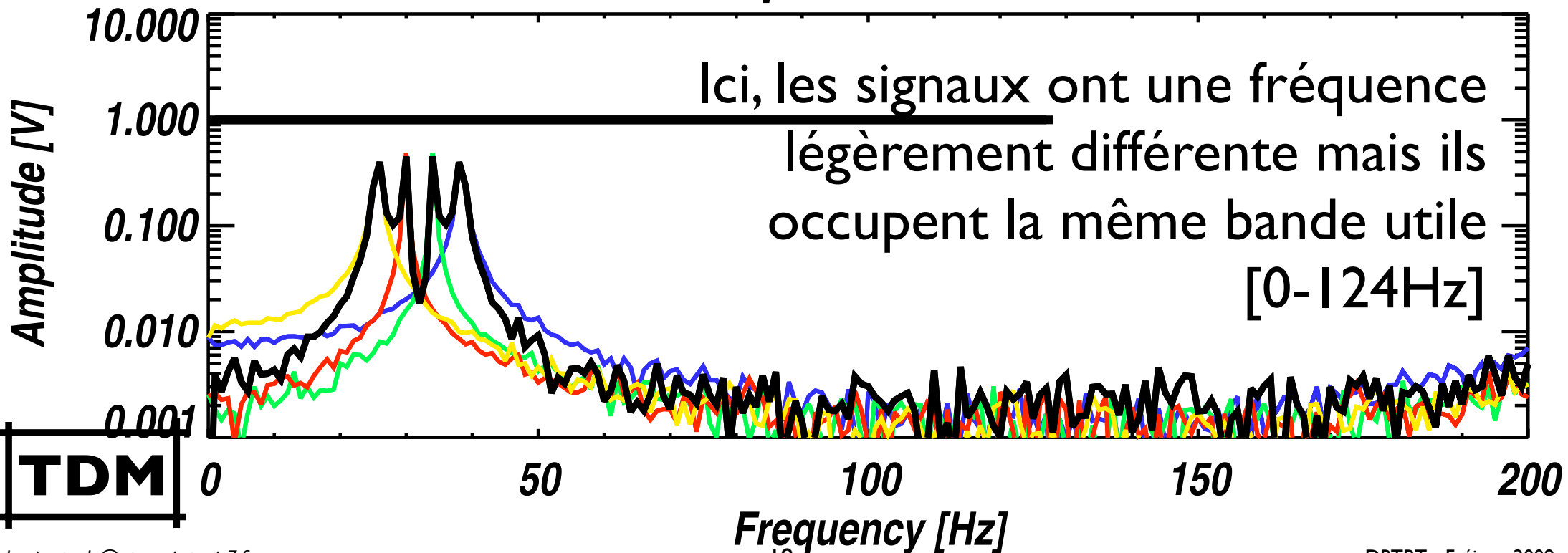
- Le multiplexage temporel nécessite N adressages différents
 - Via N switches
 - Adressage à froid pour réduire le nombre de fils



Spectre du signal composite

*Les signaux sont mélangés “spectralement” dans le domaine fréquentiel.
Seule la synchronisation (adressage) temporel permet de démultiplexer*

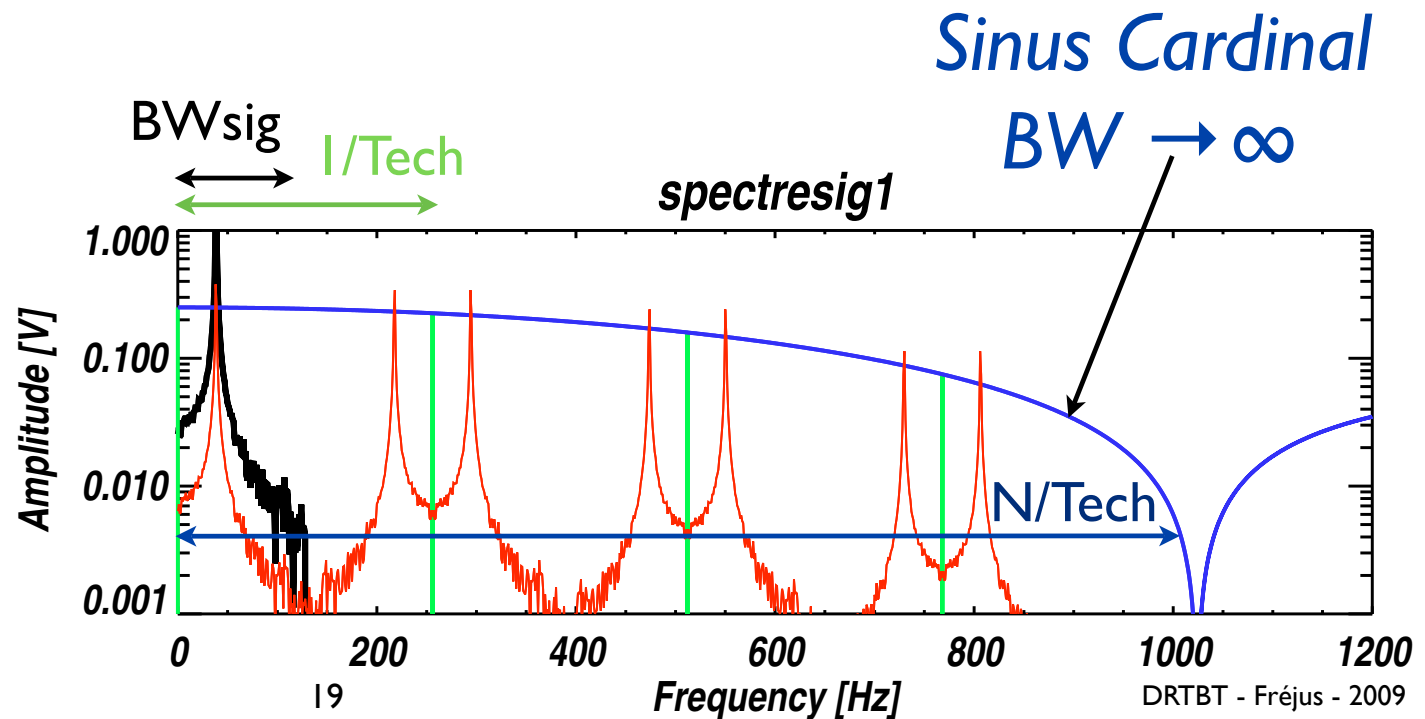
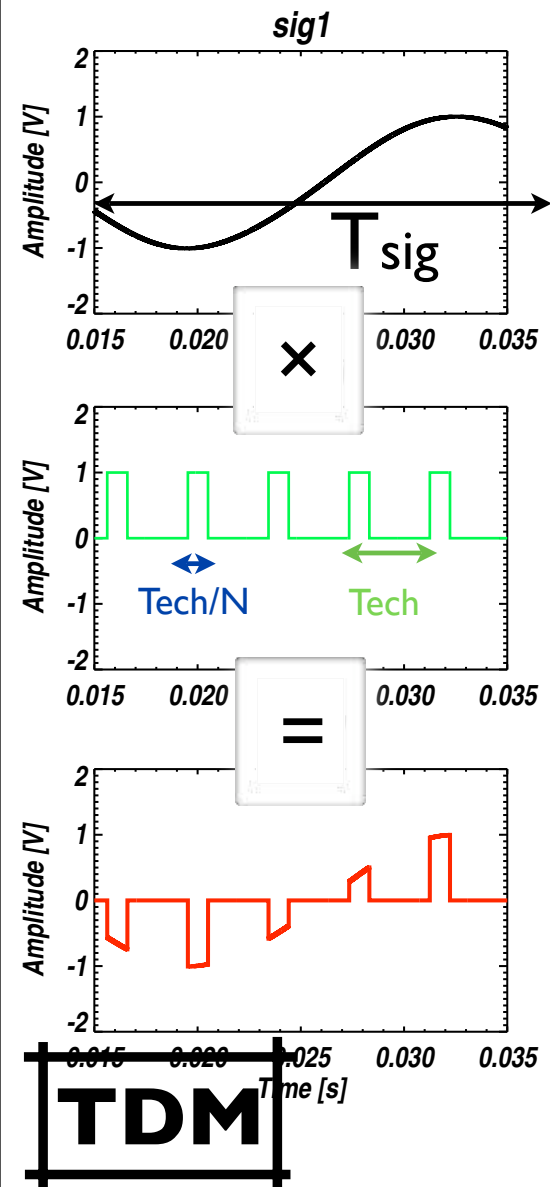
spectremux



Bande Passante (BW) d'un N/1 Multiplexeur Temporel

- Shannon : $I/T_{\text{sig}} > 2 \times BW_{\text{sig}}$
- $BW_{\text{TDM}} > N/T_{\text{Tech}}$

$$BW_{\text{TDM}} \propto 2N \times BW_{\text{sig}}$$

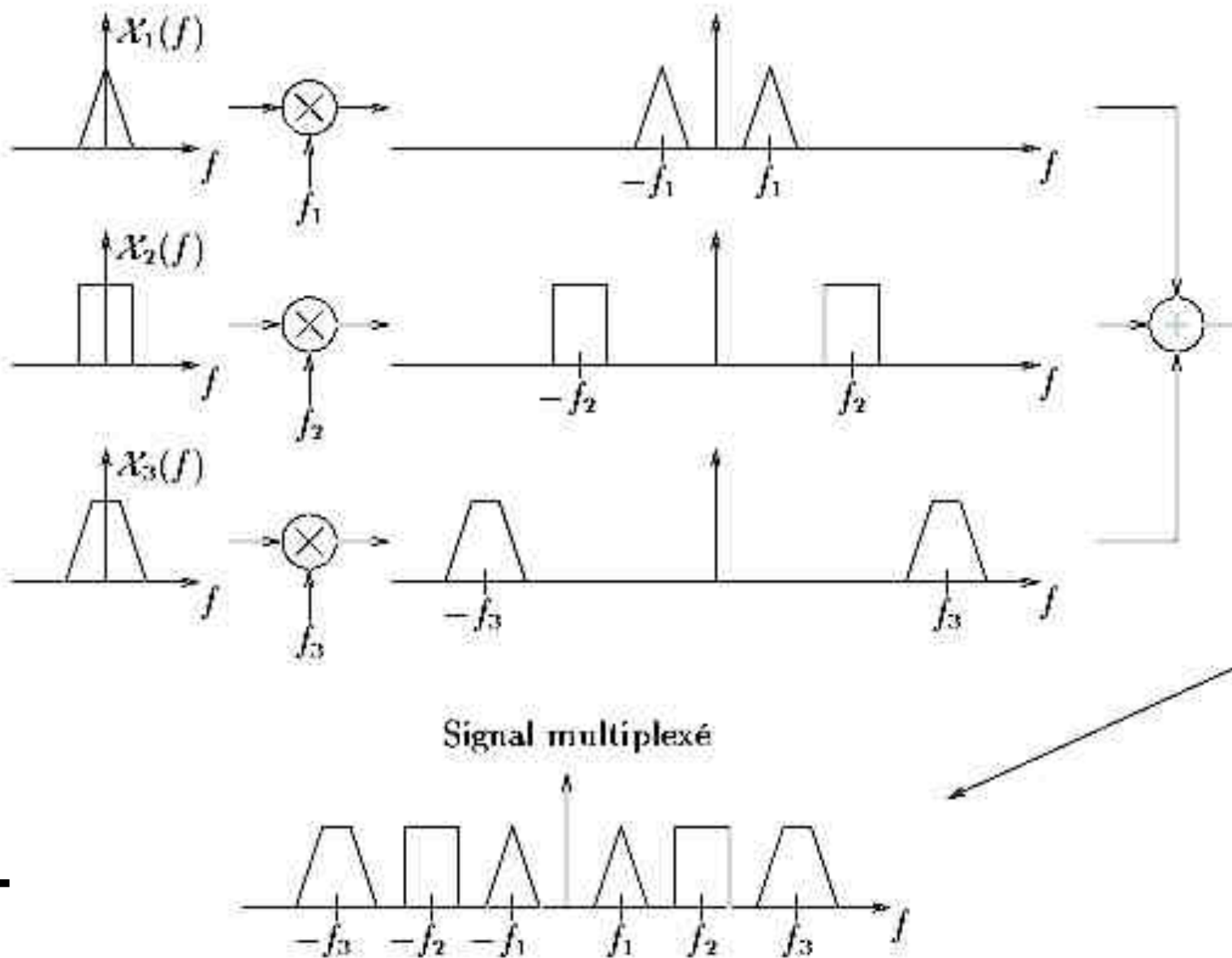


Multiplexage fréquentiel

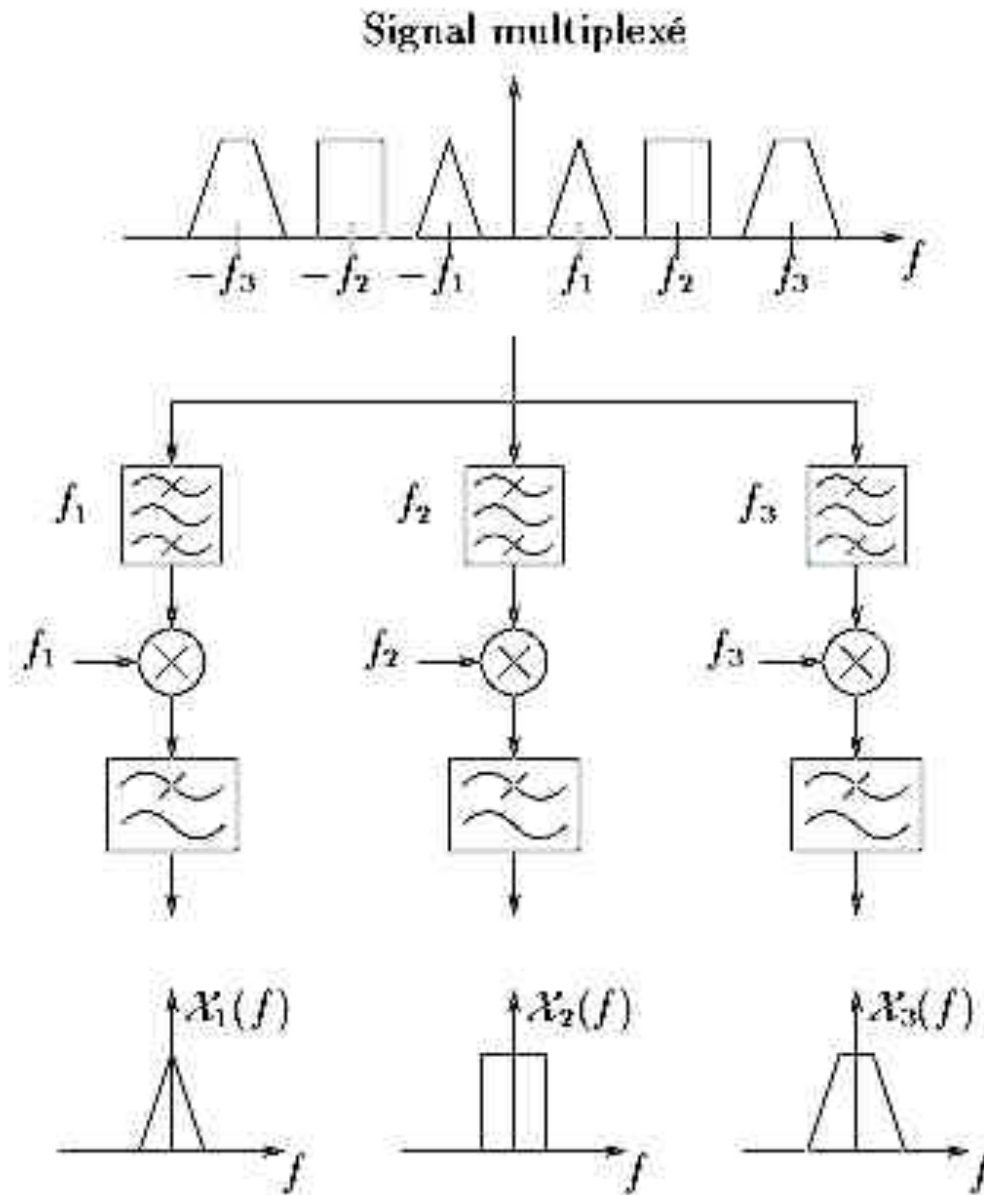
Frequency-Division Multiplexing FDM



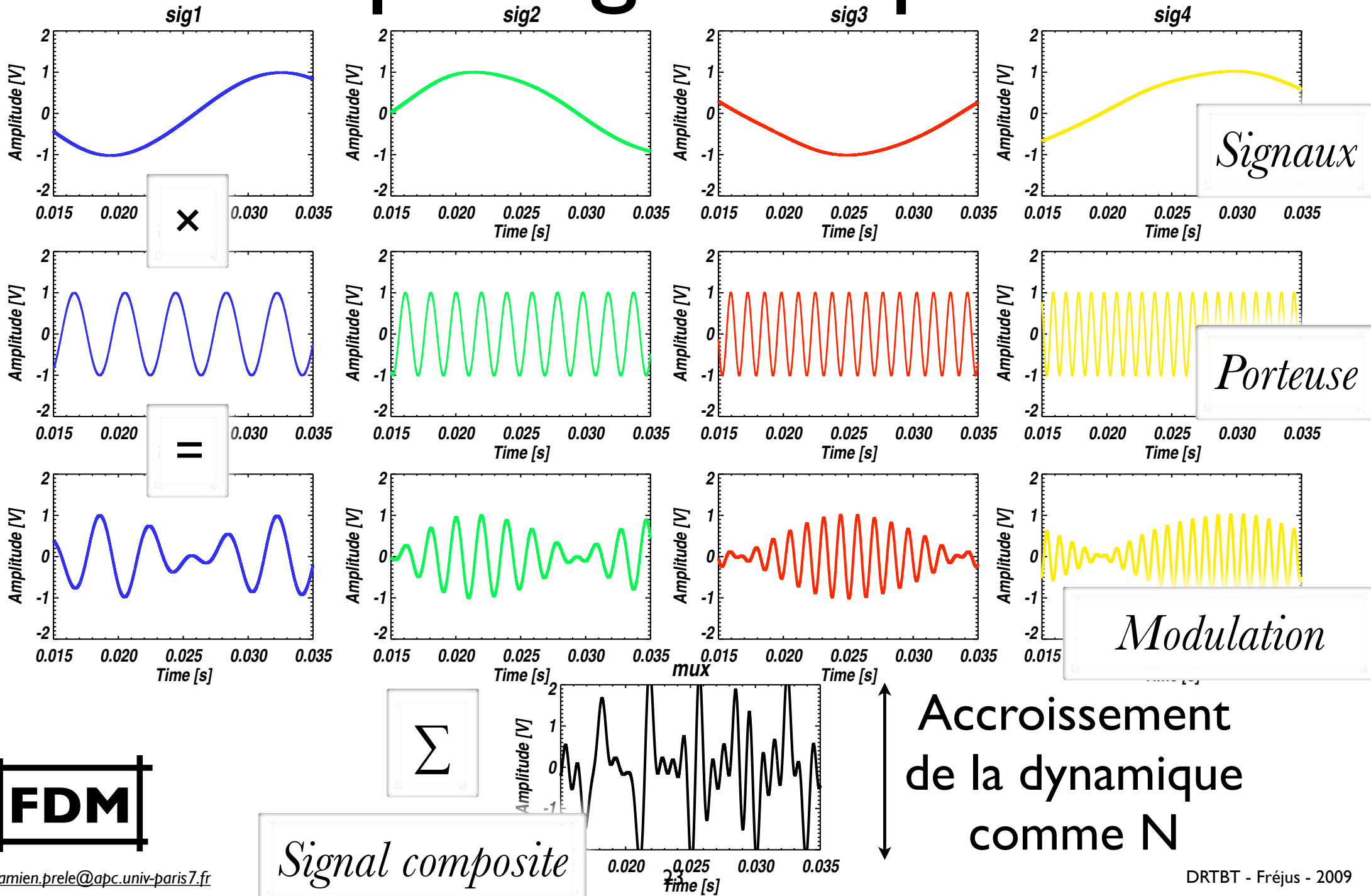
Multiplexage Fréquentiel



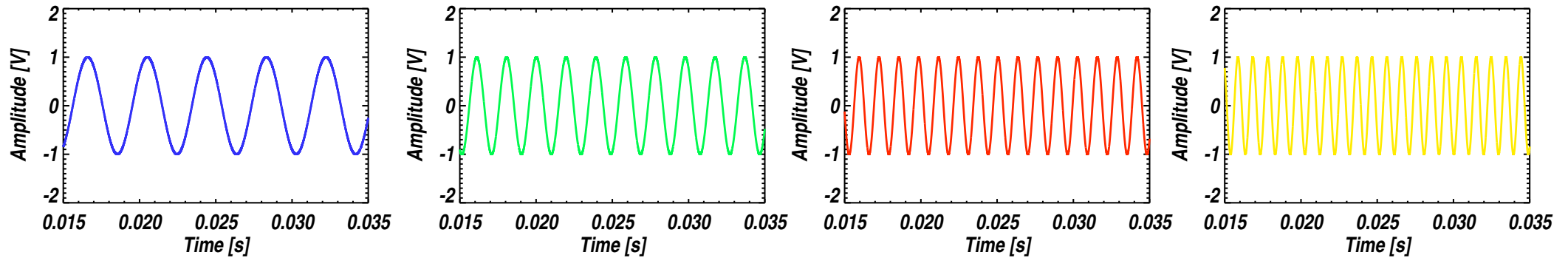
Demultiplexage Fréquentiel



Multiplexage Fréquentiel



Adressage



- Le multiplexage fréquentiel nécessite N fréquences porteuses différentes
- Somme des n porteuses en un signal. **pb** : N filtrages passe bande différents (maîtrise de N fréquences de coupure différentes à température cryogénique ?!). Dynamique $\times N$!
- Bruit blanc. **pb** : faiblesse de l'amplitude d'une porteuse

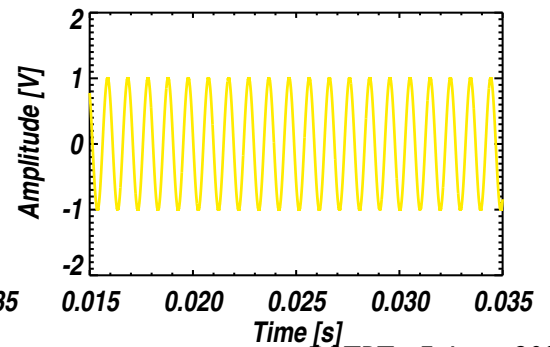
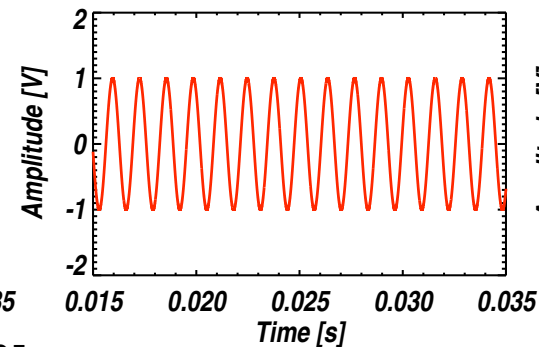
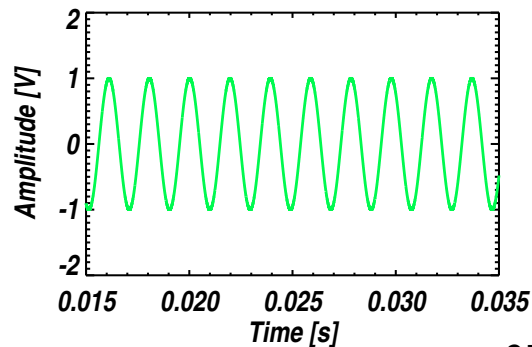
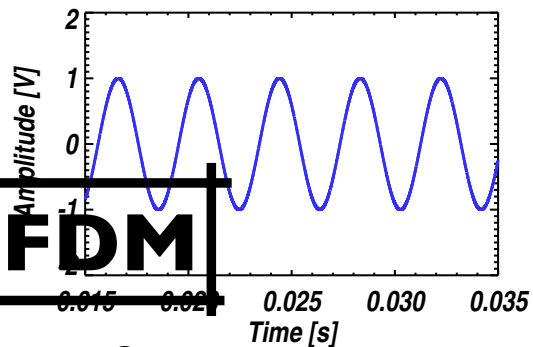
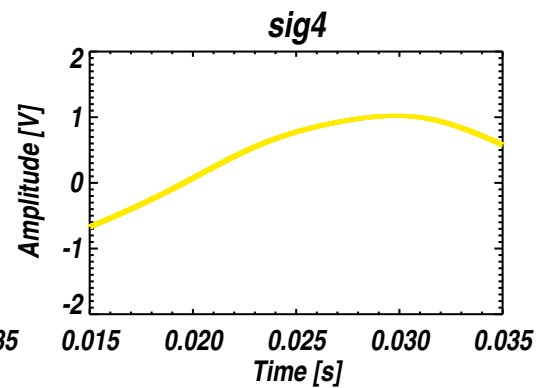
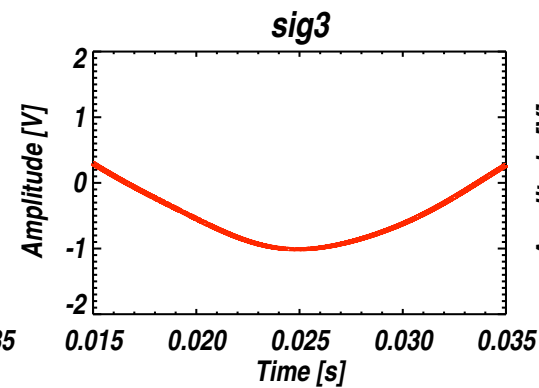
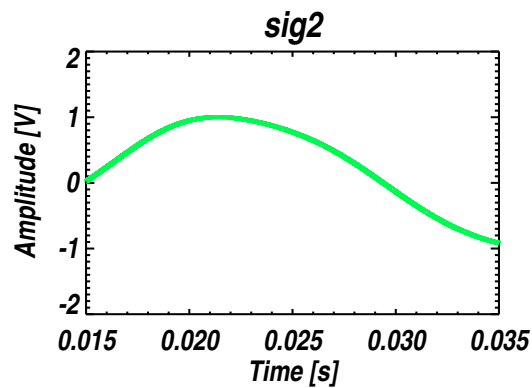
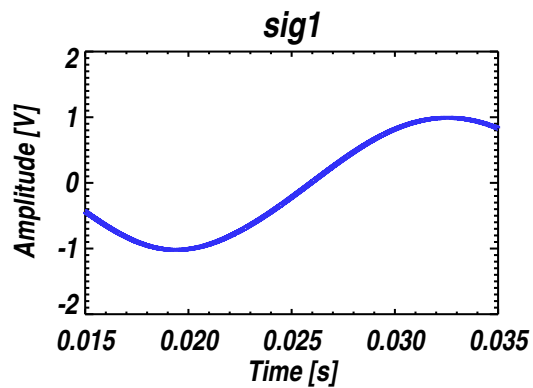


Sweep. **Pb** ? : revient à un multiplexage temporel

Modulation :

la fréquence de “modulation” d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal.

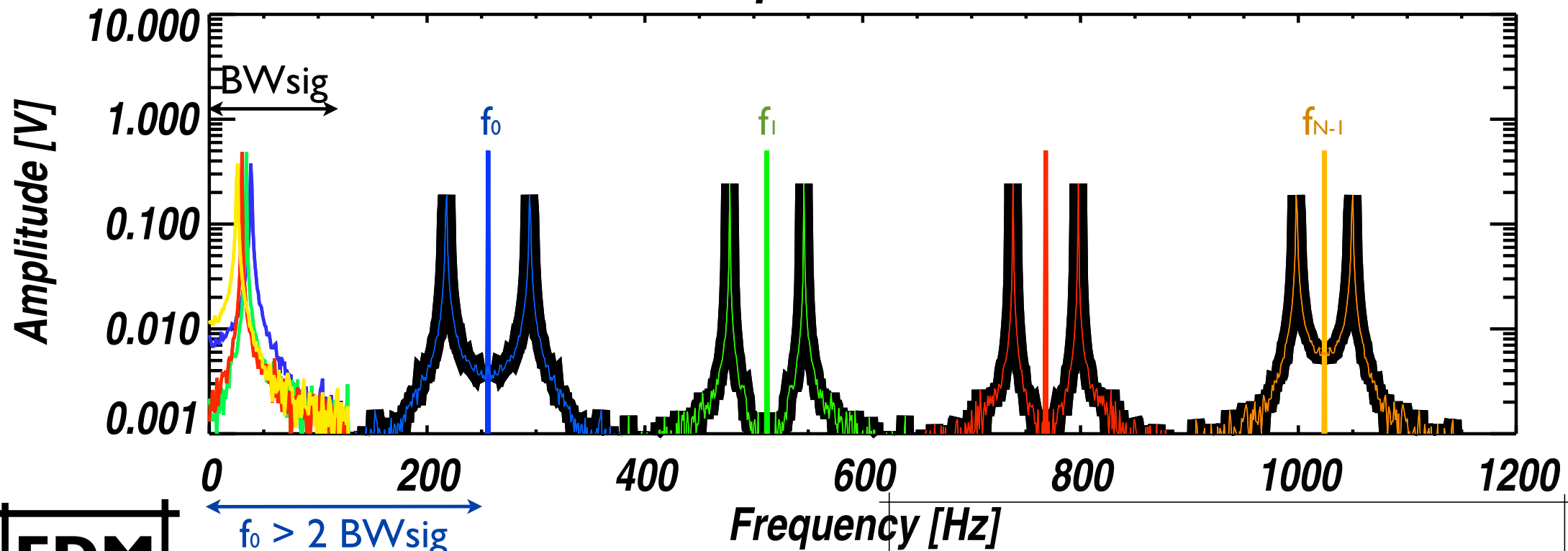
Fréquence de modulation $\geq 2 \times$ fréquence max



Spectre du signal composite

la fréquence de “modulation” doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans le signal pour éviter l’Aliasing.

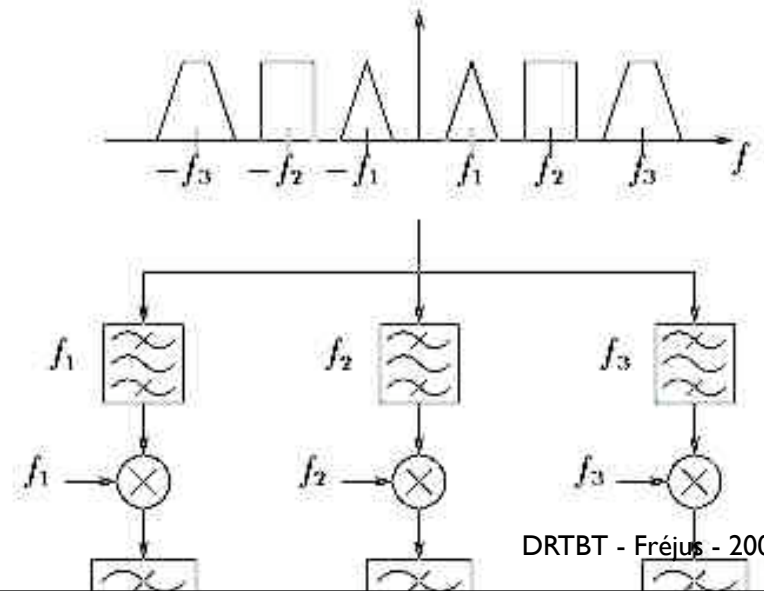
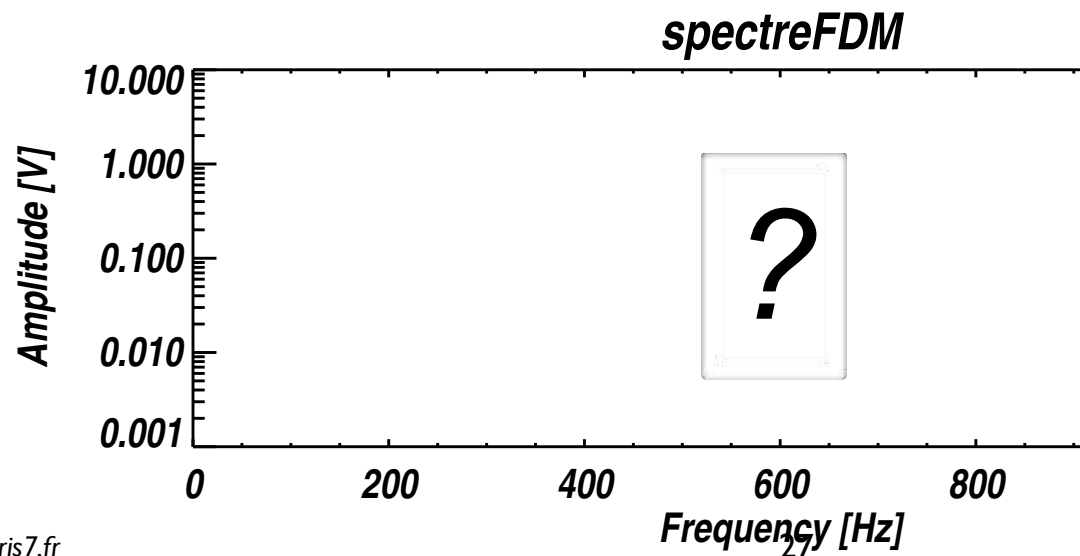
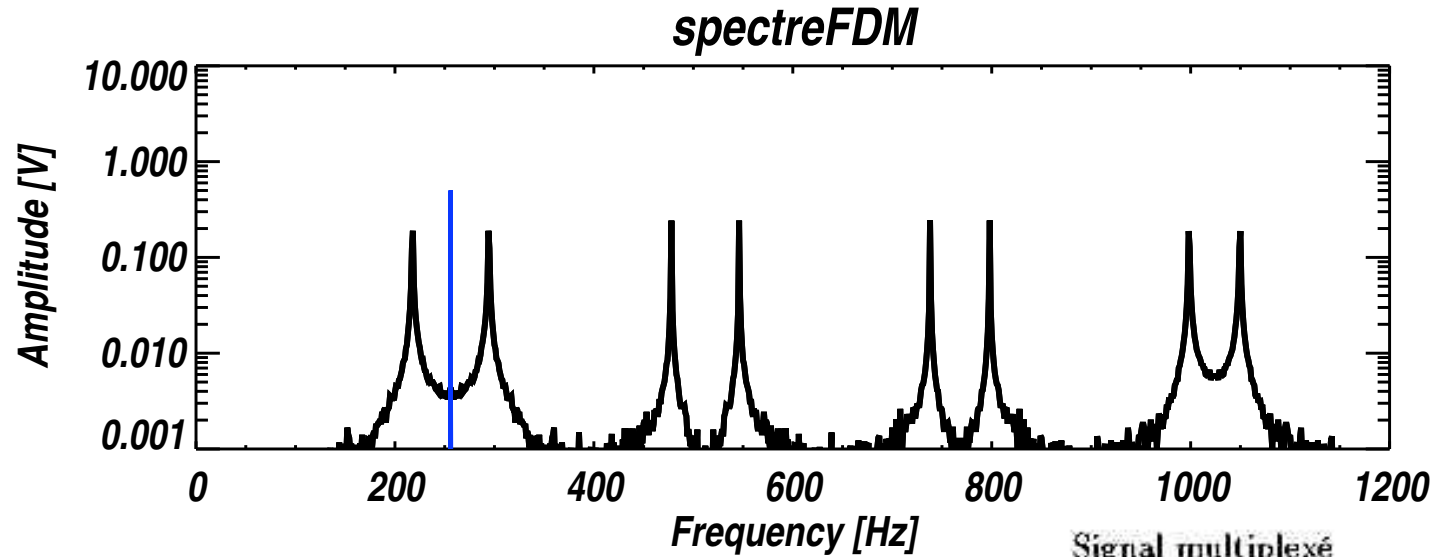
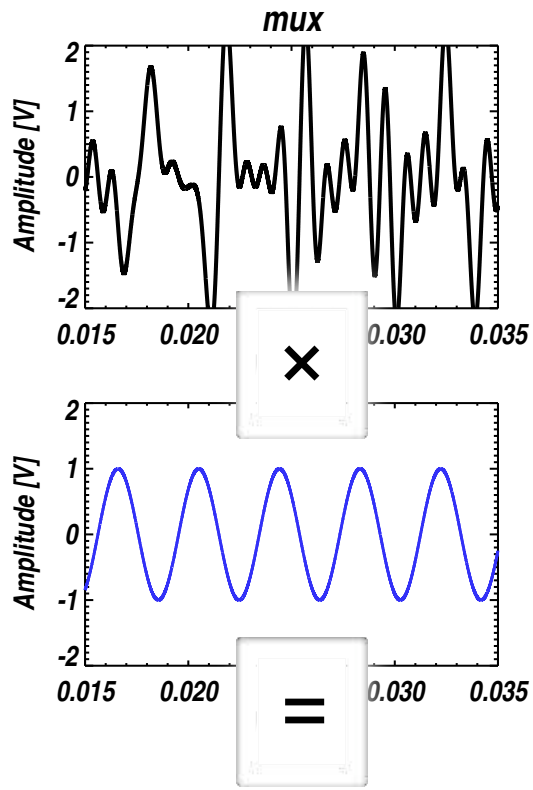
Fréquence de modulation $\geq 2 \times$ fréquence max spectre FDM



FDM

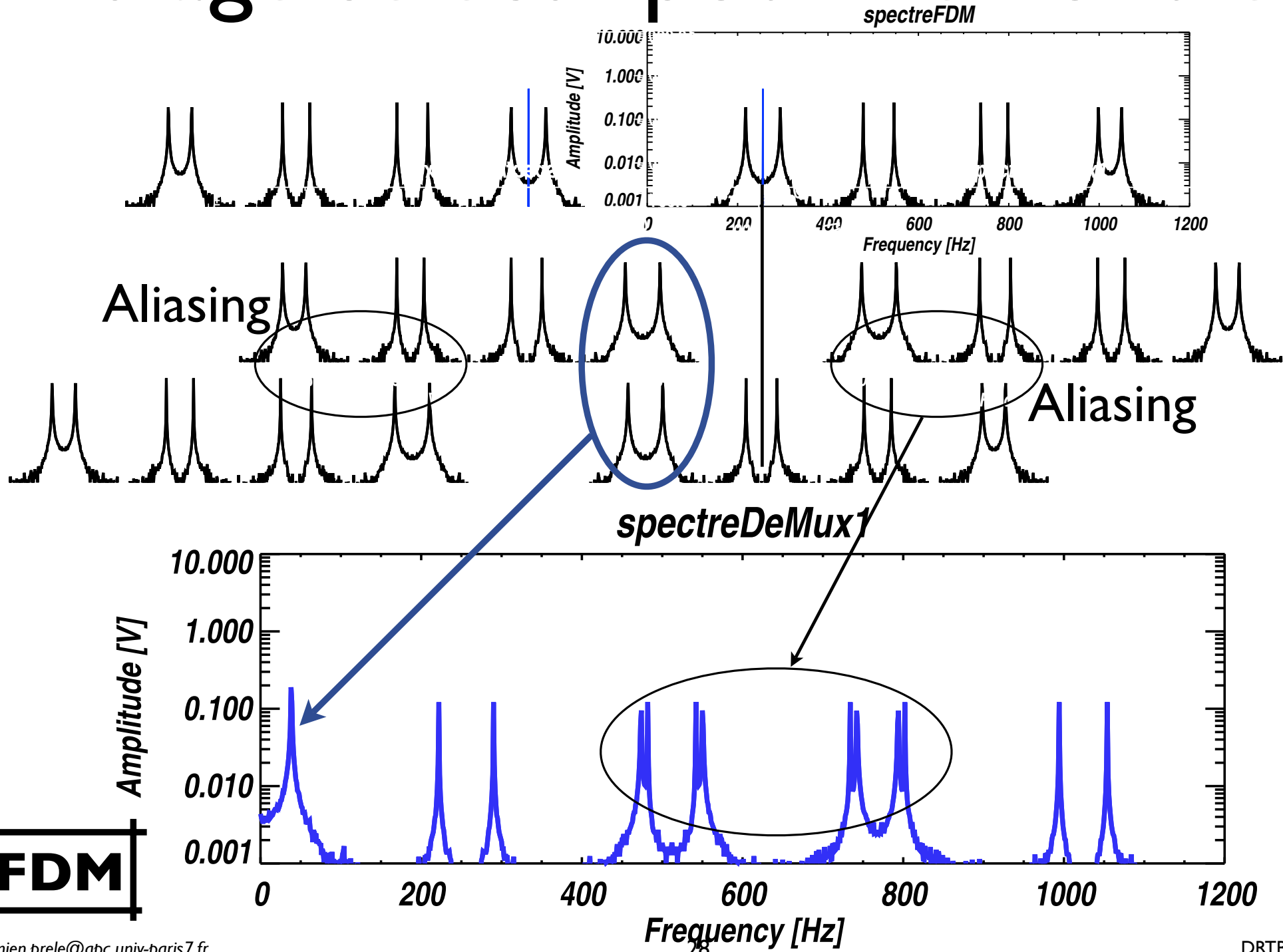
$$\text{BW}_{\text{FDM}} \propto 2N \times \text{BW}_{\text{sig}}$$

Filtrage sélectif pour démoduler ?



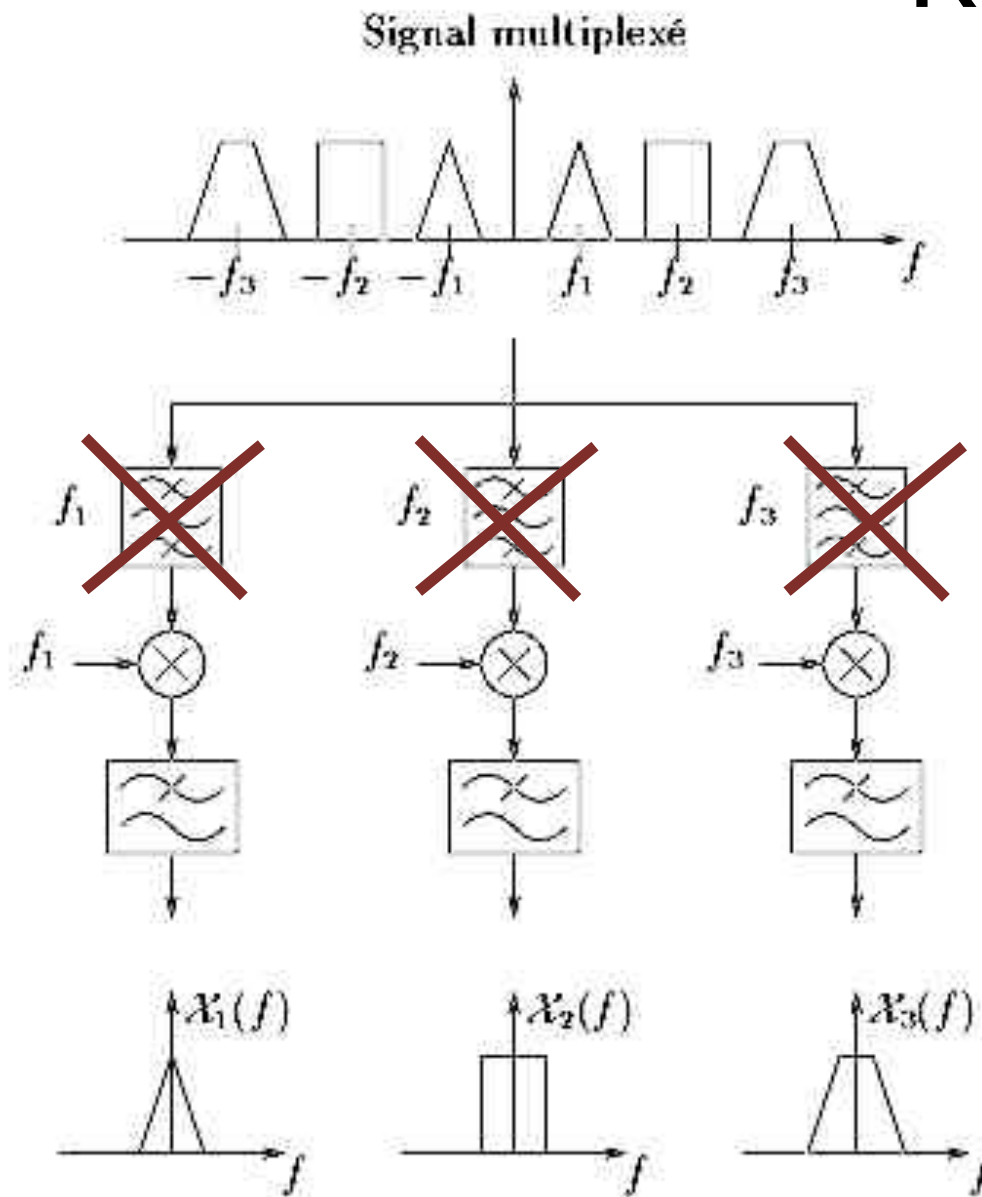
FDM

Filtrage sélectif pour démoduler ?

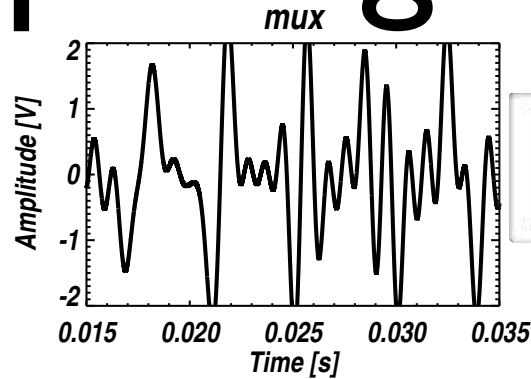


Filtrage sélectif pour démoduler ?

Réponse : **Non**

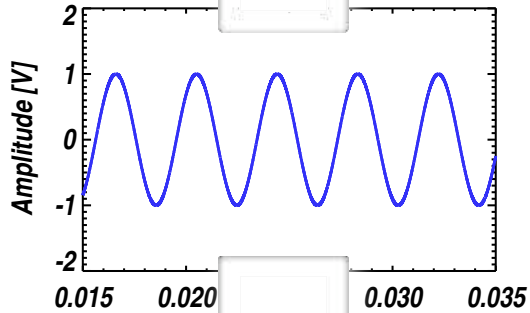


Demultiplexage Fréquentiel

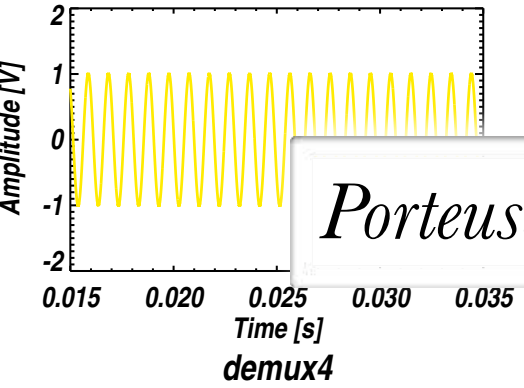
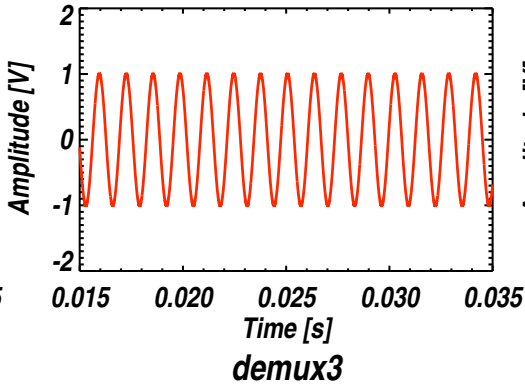
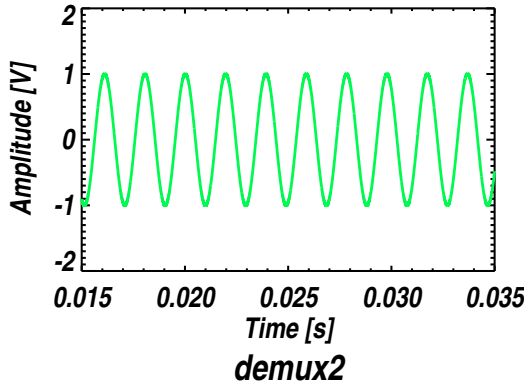


Signal composite

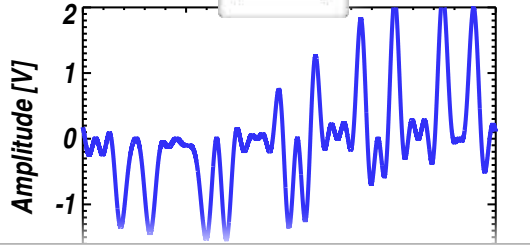
×



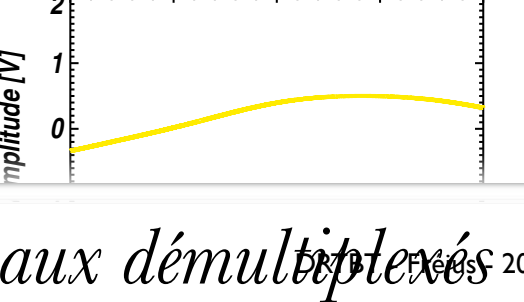
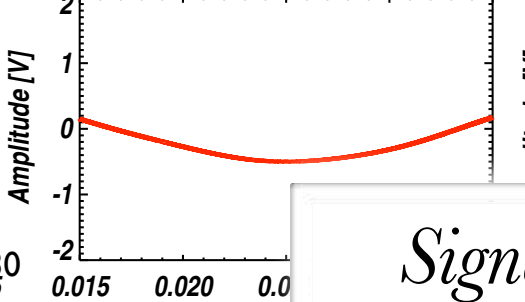
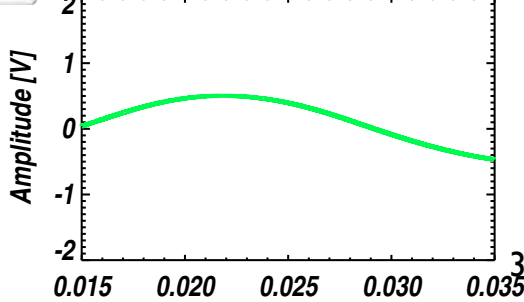
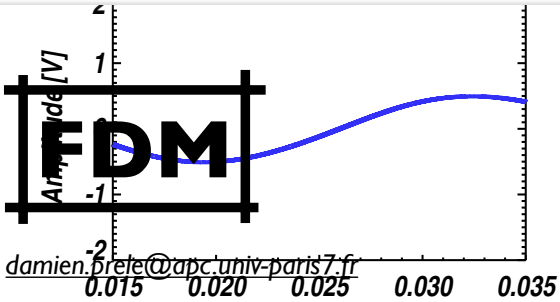
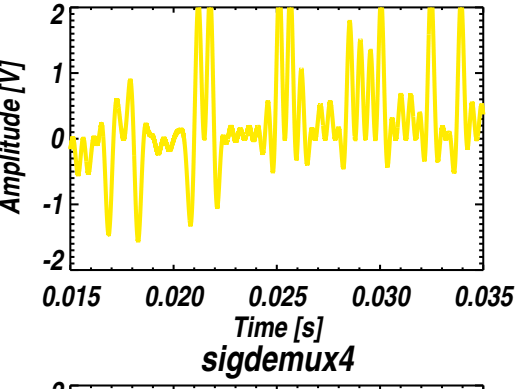
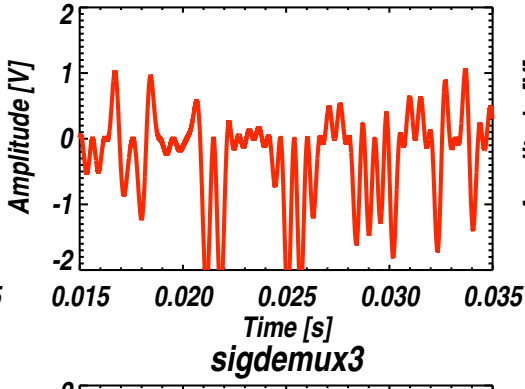
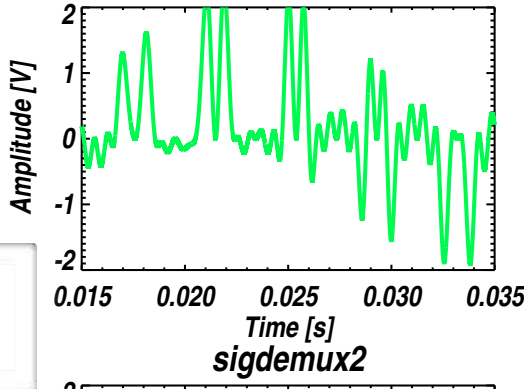
=



Porteuse

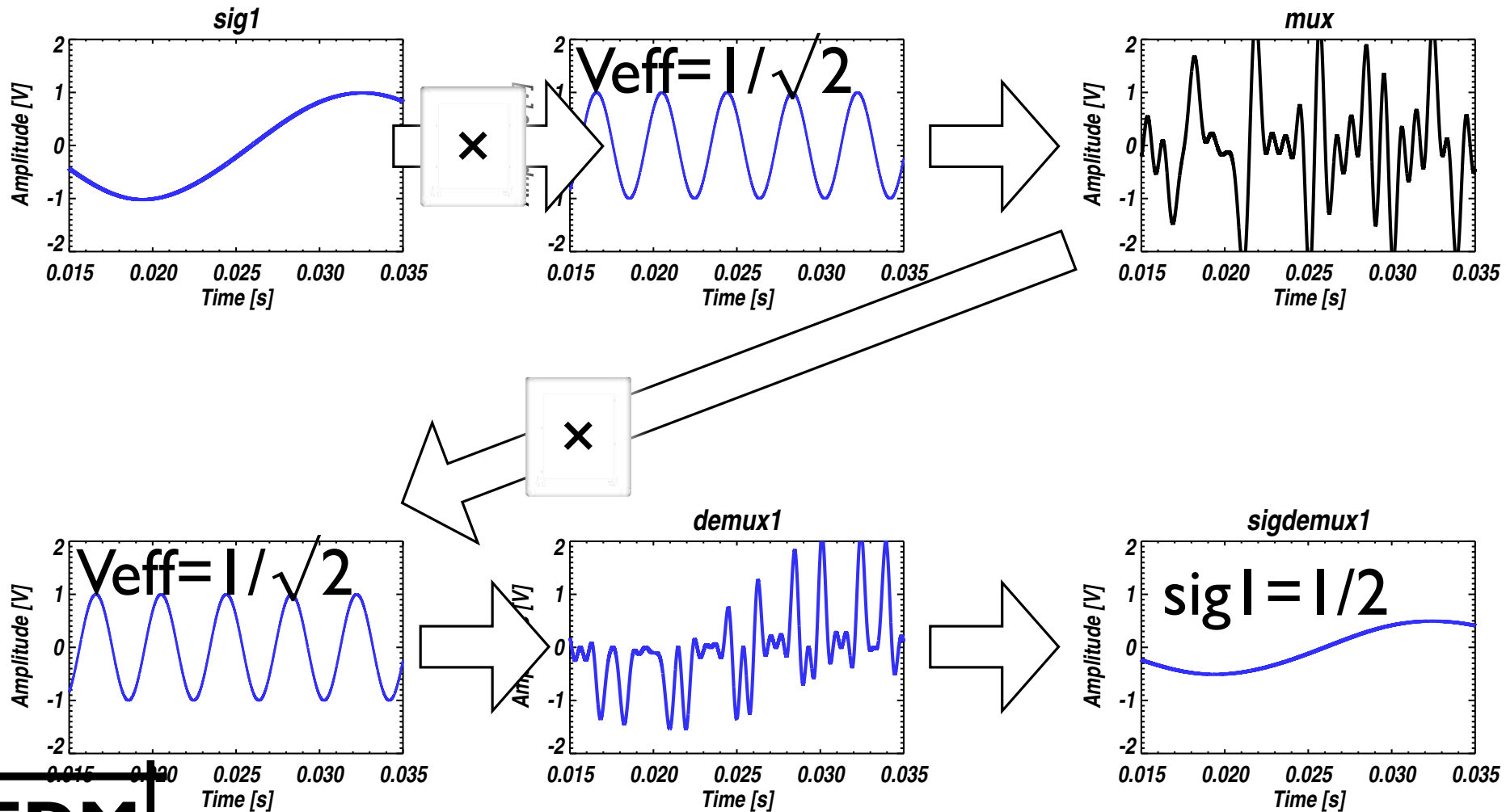


filtrage passe bas

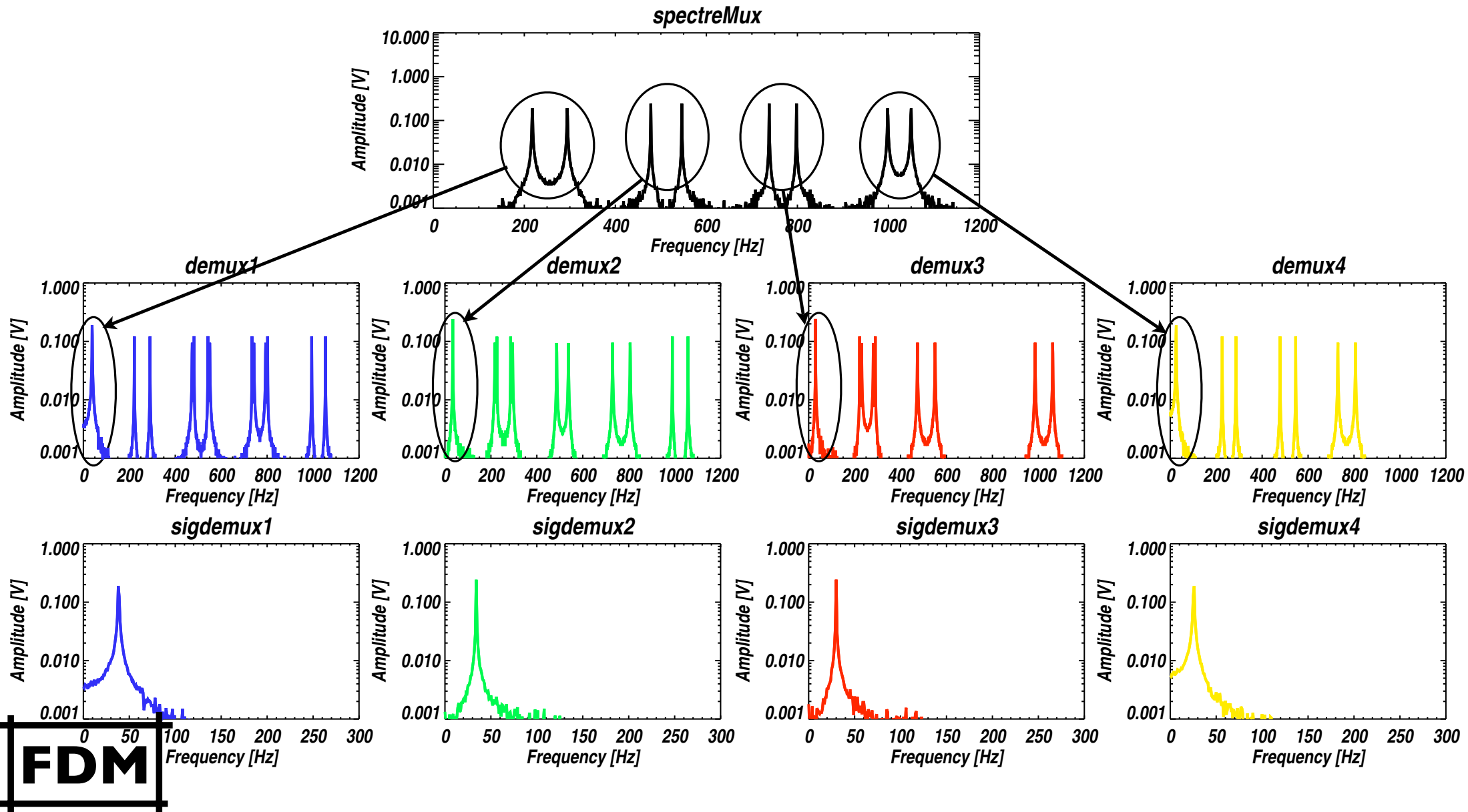


Signaux démultiplexés

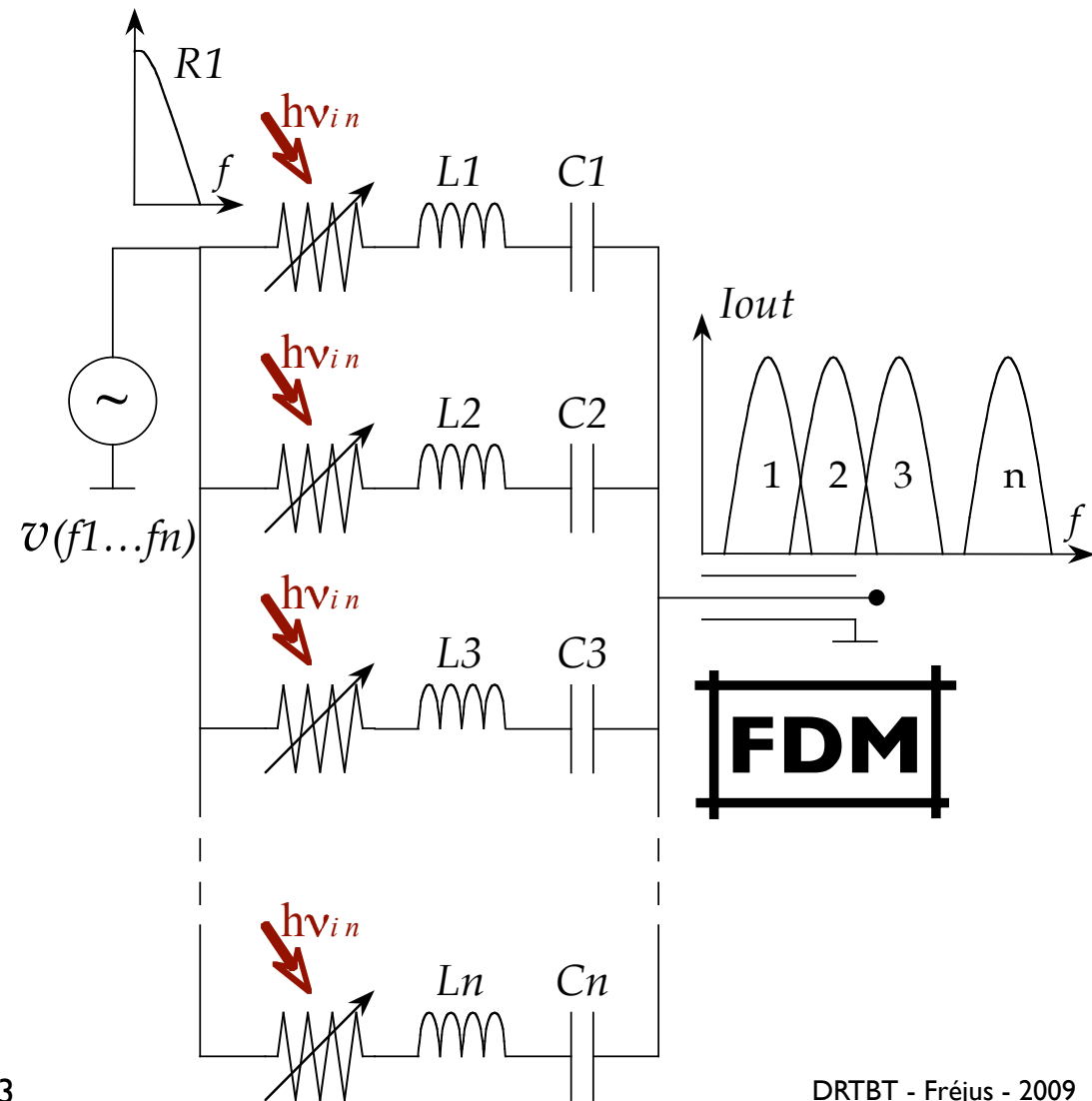
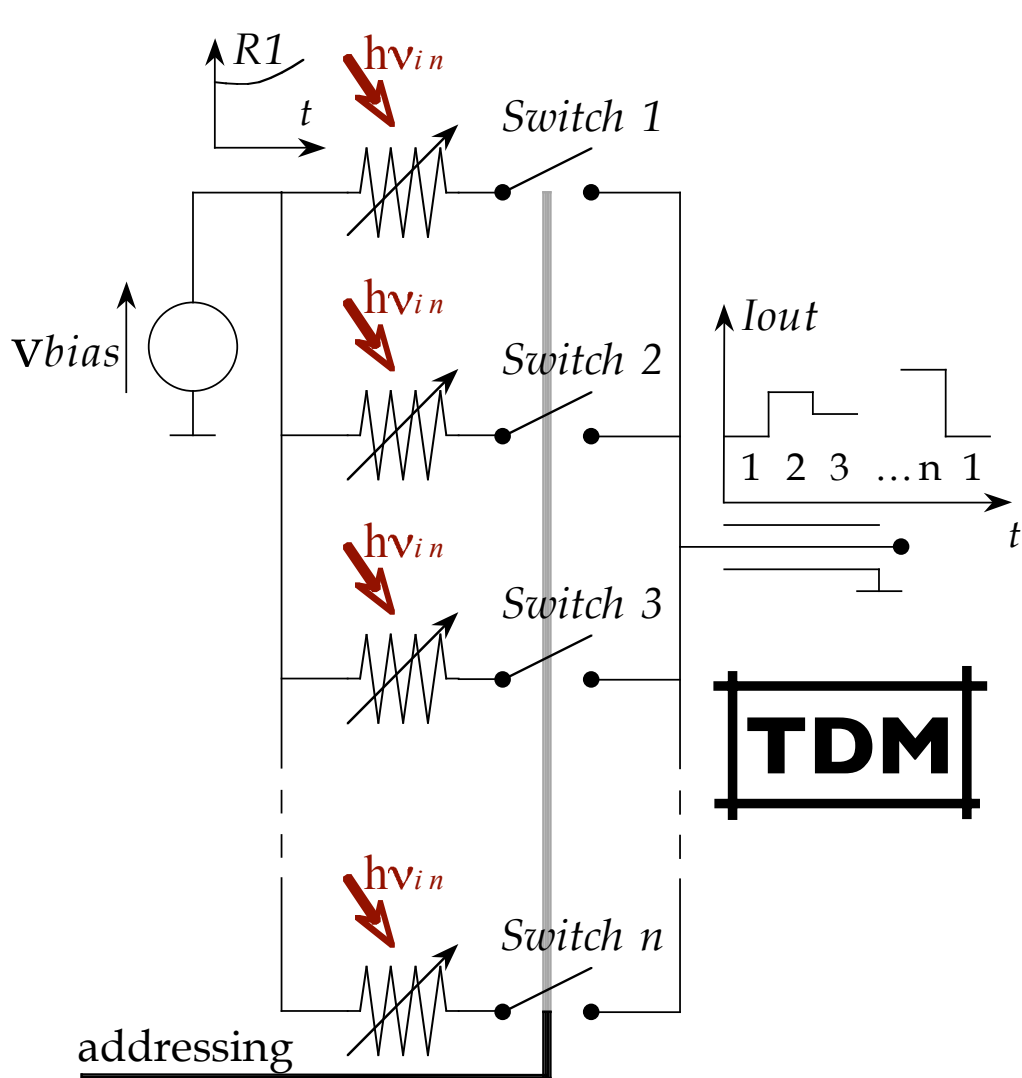
Atténuation du signal démultiplexé ?



Demultiplexage Fréquentiel



Multiplexage de bolomètres



TDM vs FDM

	TDM	FDM
Composants	N switchs / N ampli ?	N filtres LC
Bande passante	2N x	2N x
Dynamique	simple	N x
Consommation	N ampli + adressage	1 ampli
Bruit	I/f et aliasing	pas de I/f

Lock in

Sweep

Transposition fréquentielle

Répartition dans le temps

Comme la FDM

Comme la TDM

Partie 2

SQUID et multiplexage cryogénique appliqué

SQUID et multiplexeur cryogénique

- Fonctionnement à température cryogénique
- Faible bruit (adapté aux détecteurs cryogéniques)
- Faible consommation
- Adapté à la polarisation des bolomètres supraconducteurs (contre réaction électrothermique des TES)



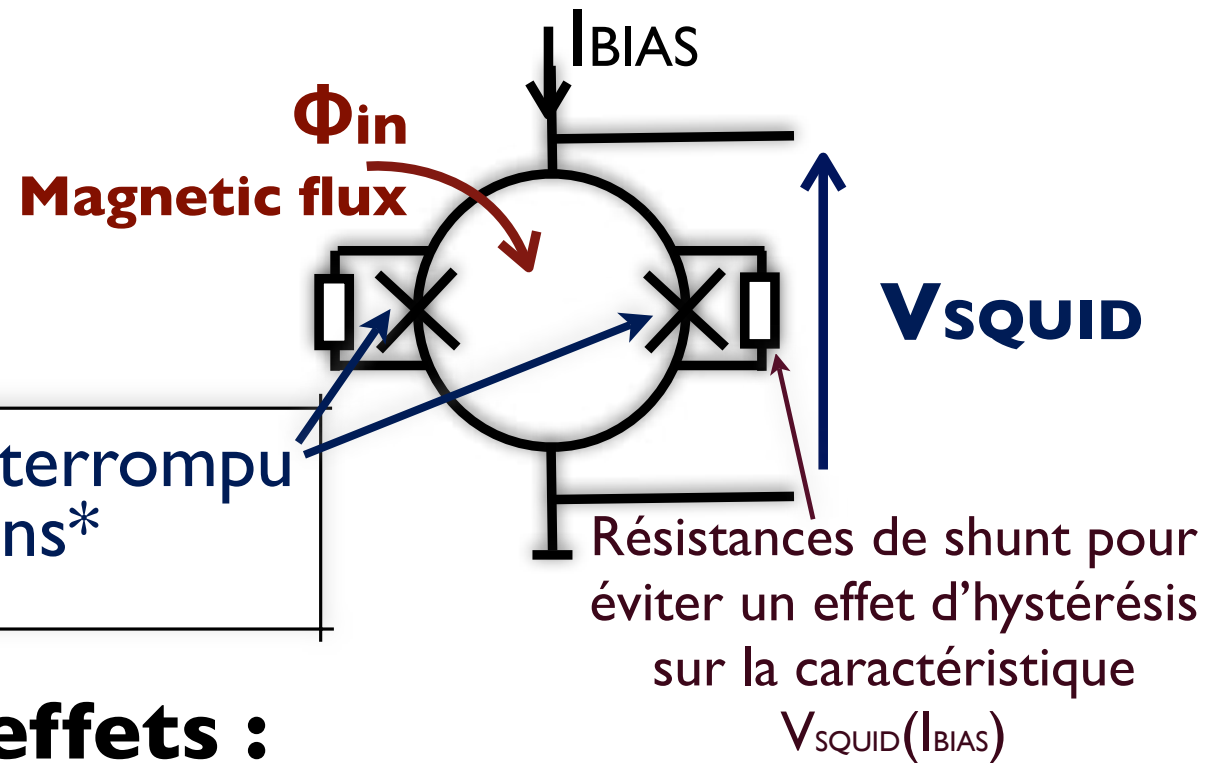
SQUID

Superconducting QUantum Interference Device



SQUID DC

Un anneau supraconducteur interrompu par 2 jonctions Josephson*



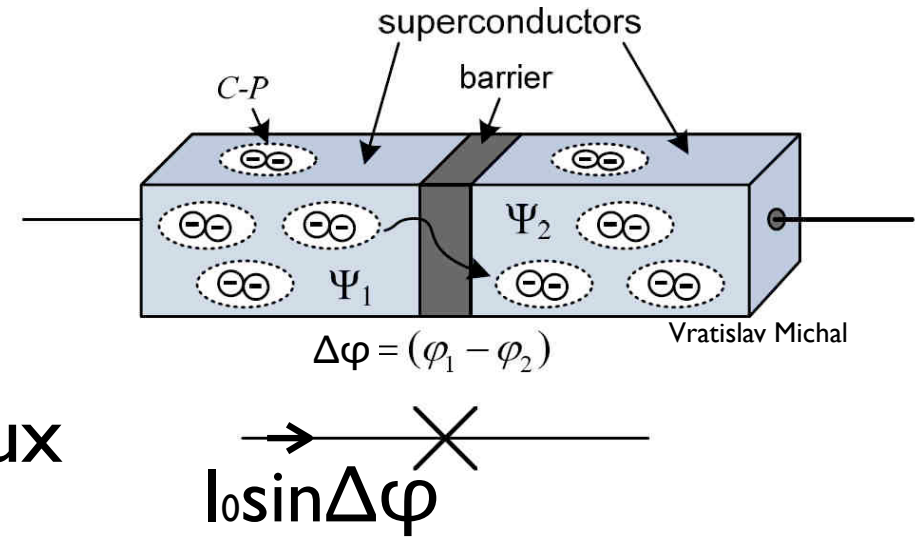
Combinaison de 2 effets :


1. **Effets tunnel dans une jonction Josephson** (I_0)
2. **“quantisation” du flux magnétique** dans une boucle supraconductrice (quantum de flux magnétique $\phi_0 = h/2e \cong 2 \times 10^{-15}$ Wb ou T.m² ou V.s)

SQUID

*supraconducteur séparé par un isolant mince

Jonction Josephson

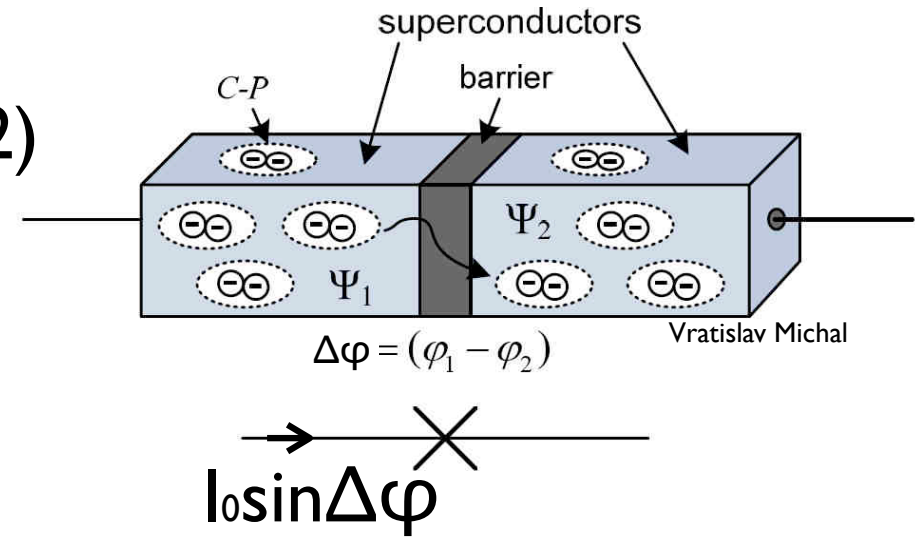
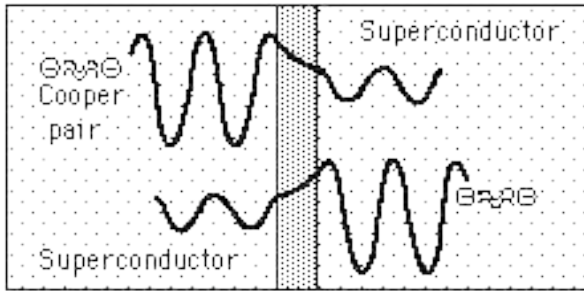


isolant mince (~ 10 nm ) entre deux matériaux supraconducteur (SIS)

- Les paires de Cooper sont capable de passer à travers la jonction Josephson par **effets tunnel** tout en gardant une cohérence de phase
- Modulation de la **différence des phases supraconductrices $\Delta\varphi$** des deux supraconducteurs au franchissement de la barrière en fonction de la polarisation **$I = I_0 \sin \Delta\varphi$**

SQUID

Jonction Josephson (2)



l'équation de mouvement $\frac{h}{2\pi} \frac{d\Delta\varphi}{dt} = 2e \Delta V$

$$\Rightarrow I = I_0 \sin 2\pi (2e/h \Delta V) t$$

$$I = I_0 \sin 2\pi (\Delta V / \Phi_0) t$$

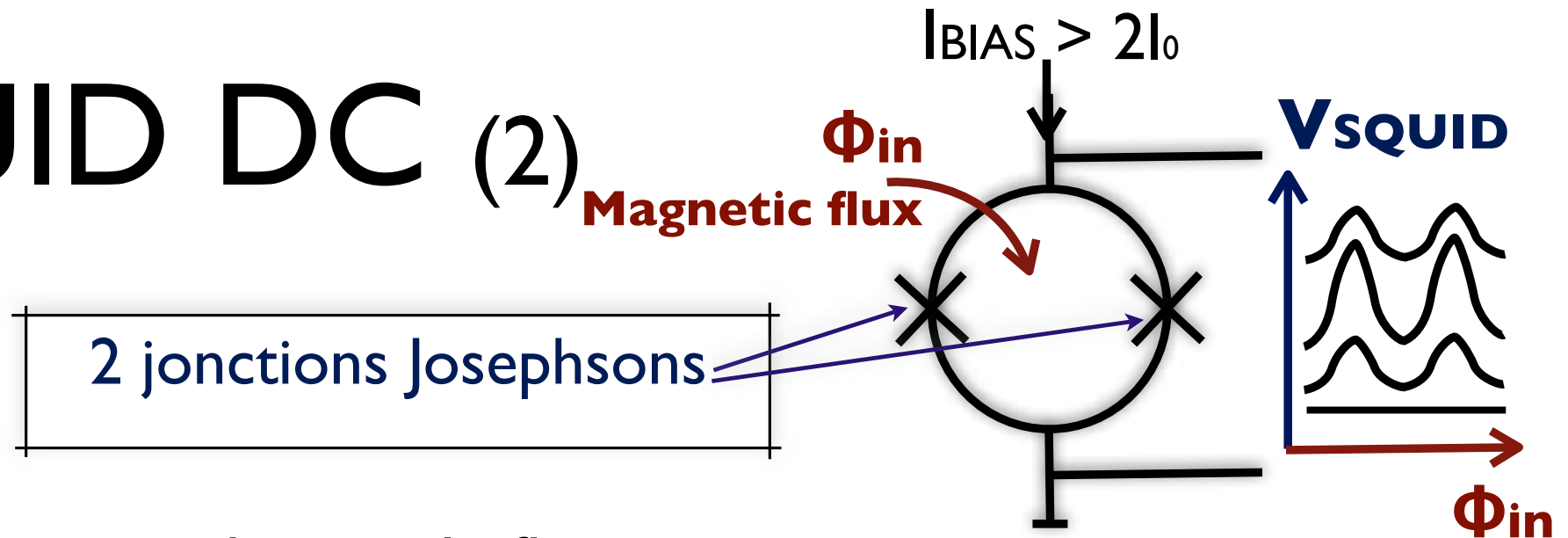
l'application d'une différence de potentiel ΔV ($I > I_0$) entraîne des **oscillations de fréquence $\Delta V / \Phi_0$** du courant supraconducteur

a.n.: $\Phi_0 = 2 \times 10^{-15} \text{ V.s} = 10^{-6} \text{ V} \times 2/10^9 \text{ Hz}$

fréquence Josephson/ $\Delta V \approx 500 \text{ MHz}/\mu\text{V}$



SQUID DC (2)



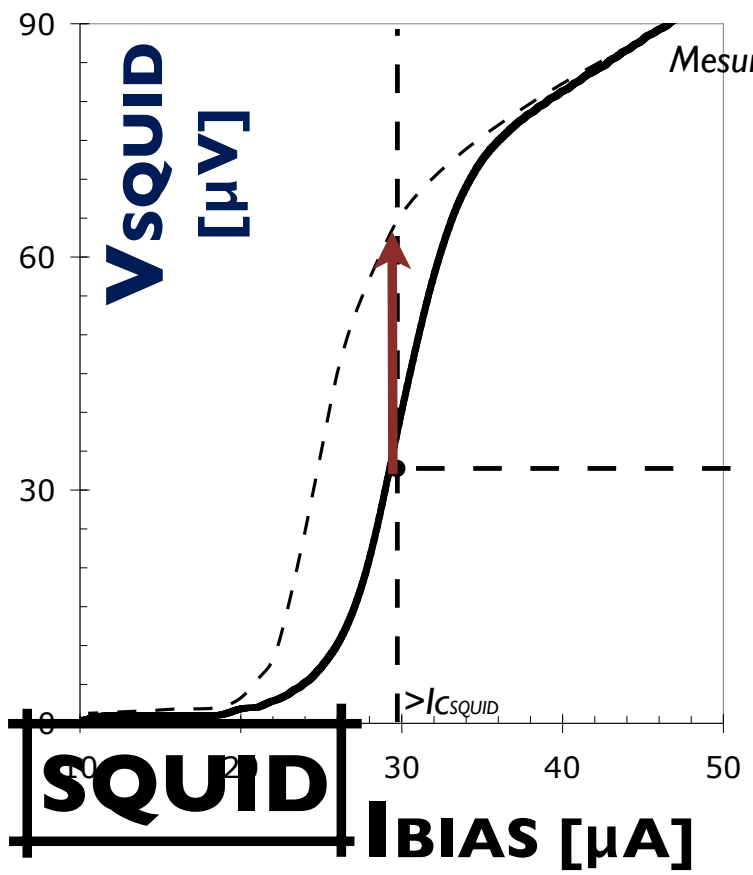
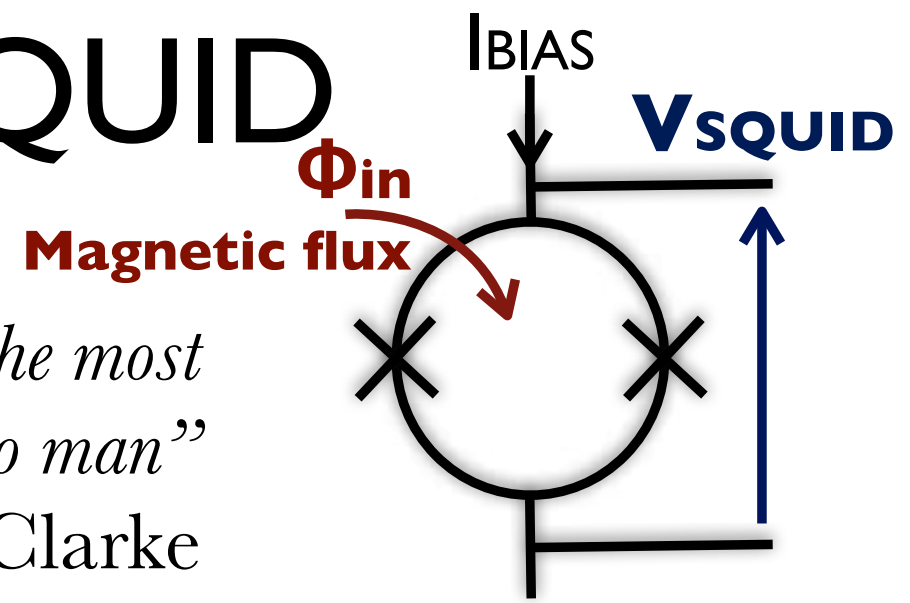
⇒ Le courant induit par le flux magnétique entraîne une **différence entre les $\Delta\varphi$ de deux jonctions** : Le SQUID se comporte comme une seule jonction Josephson dont le **courant critique est modulé par le champ magnétique**

- $I_{BIAS} > 2I_c$: La tension au borne du SQUID évolue de manière périodique (Φ_0) en fonction du flux Φ_{in}
- En l'absence de polarisation la tension au borne du SQUID est nulle

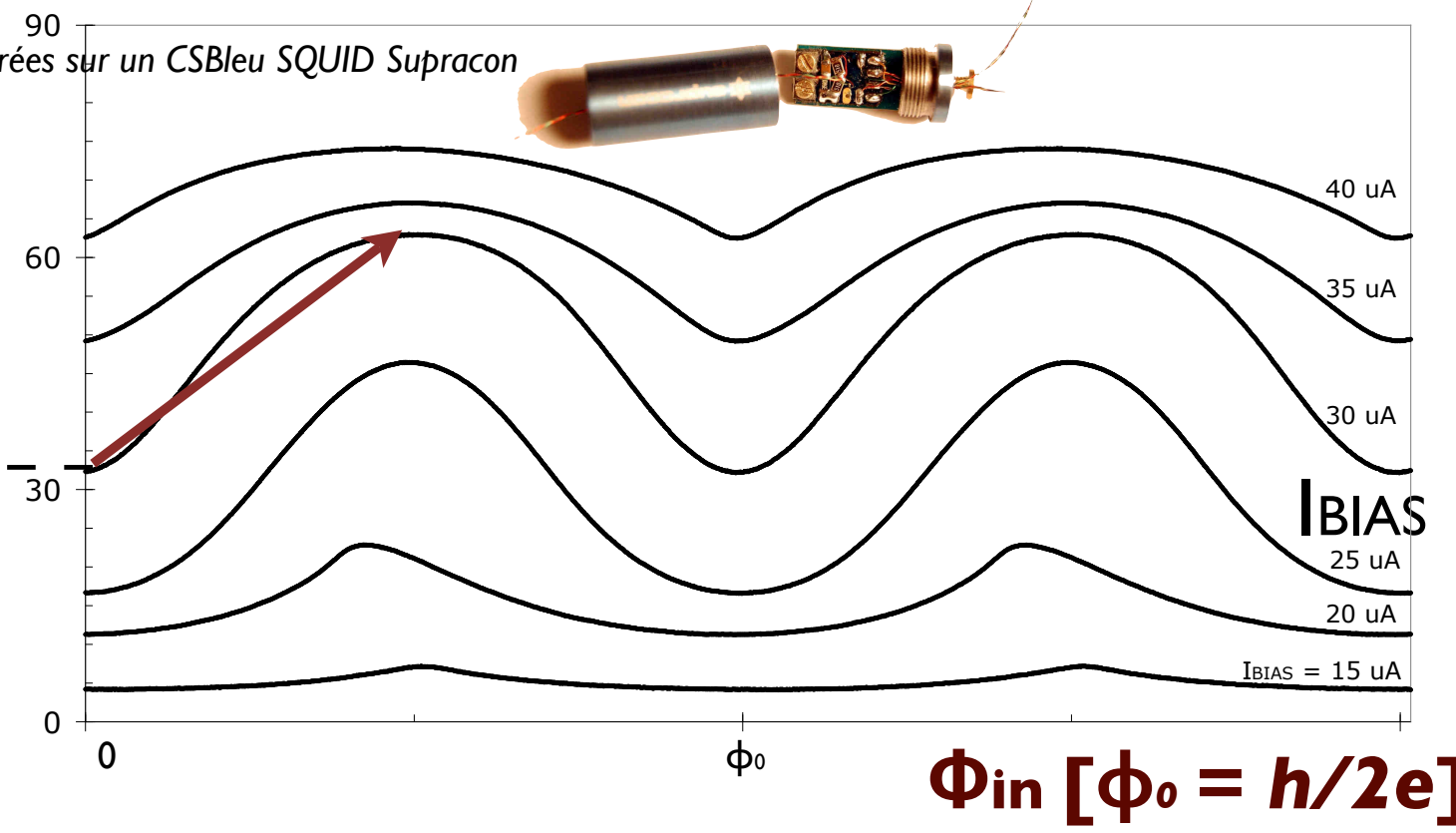
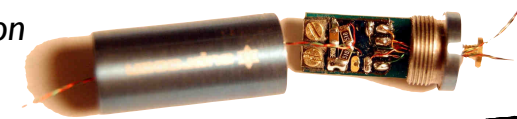
SQUID

Caractéristique de SQUID

“The SQUID magnetometer may be the most sensitive measurement device known to man”
 John Clarke



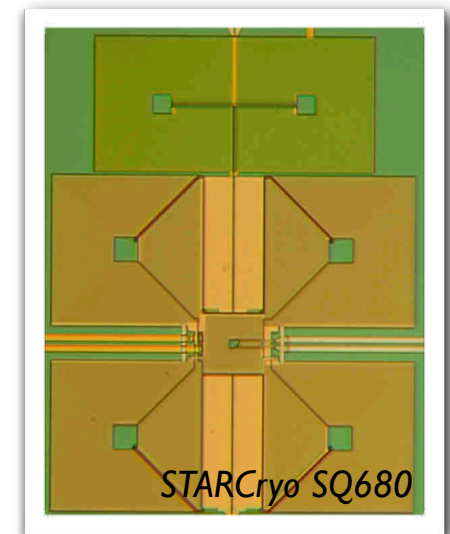
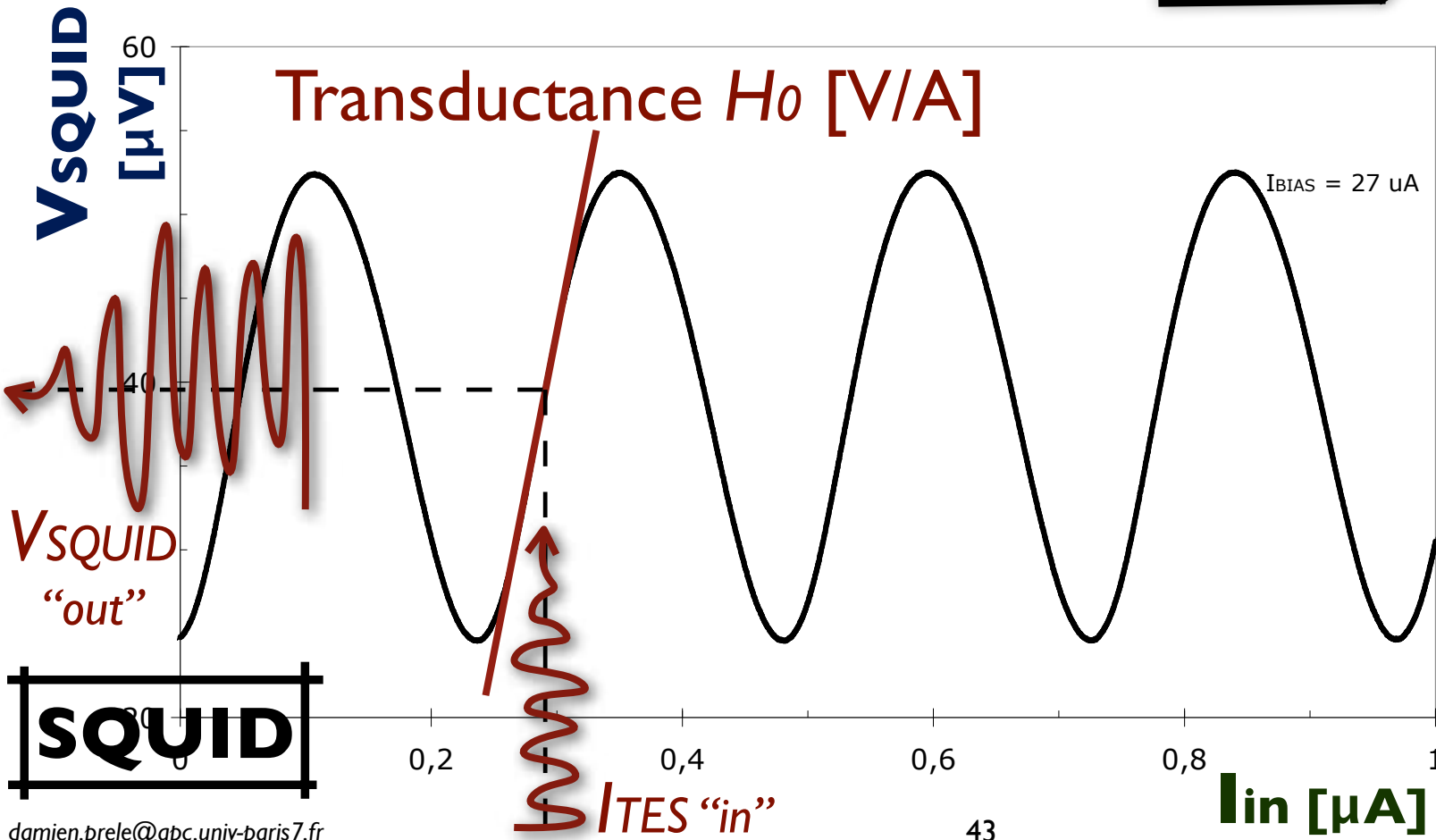
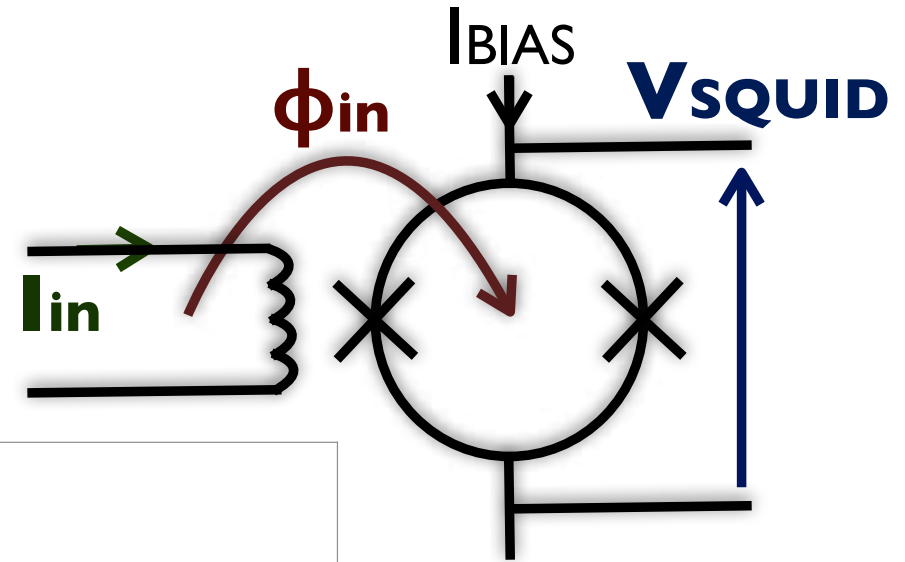
Mesurées sur un CSBleu SQUID Supracon



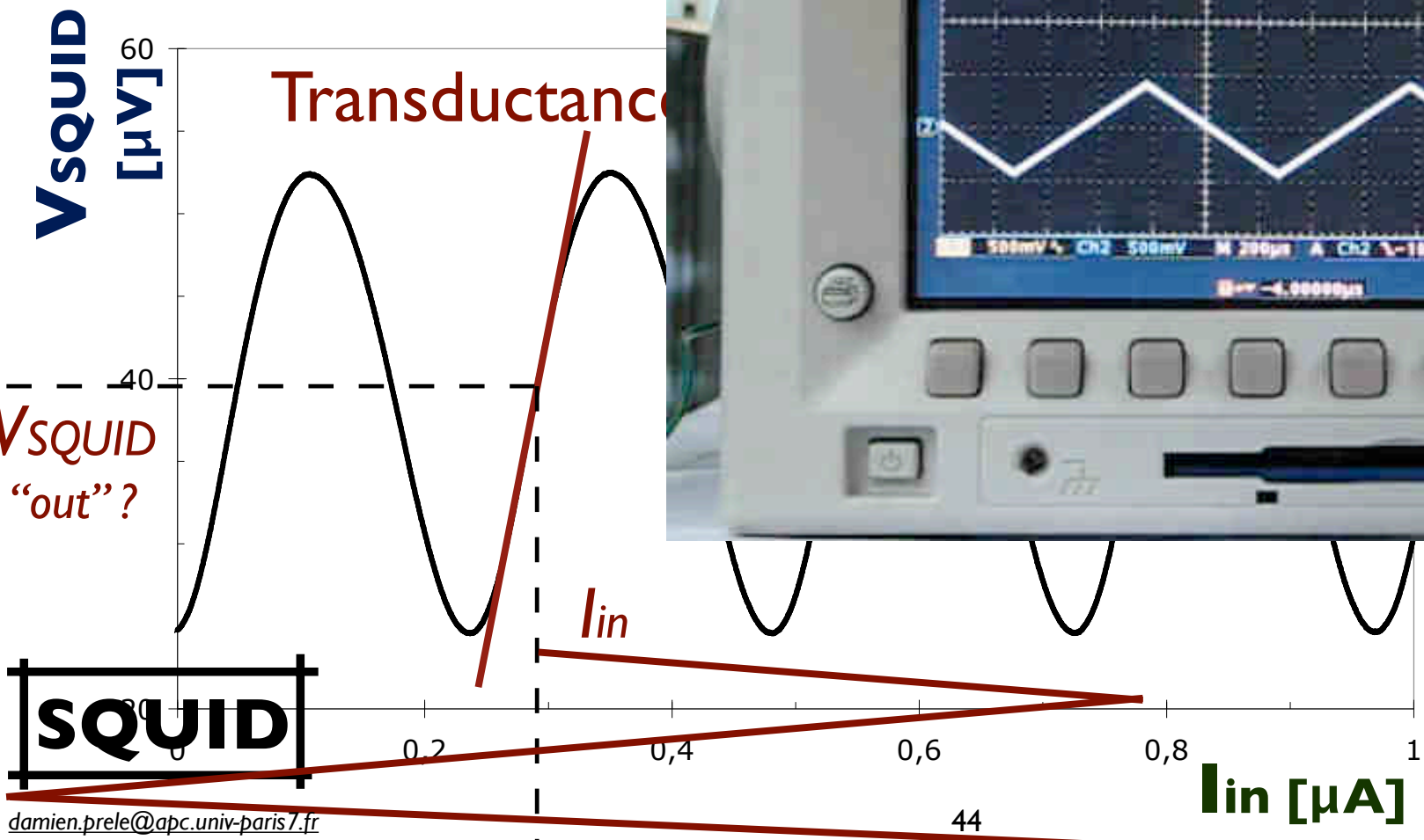
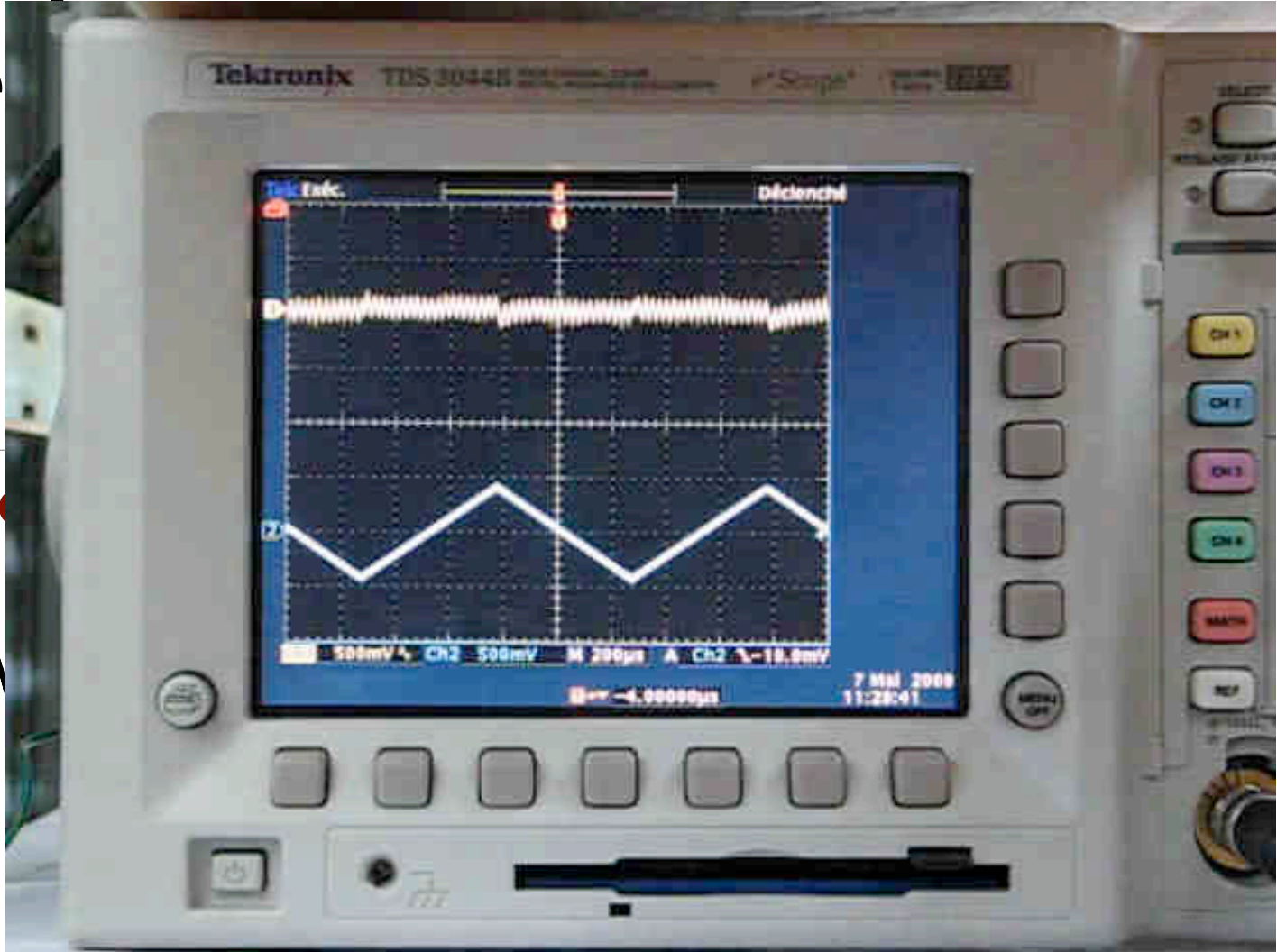
$\Phi_{in} [\Phi_0 = h/2e]$
 Flux quantum
 DRTBT - Frejus - 2009

SQUID : amplificateur à transimpédance (courant \rightarrow tension)

Transduction typ = few 100 V/A
Input noise typ = few pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$



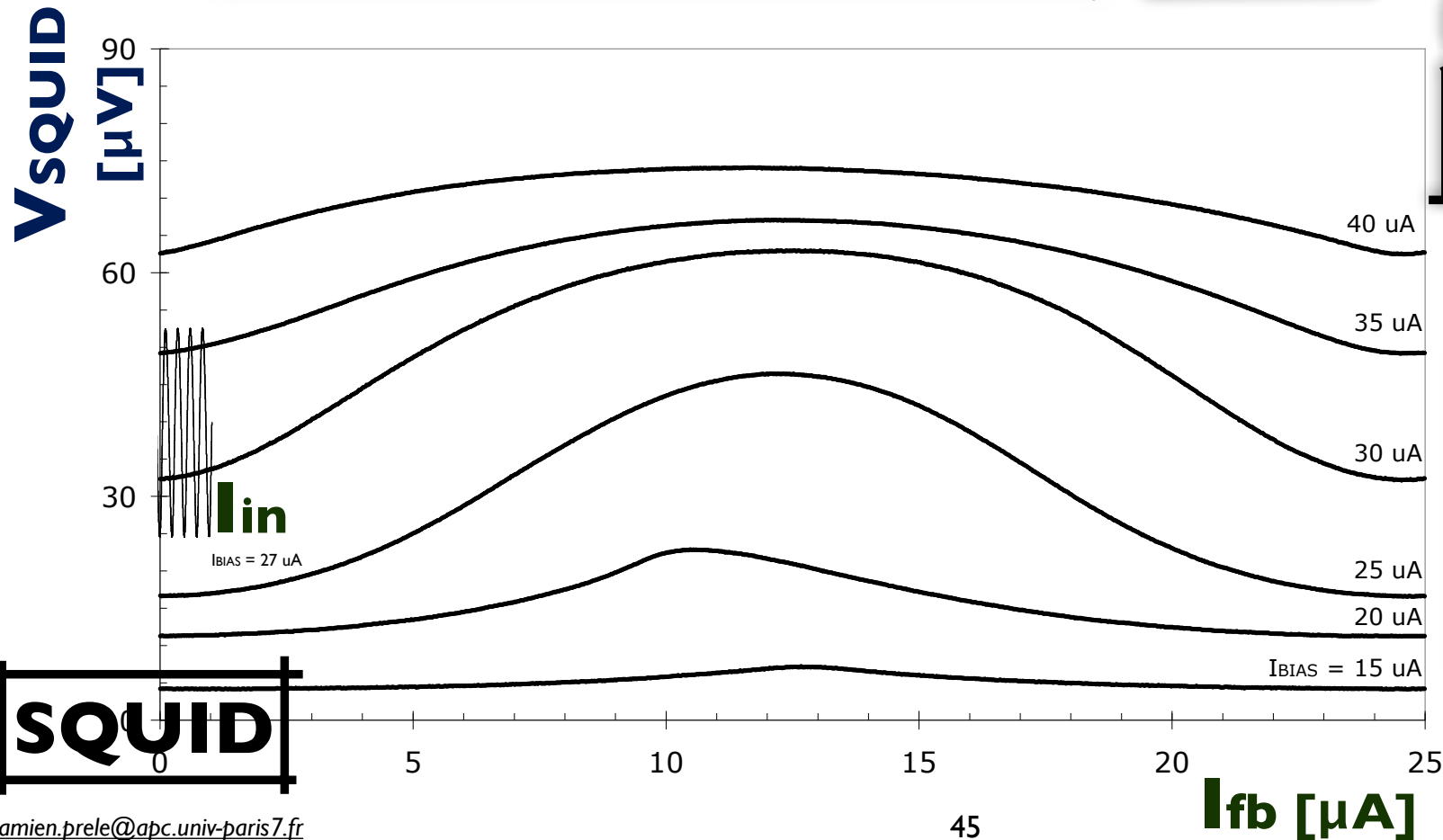
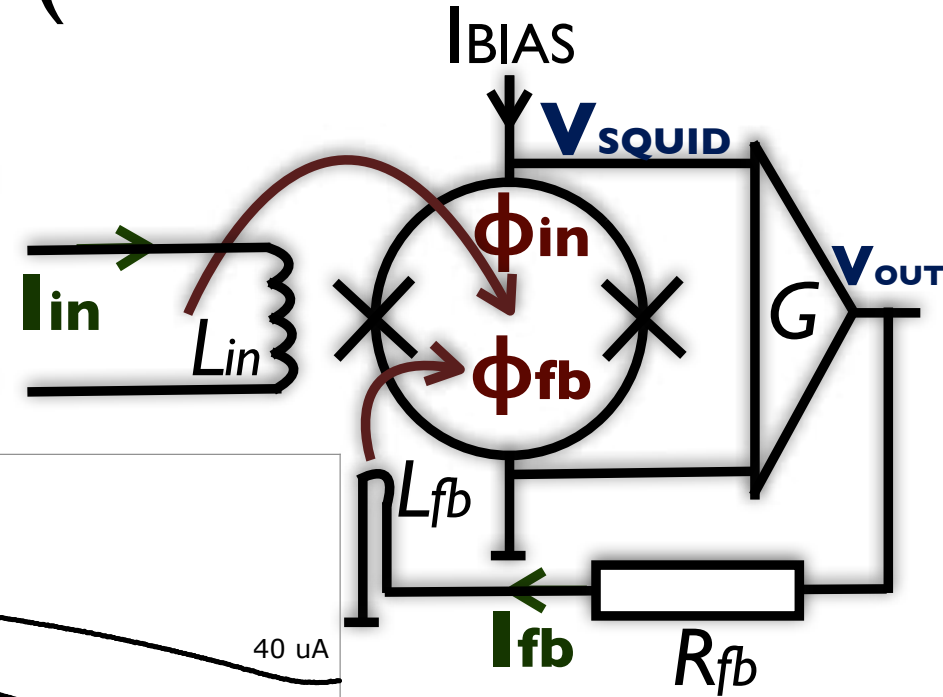
Caractéristique sinusoïdale : *faible dynamique*



Self de contre réaction pour générer une boucle à verrouillage de flux (Flux Locked Loop : FLL)

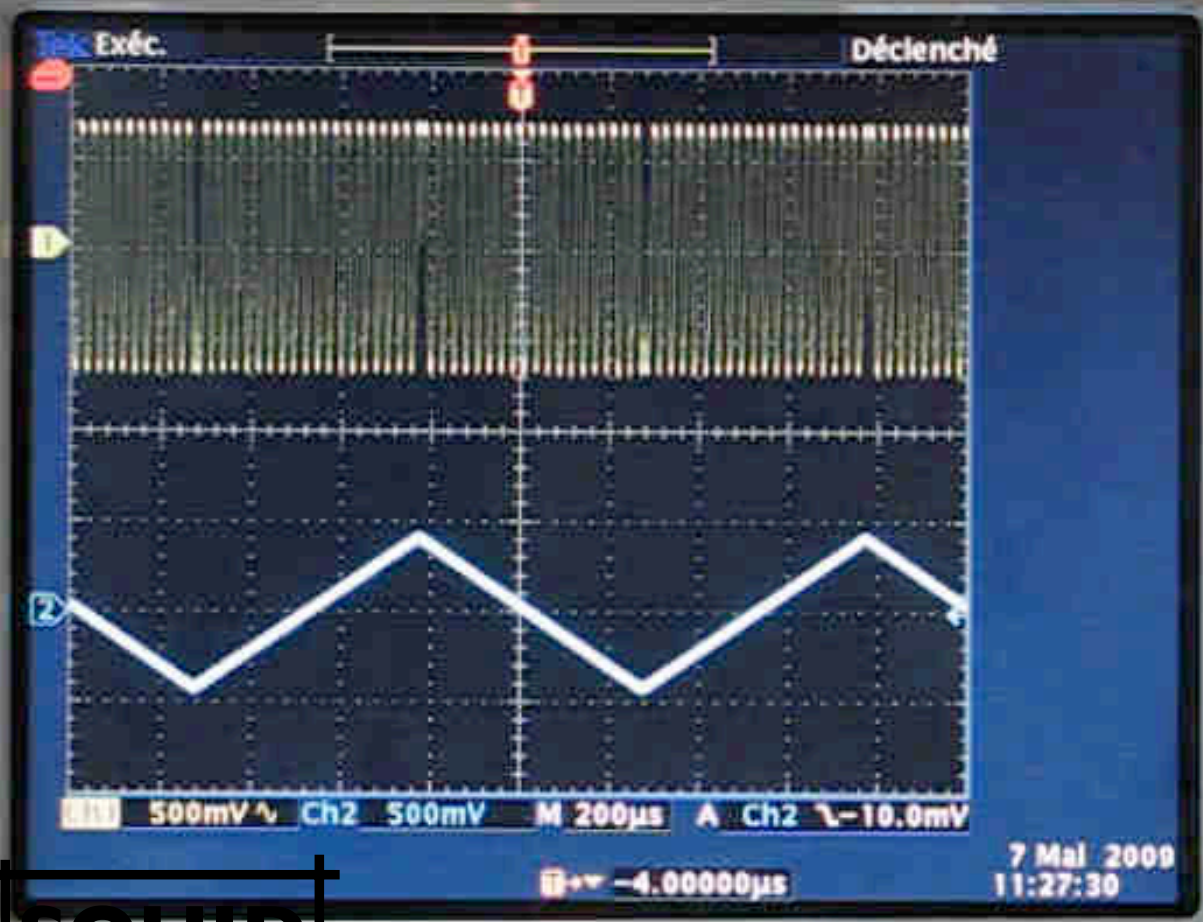
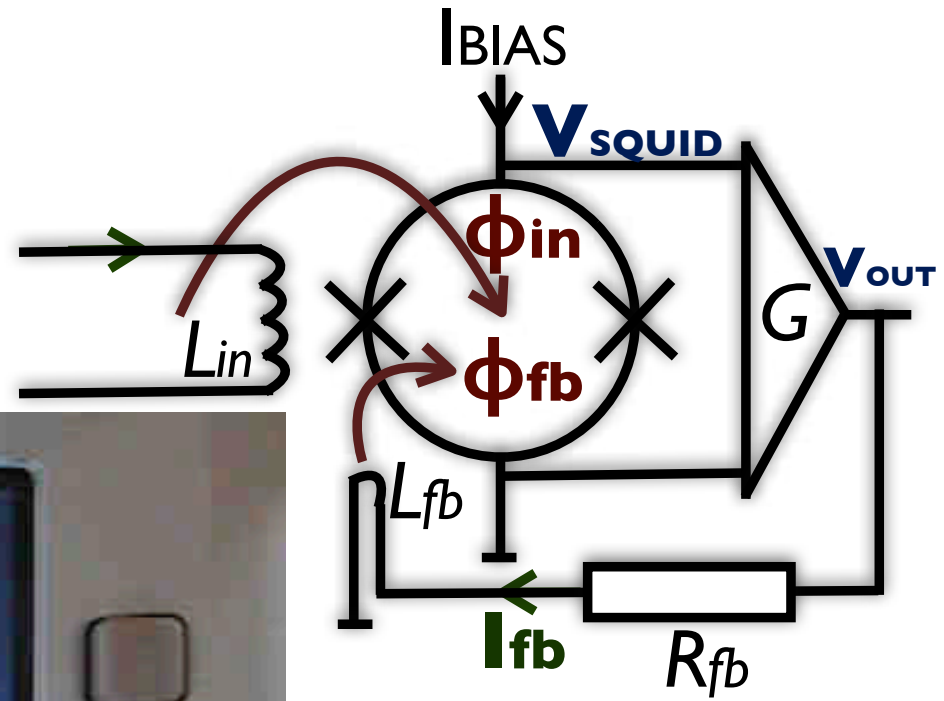
$$H_{OPEN\ LOOP} = V_{OUT} / I_{TES} = H_0 G$$

$$H_{FLL} = V_{OUT} / I_{TES} = R_{fb} \cdot M_{in} / M_{fb}$$



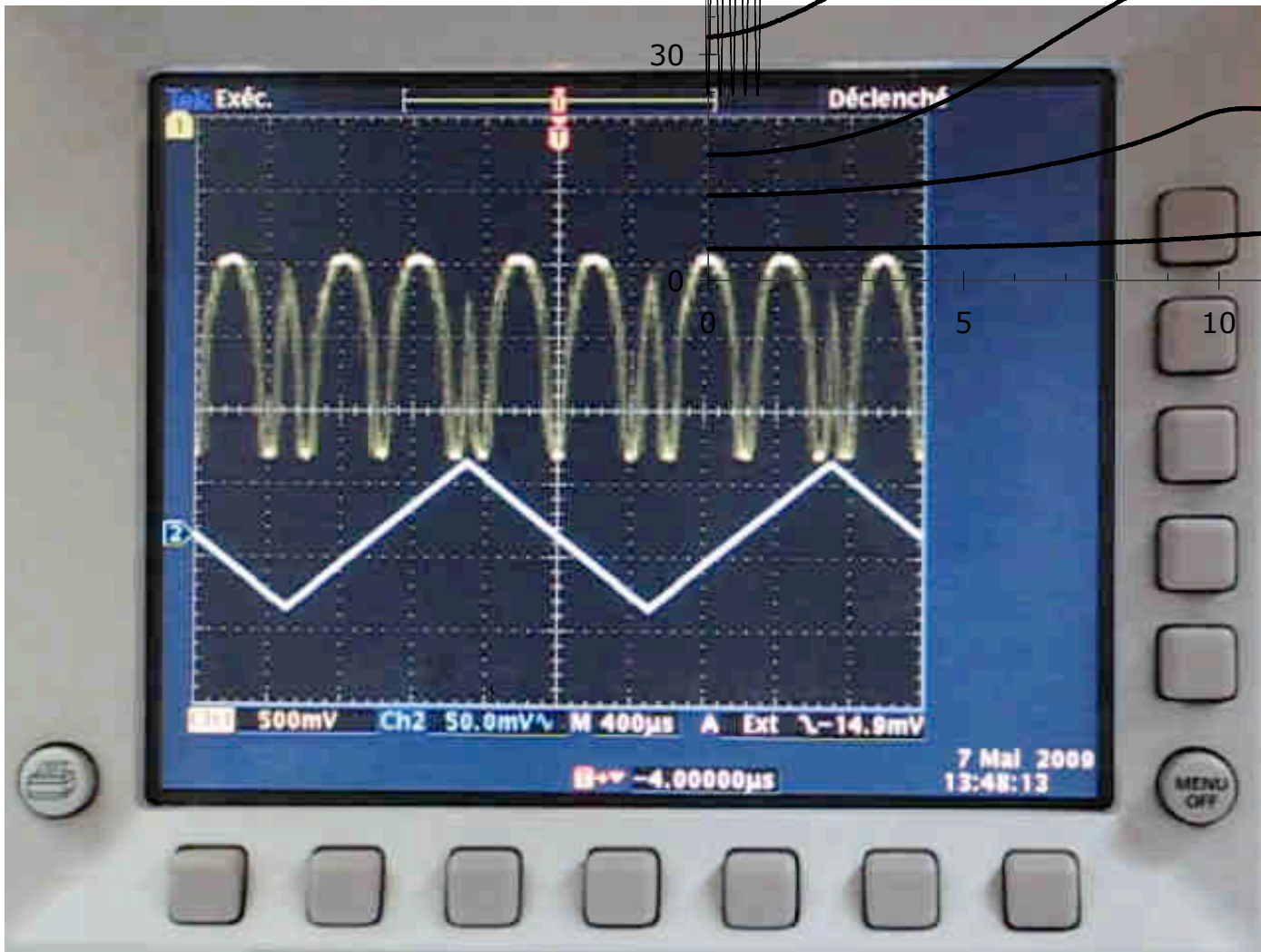
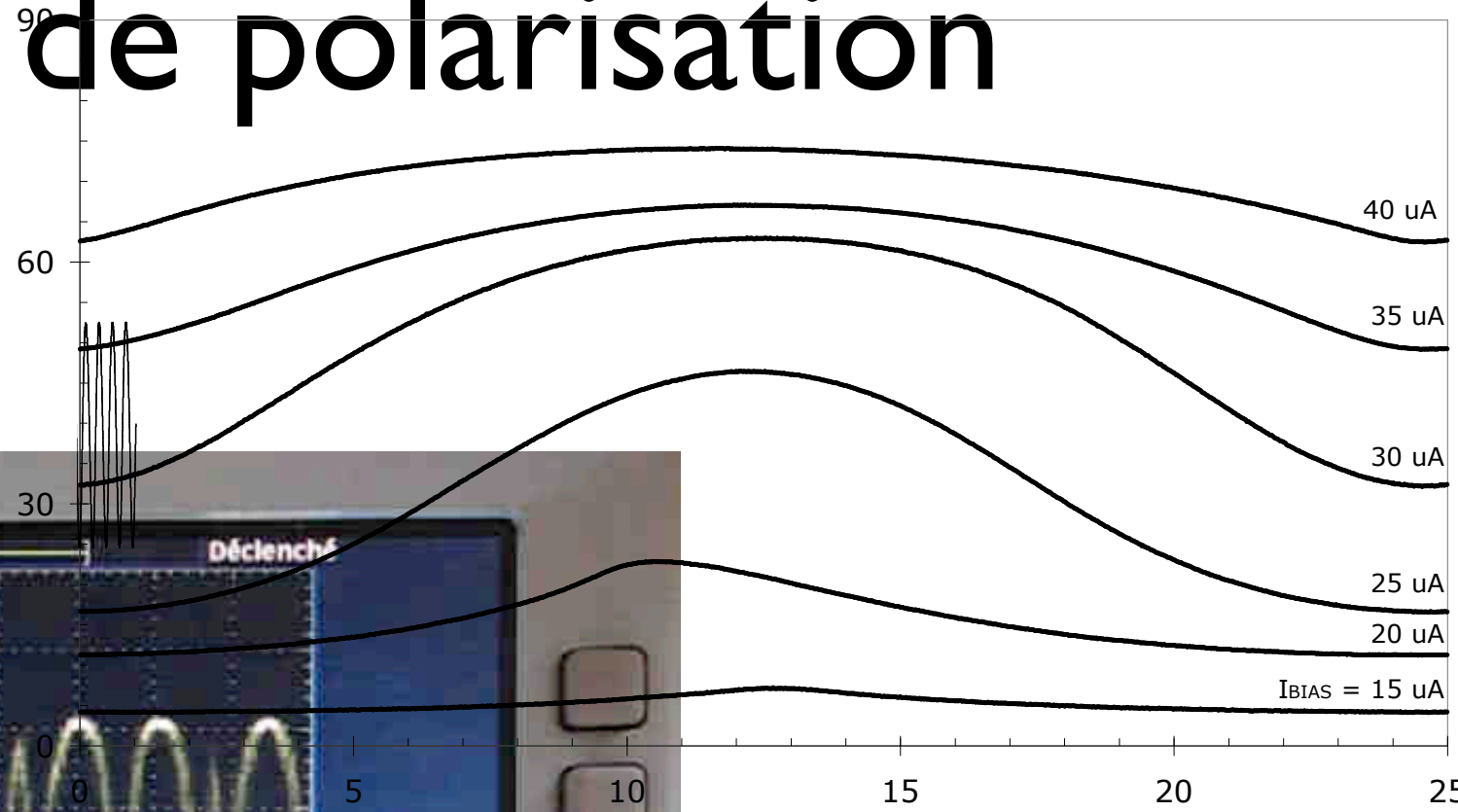
$L_{fb} \ll L_{in}$
to keep an
“amplification” of the
TES signal

Flux Locked Loop : FLL

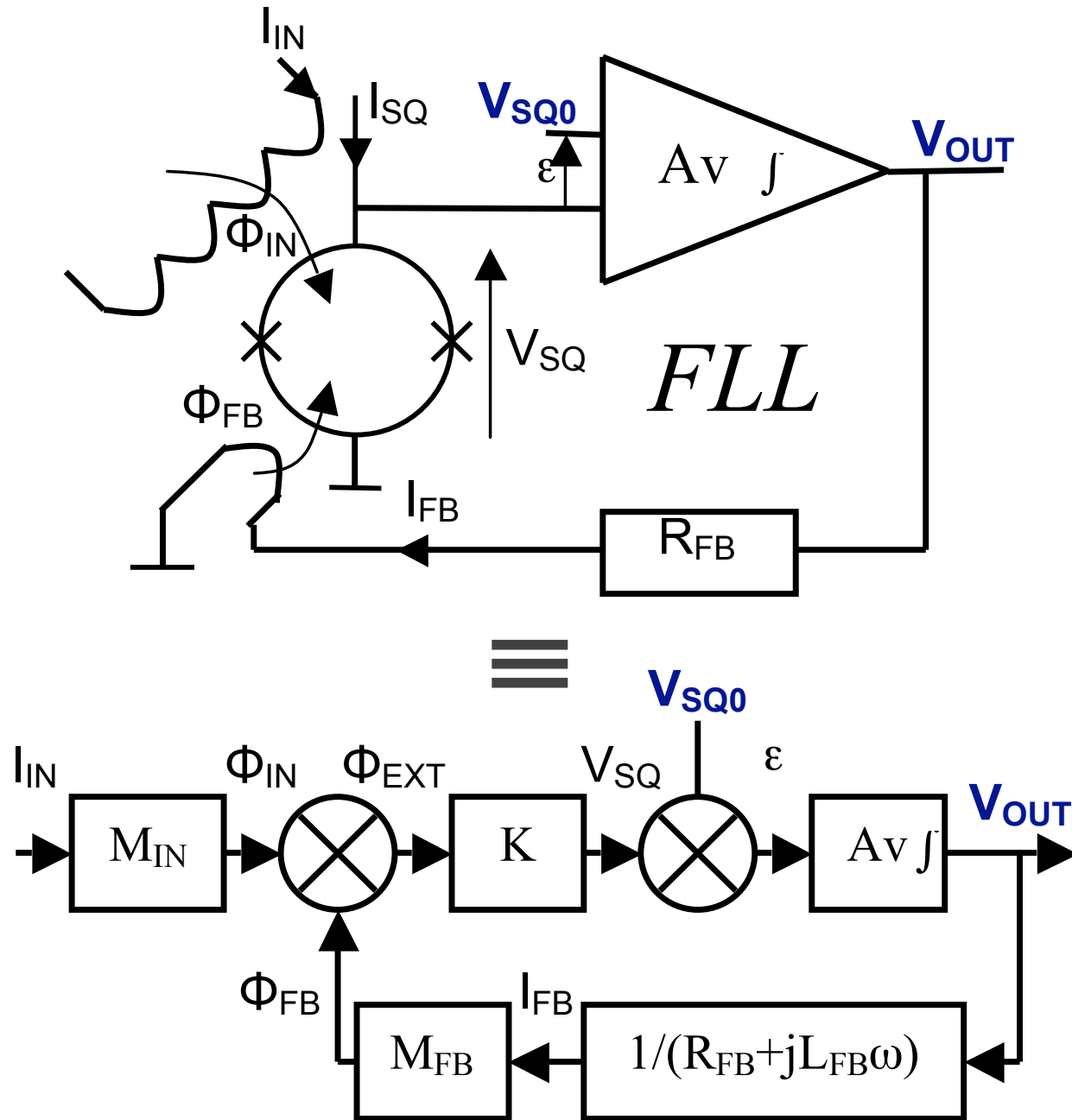


SQUID

Optimum de polarisation

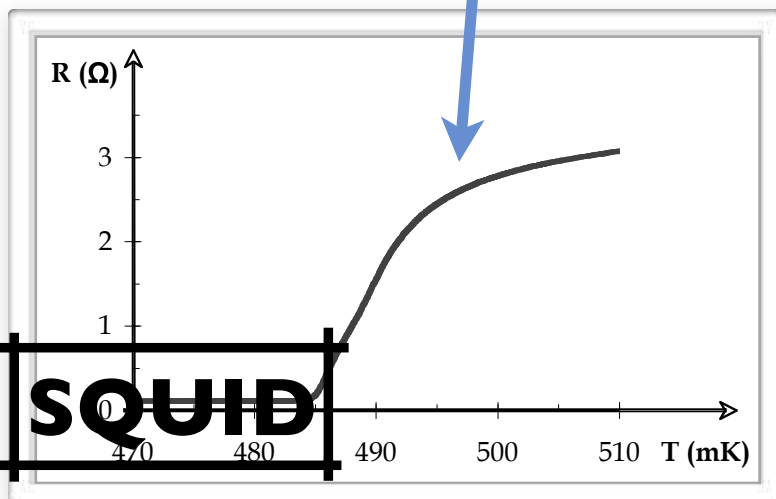
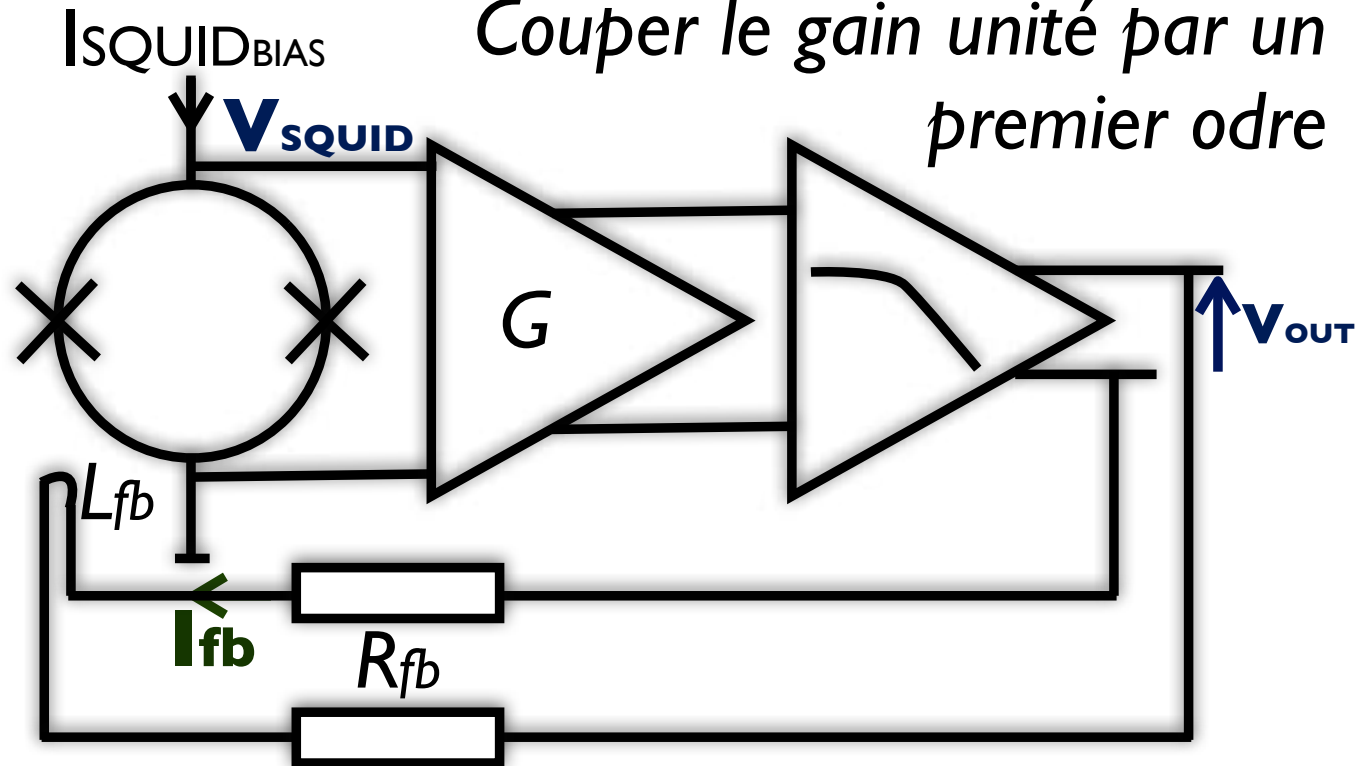
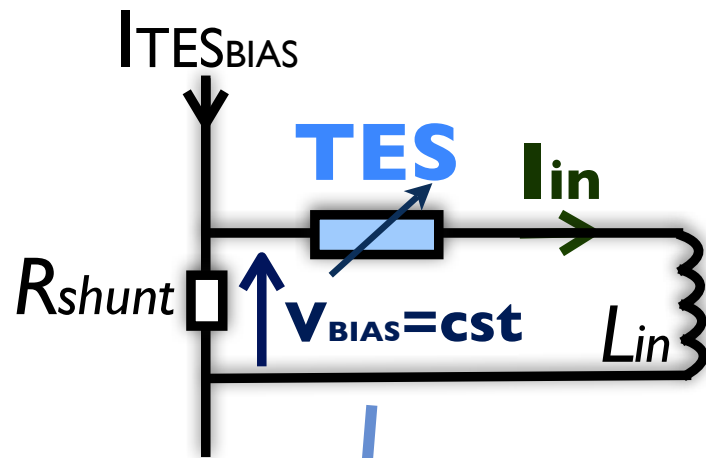


FLL : schéma bloc



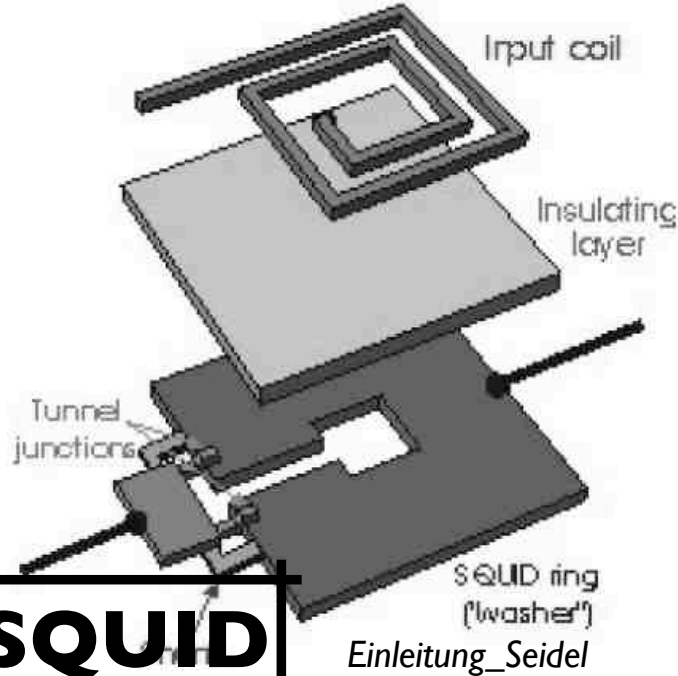
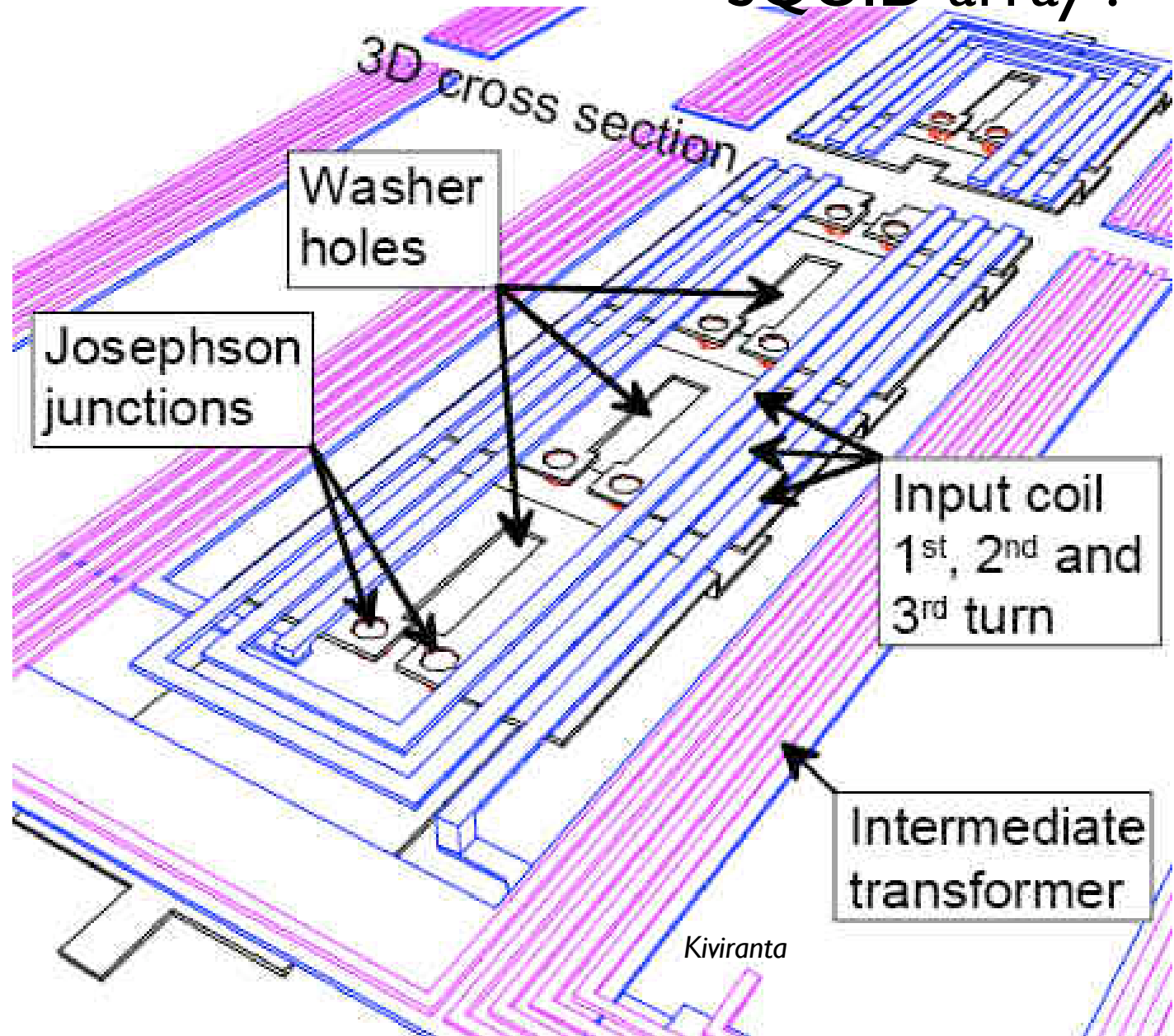
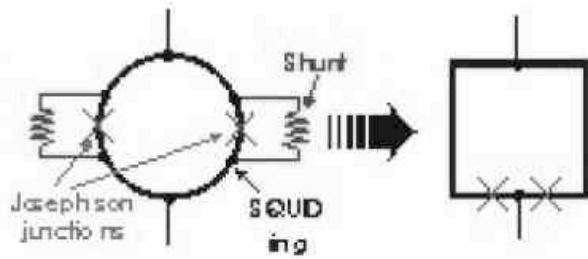
Chaine de lecture d'un TES

Stabilisation de la contre réaction par un pôle dominant:
Couper le gain unité par un premier ordre



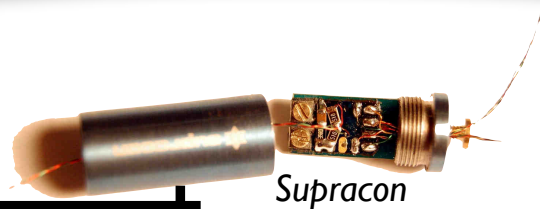
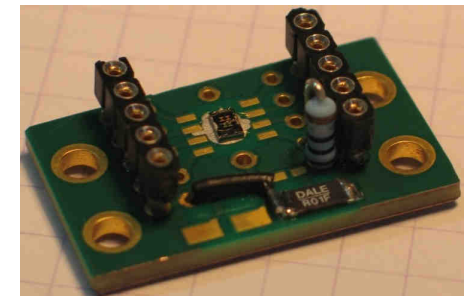
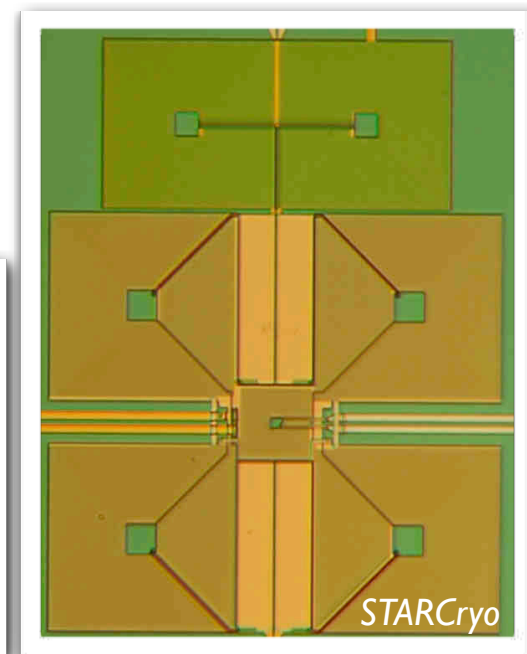
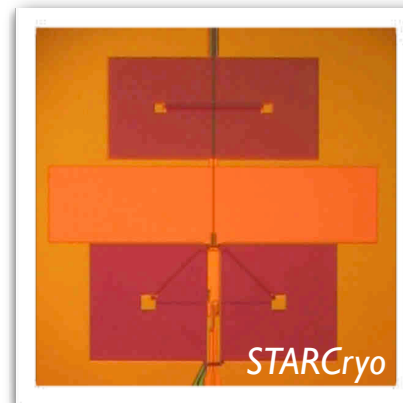
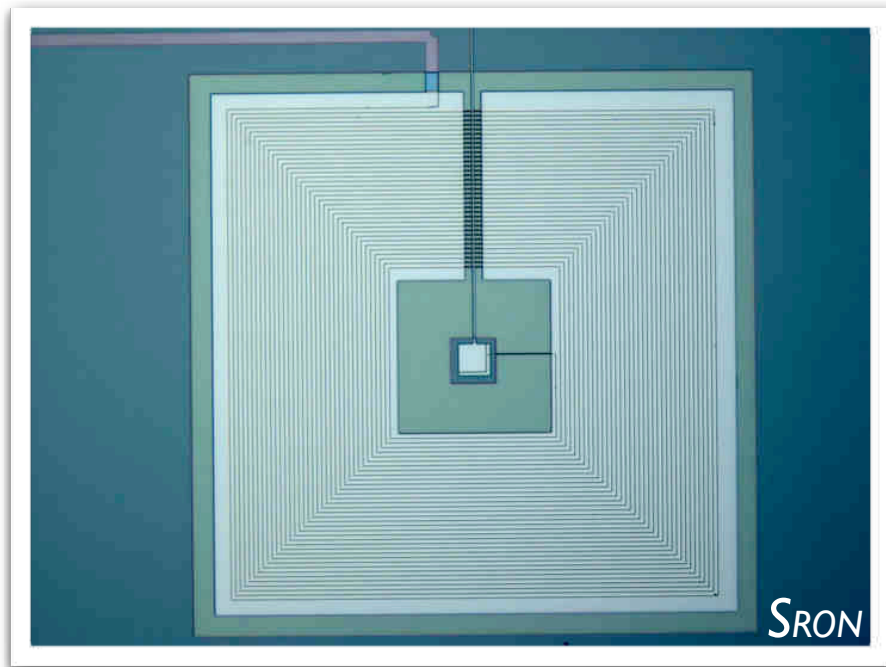
SQUID en technologie planaire

SQUID array :

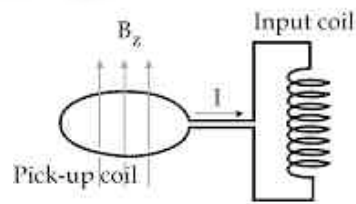


SQUID

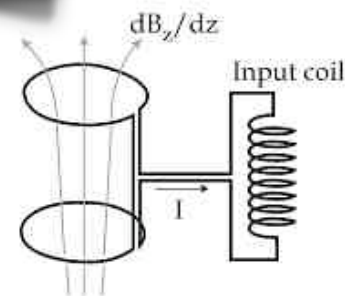
SQUID en technologie planaire



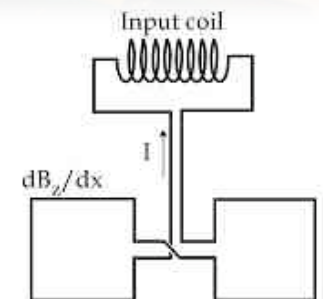
SQUID



(a) magnetometer



(b) gradiometer



(c) planar gradiometer

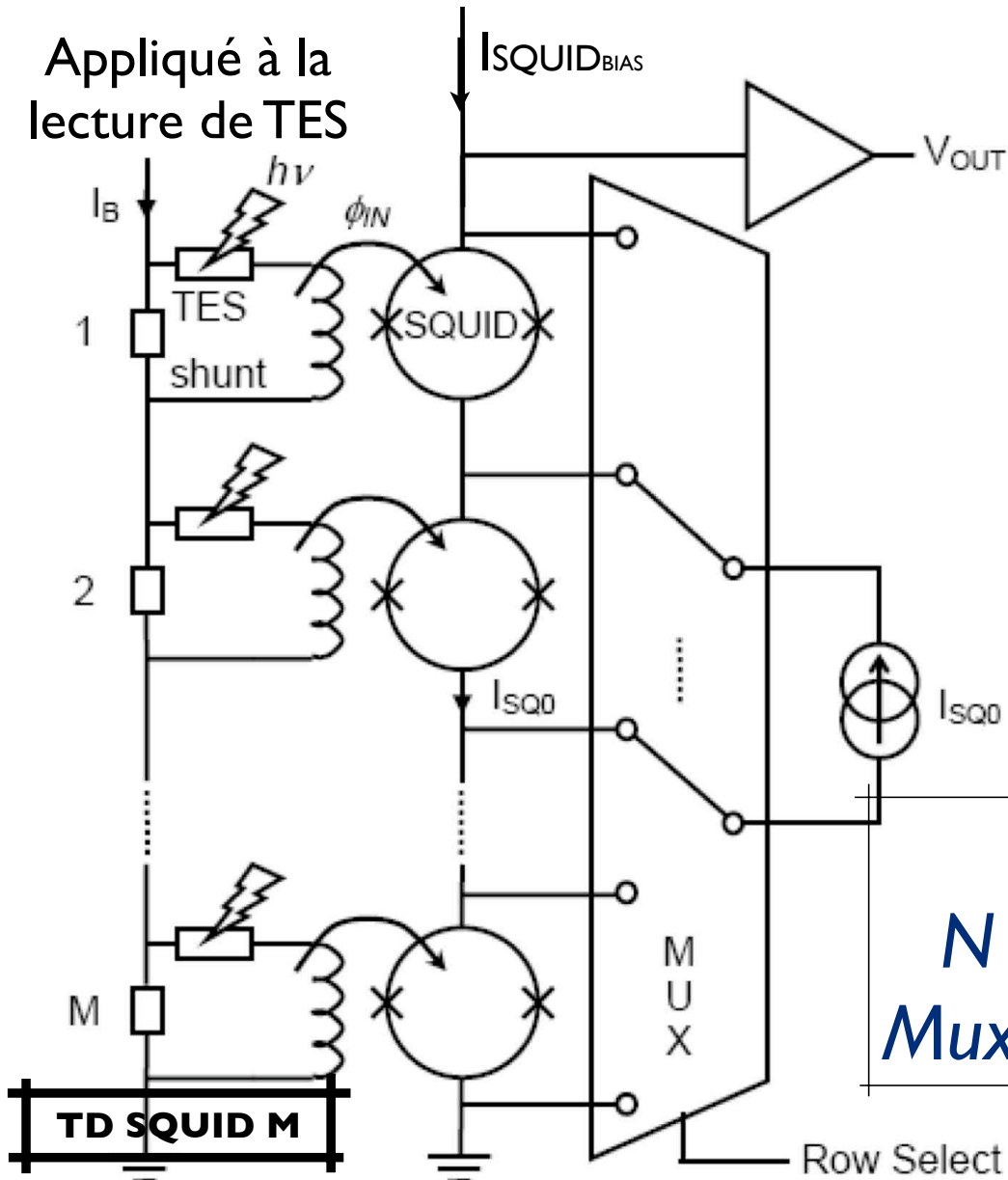
TD SQUID M

*Time-Division Superconducting QUantum
Interference Device Multiplexing*



Multiplexage temporel à SQUID

Appliqué à la lecture de TES



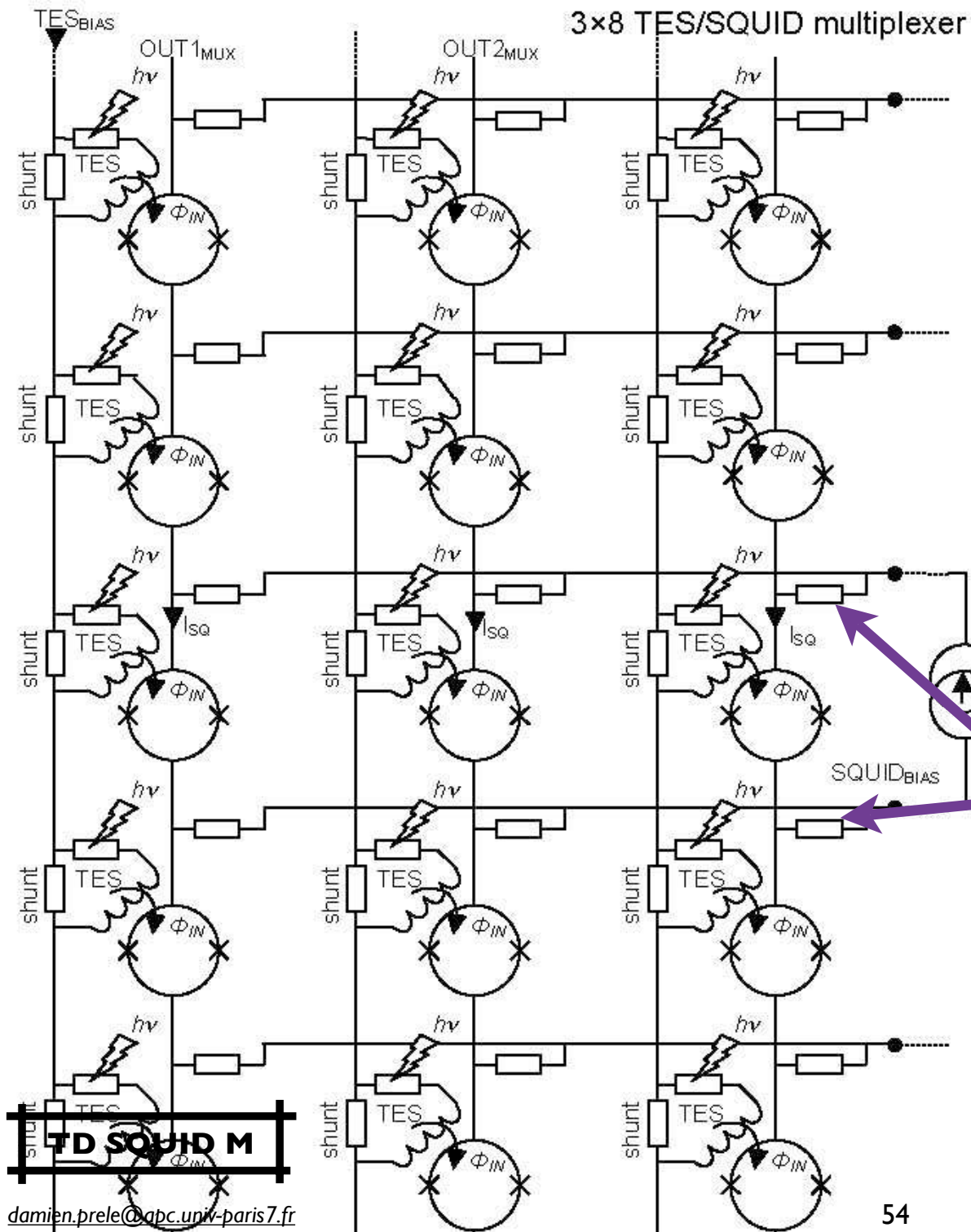
- Chaque self d'**entrée reçoit en permanence le signal** d'un des pixels à multiplexer
- Seul **1 SQUID est polarisé à la fois**
- Les SQUID non polarisés sont supraconducteurs

Bilan de la réduction de fils :

$N \text{ SQUID} = N \times 3 \text{ fils}$ (2bias, 1sortie et masse commune)

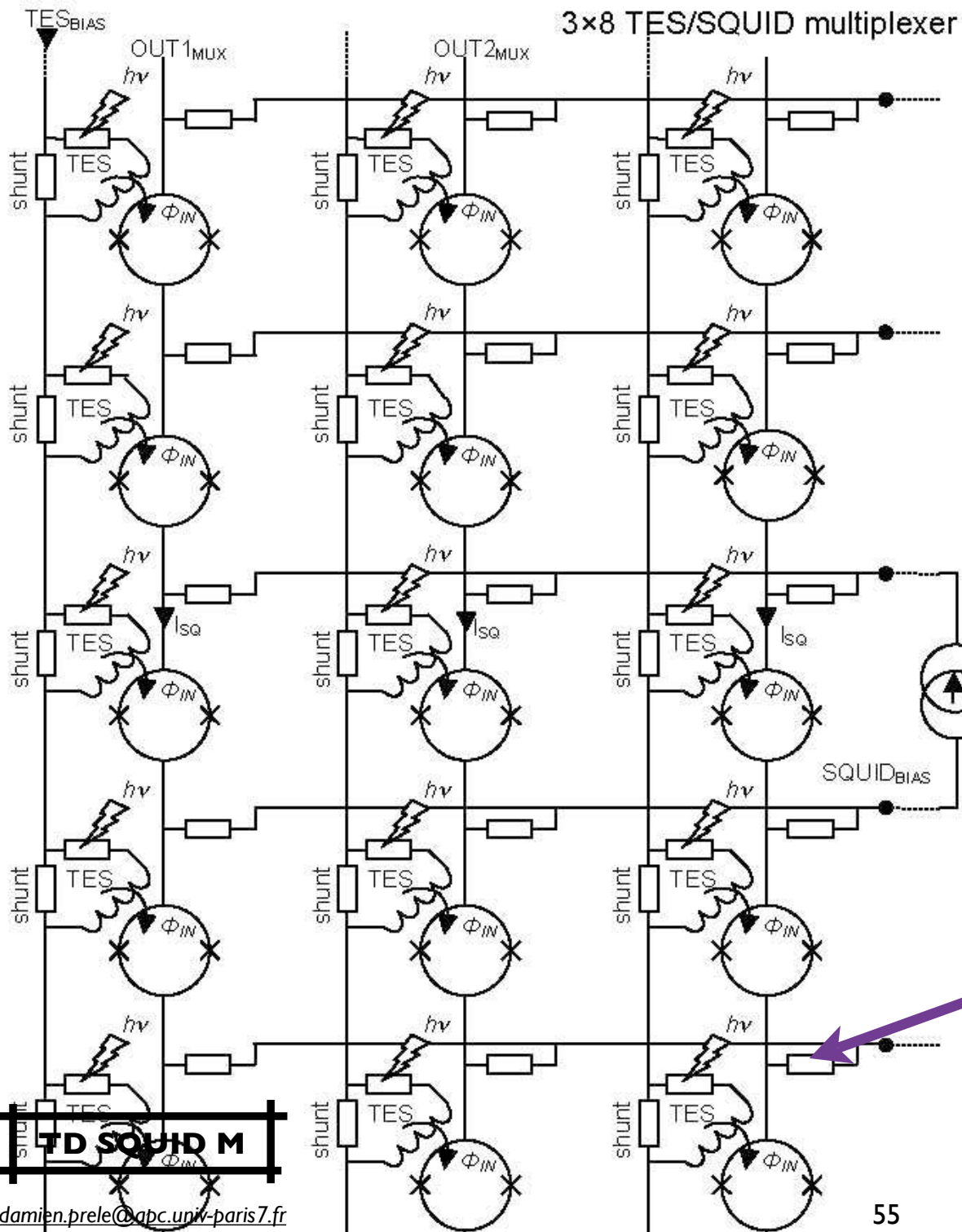
$Mux \ N/1 = N+1+1 \text{ fils}$ (bias commun N+1 et sortie unique)

2D TD SQUID M



- Chaque self d'**entrée** reçoit en permanence le **signal** d'un des pixels à multiplexer
- Seul **1 ligne de SQUID** est polarisée à la fois
- Des **résistances d'adressage** permettent de répartir le courant dans chaque colonne sans induire trop de "cross talk"

2D TD SQUID M (2)



Bilan de la réduction de fils :

N SQUID = $N \times 3$ fils (2bias, 1sortie et masse commune)

Mux 1D $N/1 = N+1+1$ fils
(bias commun $N+1$ et sortie unique)

**Mux 2D $N/1 = N/C+1+C^*$
 $+3$ fils** (bias commun $N+1$ et sortie unique)

Cross talk :

$R_{\text{SQUID}}/R_{\text{adressage}}$

↳ Puissance dissipée

$\propto R_{\text{adressage}}/R_{\text{SQUID}}$

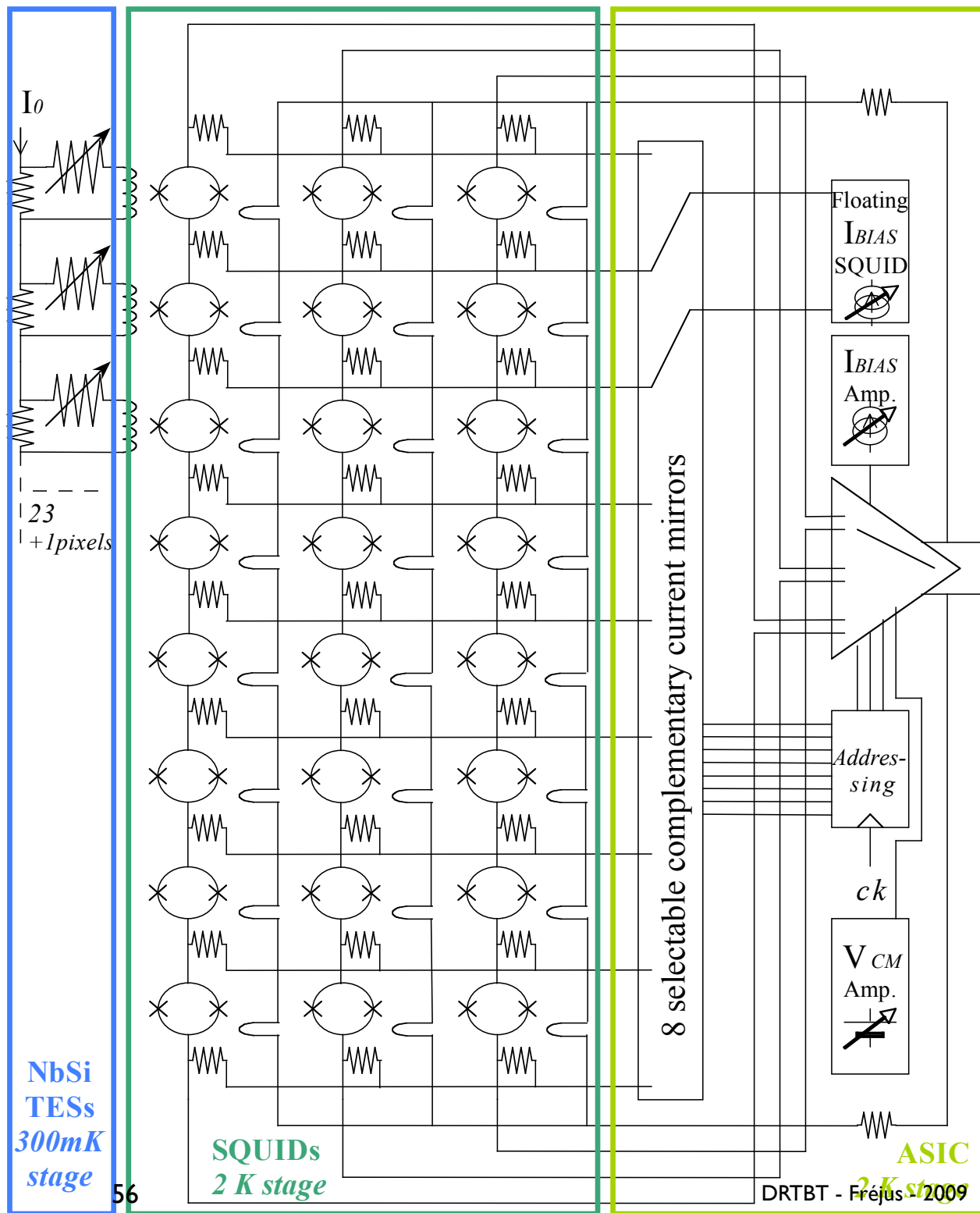
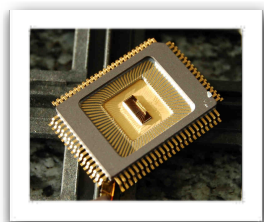
* C = nombre de colonne

2D TD SQUID M + adressage cryogénique

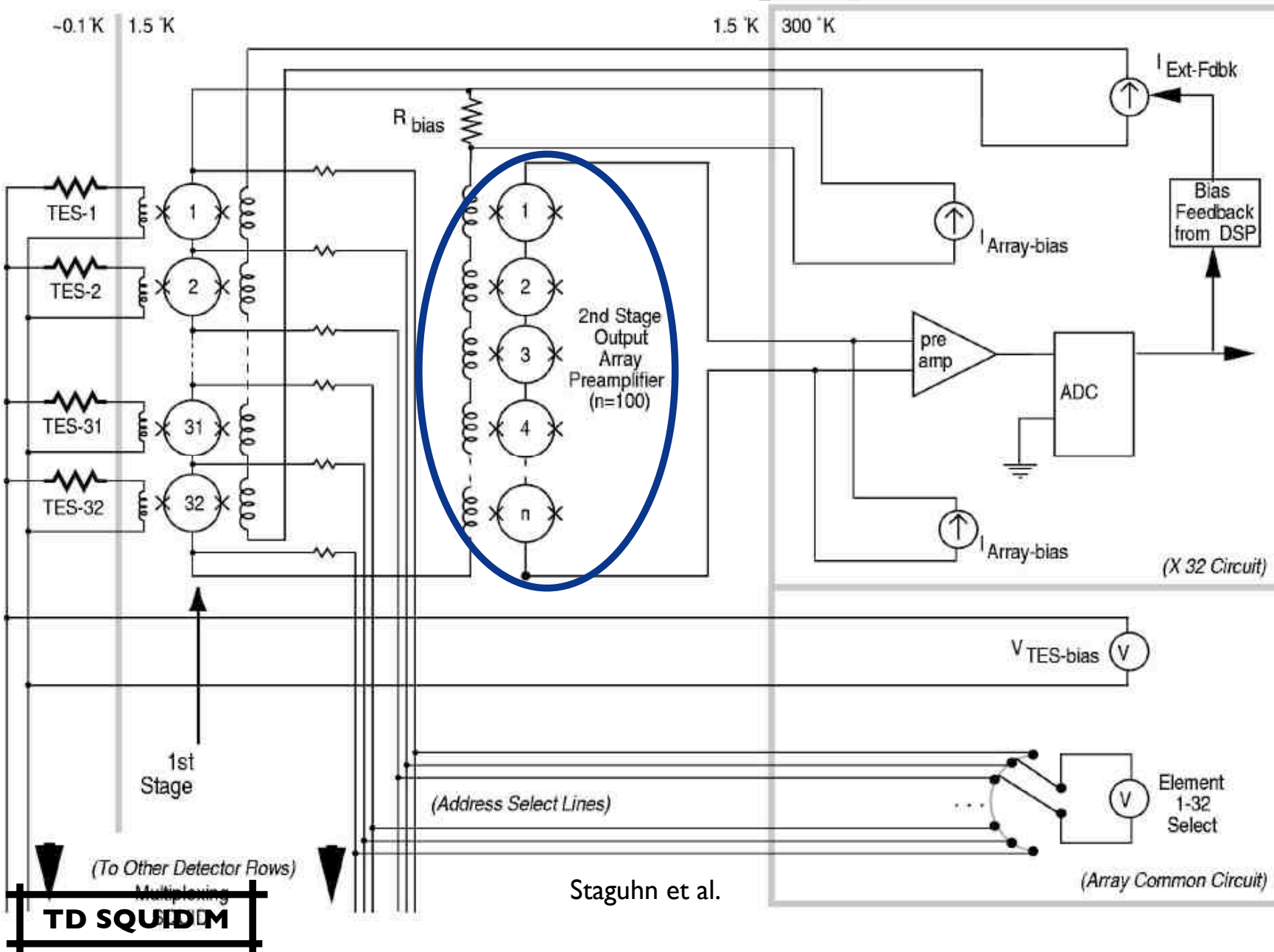
*“Le multiplexeur diminue
le nombre de fils de signal
mais augmente en contre
partie de nombre de fils
d'adressage”*

Pour réduire encore le
nombre de fils
l'adressage doit se
faire à température
cryogénique

TD SQUID M



SQUID array pour la FLL

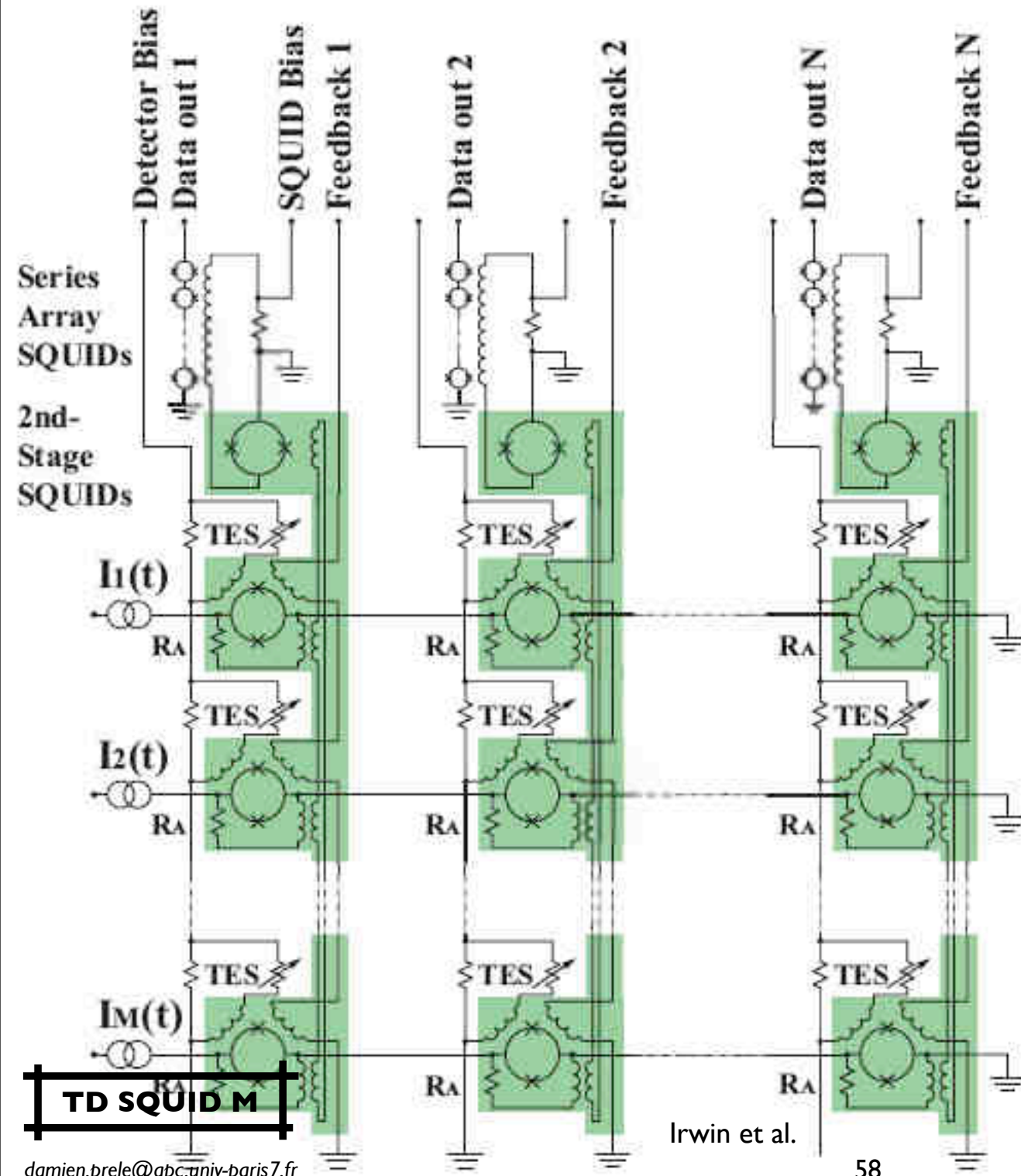


*Amplificateur
bas bruit et à
dynamique n
fois plus
grande qu'1
SQUID*

Staguhn et al.

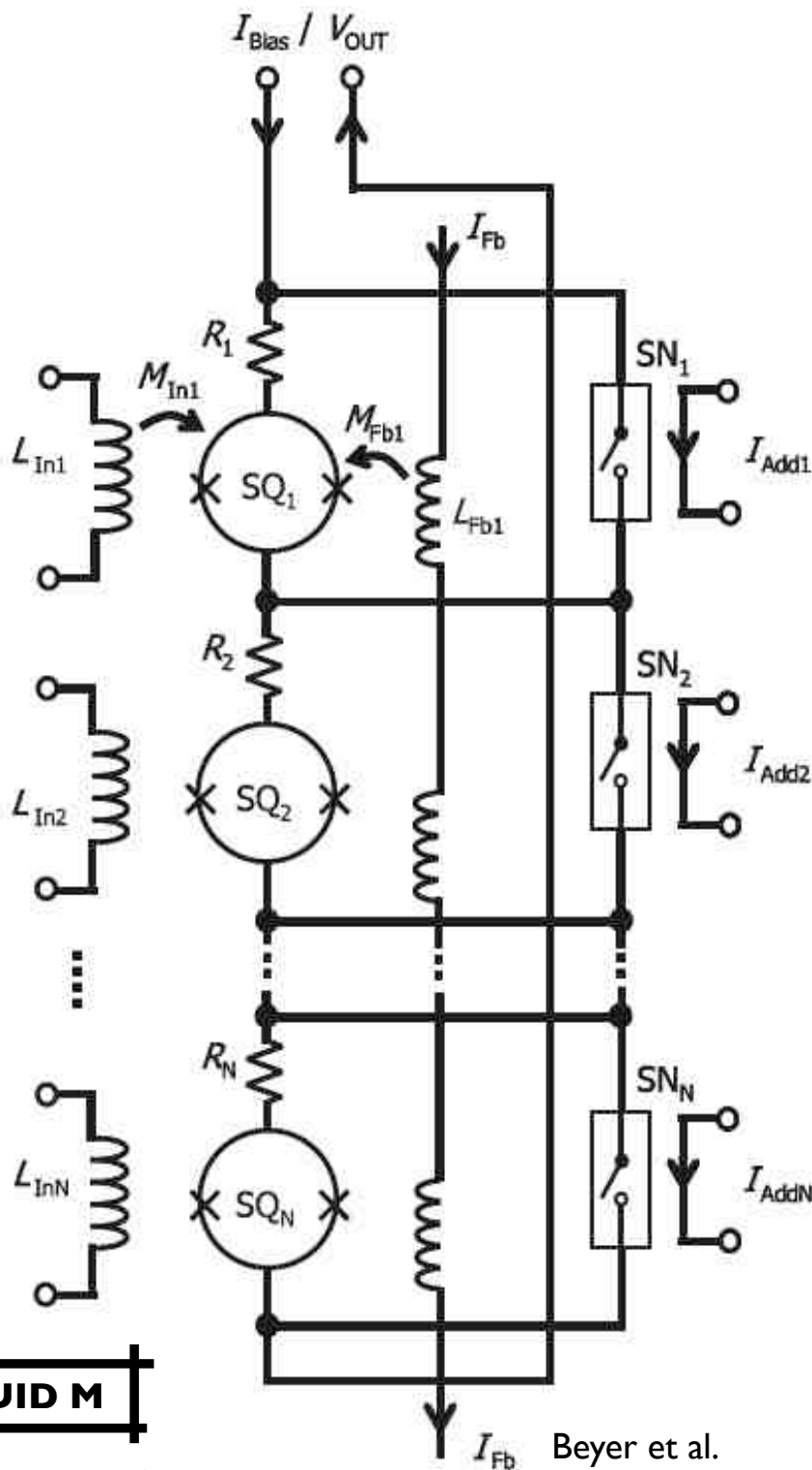
Multiplexage Temporel à SQUID sans résistance d'adressage

- Important quand les SQUID sont à très basse température (100 - 300 mK)



TD SQUID M adressé par des switch supra.

- *Evite d'adresser directement le SQUID, pour ne pas apporter de bruits supplémentaires*



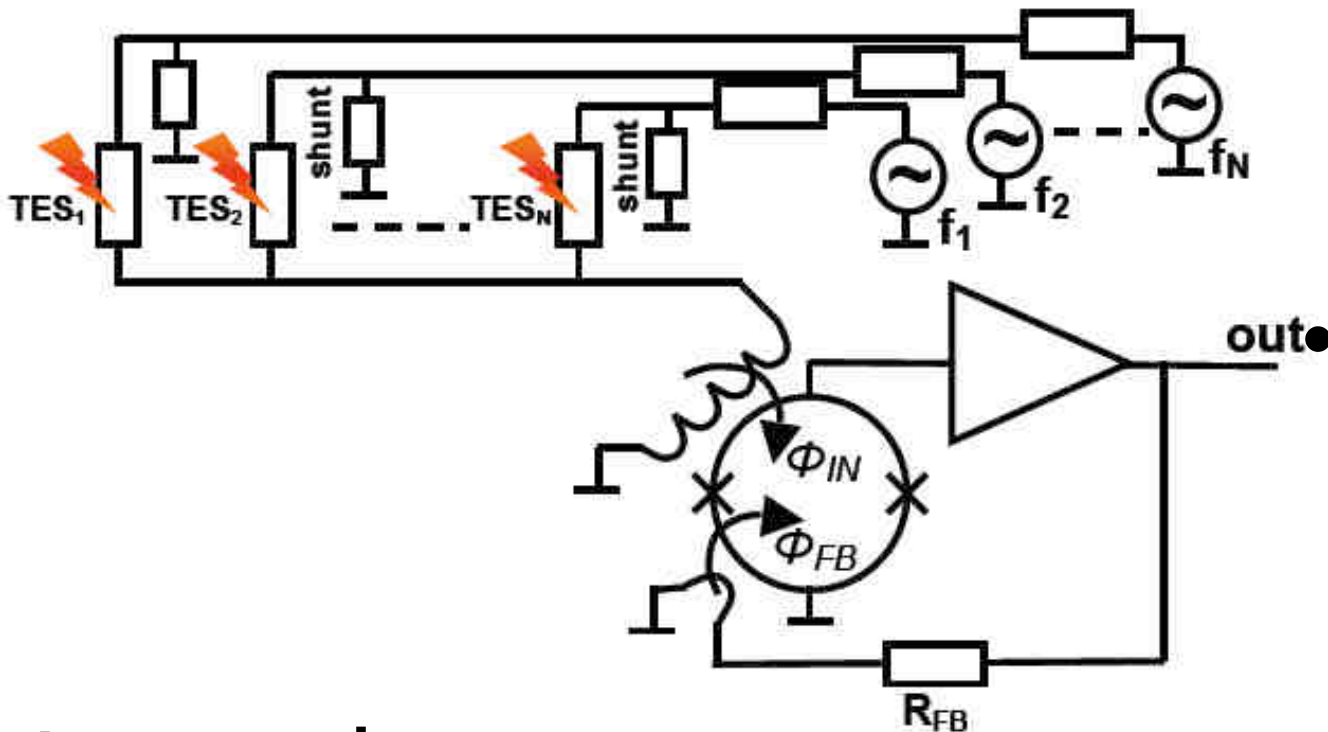
TD SQUID M

FD SQUID M

*Frequency-Division Superconducting QUantum
Interference Device Multiplexing*



Multiplexage fréquentiel à SQUID



FD SQUID M

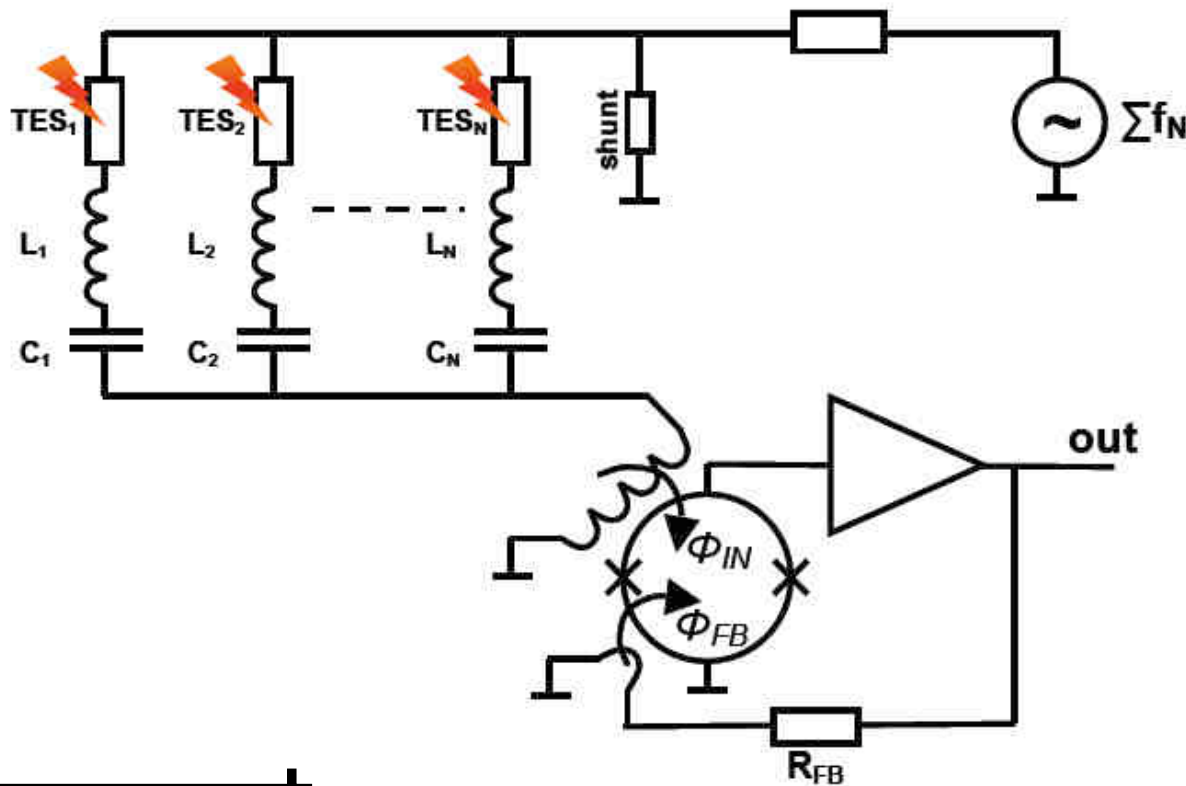
- Chaque détecteur (TES) est **polarisé par une porteuse** de fréquence différente
- **La somme** de ces porteuses modulés par les différents détecteurs traverse la **self d'entrée du SQUID**
- Le SQUID est placé dans une **FLL** à cause de la **forte dynamique** présentée à son entrée

Bilan de la réduction de fils :

$N \text{ SQUID/TES} = N \times 3 \text{ fils}$ (2bias, 1sortie et masse commune)

$Mux \ N/1 = N + 2 + 1 \text{ fils}$ (NbiasTES, 2biasSQUID et sortie unique)

Multiplexage fréquentiel à SQUID



FD SQUID M

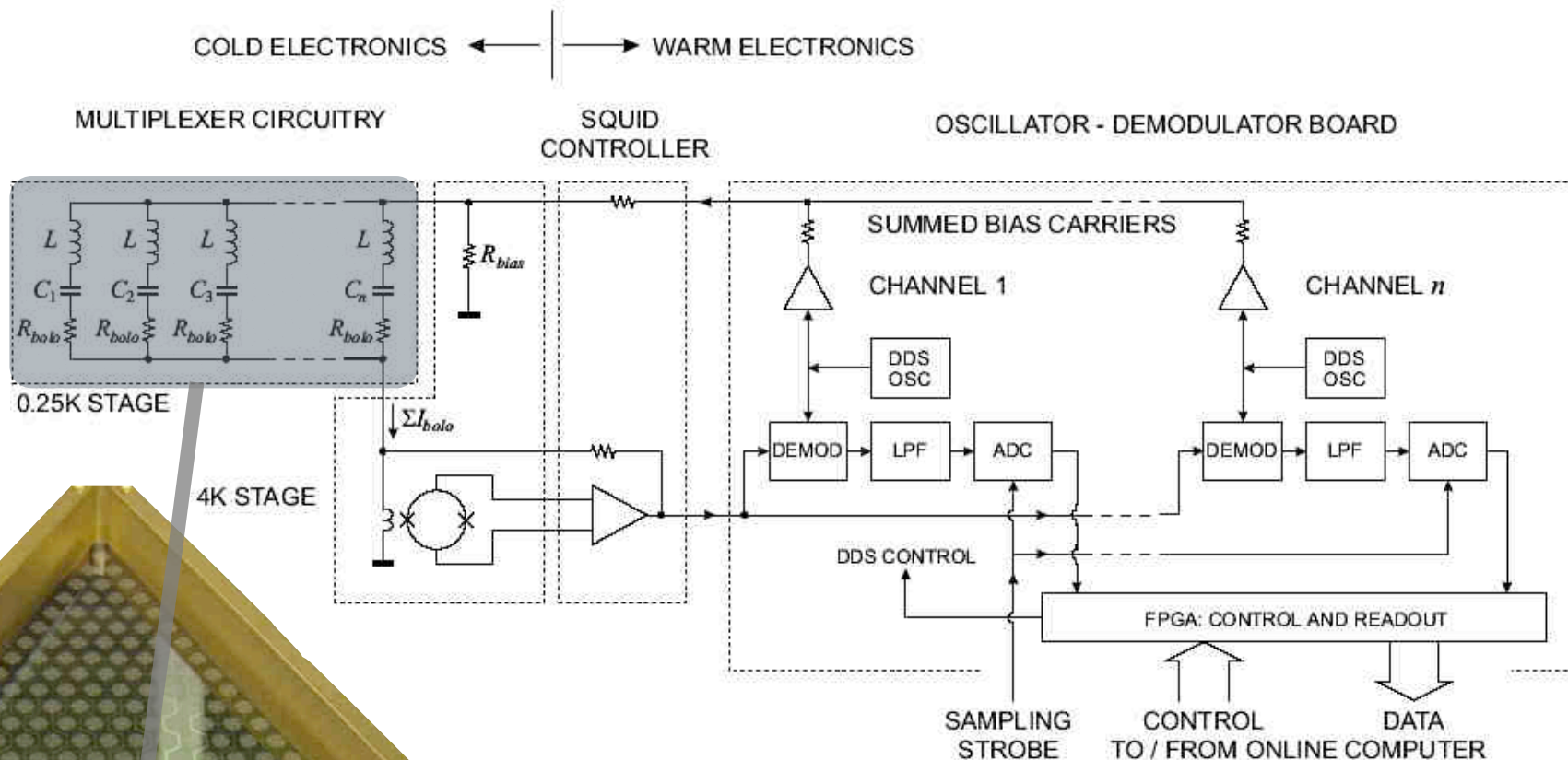
- On associe un **filtre sélectif (LC) différent!** à chaque détecteur (TES).
- On polarise l'ensemble par une **porteuse "composite"** comportant l'ensemble des fréquences d'excitations
- Chaque détecteur (TES) n'est polarisé que par une seule porteuse

Bilan de la réduction de fils :

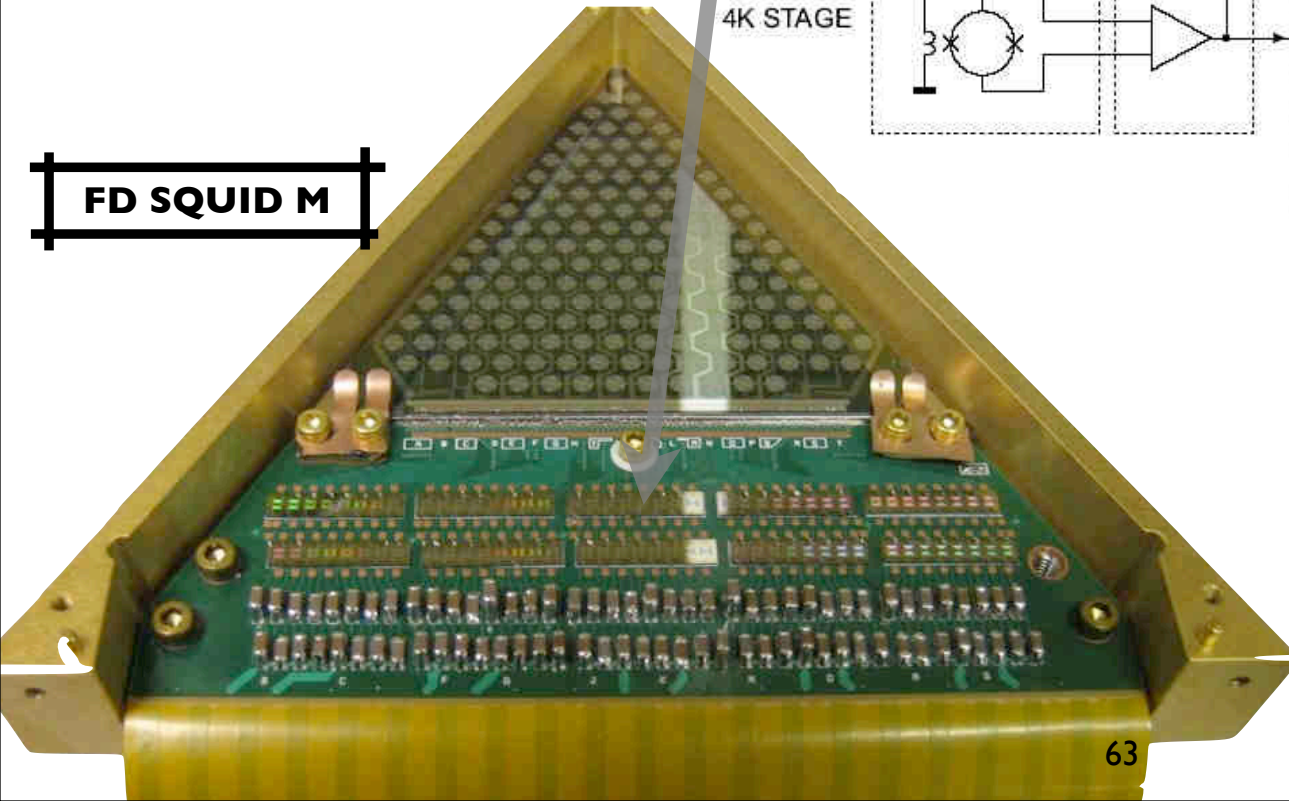
N SQUID/TES = $N \times 3$ fils (2bias, 1sortie et masse commune)

Mux $N/1 = 1+2+1$ fils (1biasTES, 2biasSQUID et sortie unique)

Multiplexage fréquentiel à SQUID

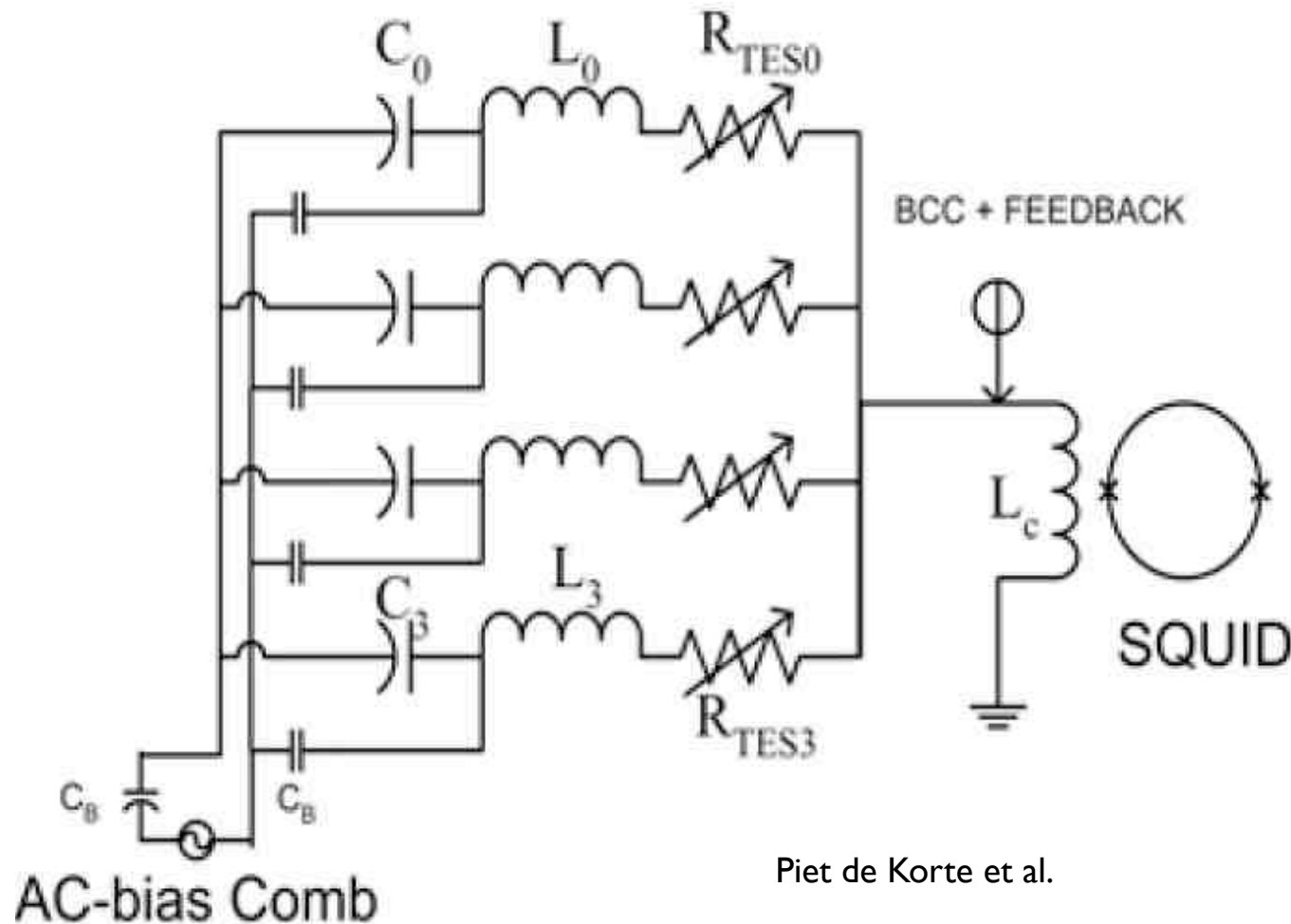


FD SQUID M

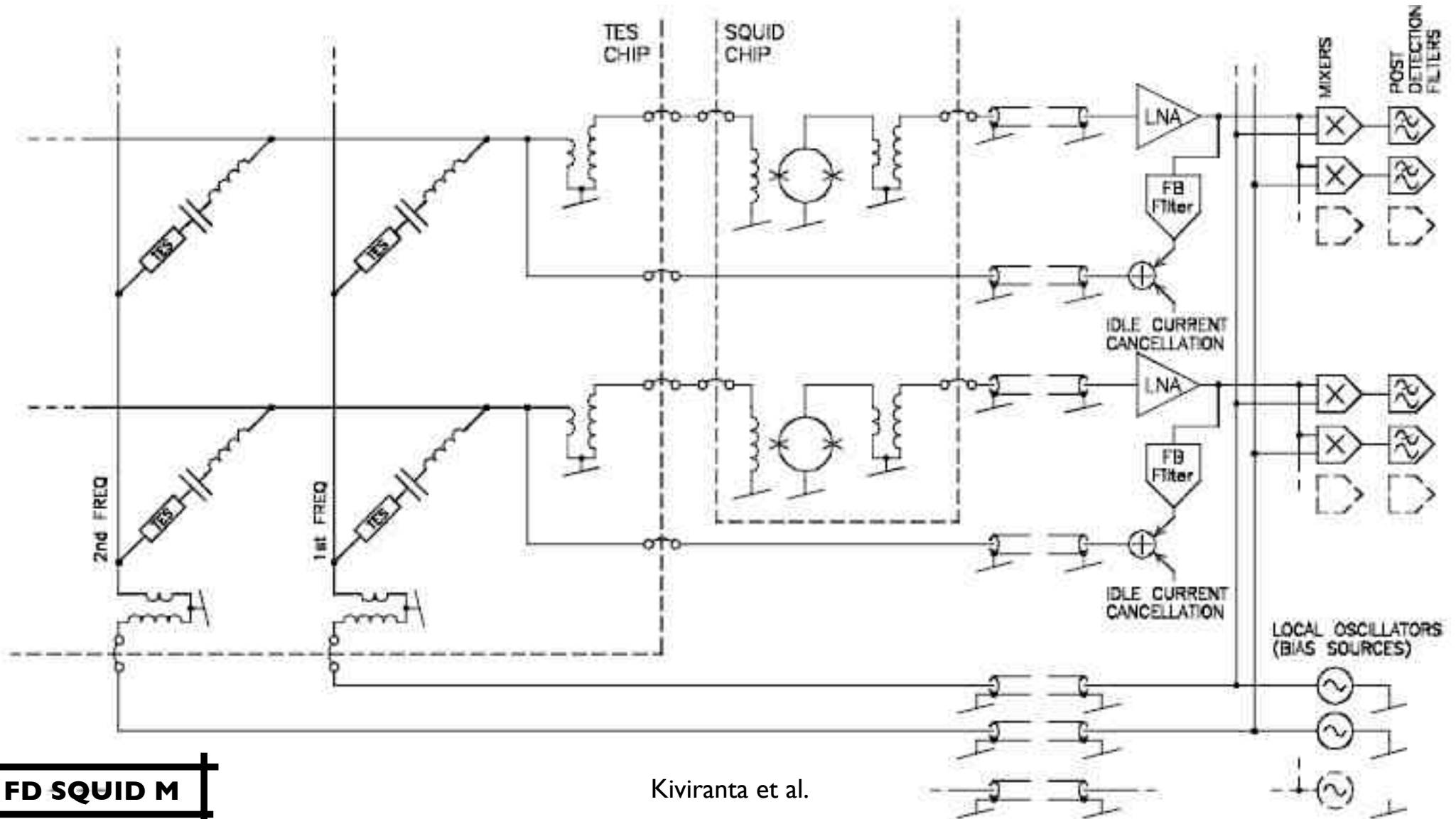


SPT - Chicago, Berkeley, JPL ... col.

Multiplexage fréquentiel à SQUID



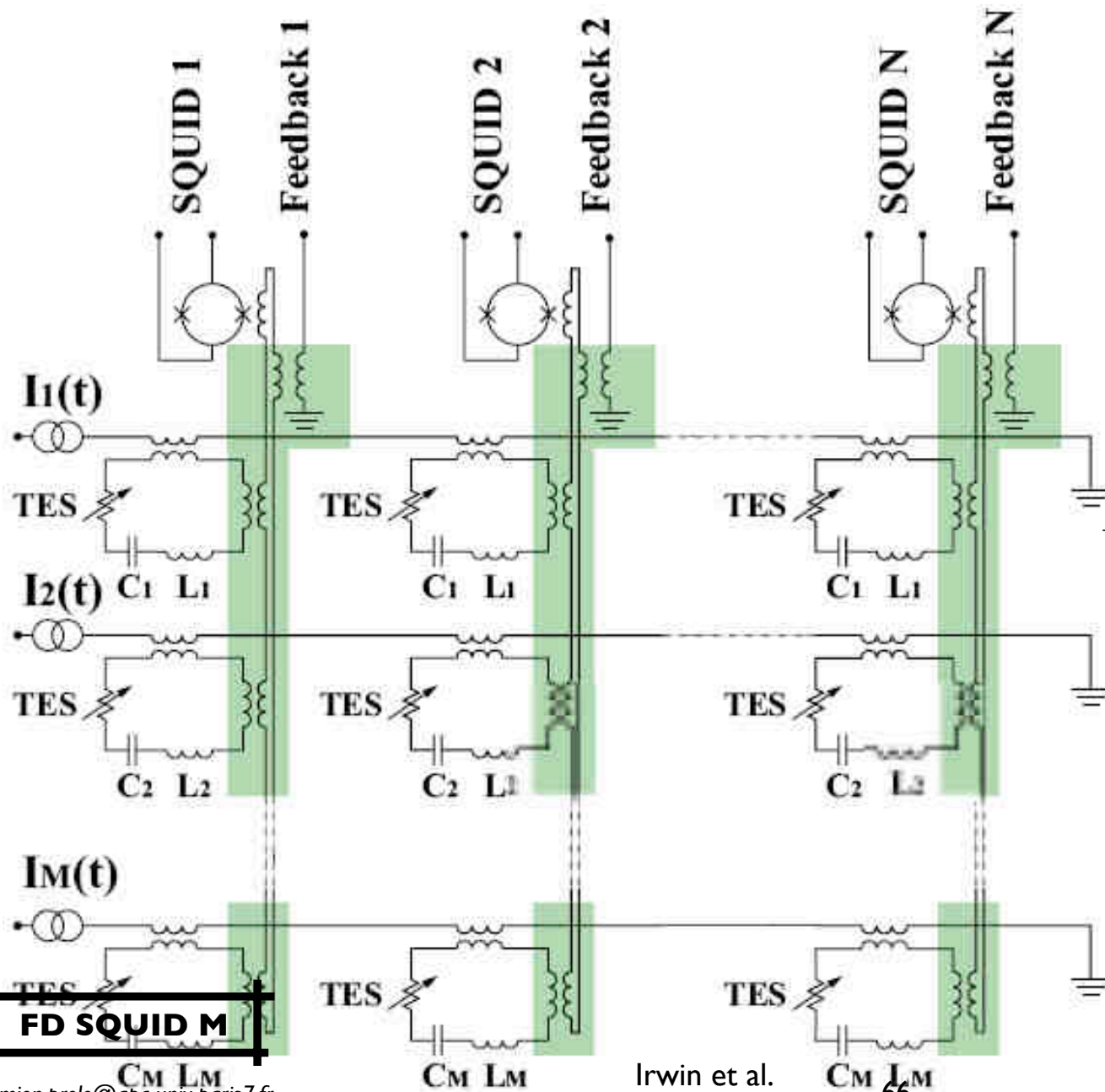
Multiplexage fréquentiel à SQUID à 2D



FD SQUID M

Kiviranta et al.

FDM à SQUID 2D



Bilan de la réduc. de fils :
 N SQUID/TES = $N \times 3$ fils

(2bias, 1sortie et masse commune)

$M \times N / 1 = M + 2 + N$ fils

(M bias TES, 2 bias SQUID commun et N SQUID)

FD SQUID M

Conclusion

☝ Les quatre commandements du multiplexage

cryogénique :

1. Fonctionnement cryogénique

2. Marge de bande passante $\propto 2N$

3. Marge de bruit $\propto \sqrt{N}$

4. Faible consommation

Le SQUID remplit ces quatres conditions pour la plupart des applications

Autres techniques de multiplexage

- **CCD** (transfert de charges : sorte de TDM) - *Pas cryo.?*
- **KIDs** (résonateur accordé : sorte de FDM)
- **RSFQ** (convertisseur analogique/numérique : multiplexage de signaux numérisés)
- **Association de différentes techniques**
(hybride TDM et FDM : *TDMA Reintsema et al.*)



Références

1. SQUID Sensors : Fundamentals, Fabrication and Applications, Harold Weinstock Ed., (1996)
2. D. Drung, « SQUID Electronics », SQUID Handbook, (2003)
3. K. D. Irwin, « SQUID multiplexers for transition-edge sensors », Physica C 368 (2002).
4. M. Kiviranta, « High dynamique range SQUID readout for frequency-domain multiplexers », LTD I 2, (2007)
5. J. Beyer et al., « A SQUID multiplexer with superconducting-to-normalconducting switches », Supercond. Sci. Technol. 21, (2008)
6. H. Spieler et al., « Frequency Domain Multiplexing for Large-Scale Bolometer Arrays », Far-IR, Sub-mm & mm Detector Tech. Workshop, (2002).
7. A.T. Lee et al, « Single-SQUID Frequency-Domain Multiplexing for Large Bolometer Arrays », (?)
8. F. Voisin, M. Piat, E. Bréelle, J-C. Hamilton, G. Gay ... merci

Annexe

```

n=double(2)^20 ;***nb de points sur une seconde***
nb=2^2 ;***nb de signaux***
fu=2^7 ;***frequence du signal utile***
fc=double(nb)*fu*2. ;***frequence d'Echantillonnage***
;*****temps et frequences*****
t=findgen(n)/n ;***durÉE sur une seconde***
f=[findgen(n/2),findgen(n/2)-n/2] ;***affichage en freq***
f[n/2:n-1]=shift(reverse(ff[0:n/2-1]),+1)
f[n/2]=n/2
;*****filtre*****
fcl=intarr(n) ;***filtre Ideal fcl***
fcl[0:fc-1]=1
fcl[n-fc:n-1]=1
ful=intarr(n) ;***fu***
ful[0:fu-1]=1
ful[n-fu:n-1]=1
;*****definition des signaux*****
sig=fltarr(n,nb,4) ;***0=sig, 1=sign, 2=ech, 3=sigech***
.r ;***Def : 0=sig, 1:sign***
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  sig[* ,i,0]=sin(2!*PI*fu*(10-(i+1))/30*t*(-1)^i)
  sig[* ,i,1]=shift(reverse(n*fft(fft(sig[* ,i,0]+1*randomn(seed,n))*ful,-1)),+1)
  ;sig[* ,i,1]=shift(reverse(n*fft(fft(sig[* ,i,0]+(i EQ 0)*randomn(seed,n))*1,-1)),+1)
ENDFOR
end
.r ;***Def : 2=ech***
FOR i=double(0),n-1 DO BEGIN
  FOR j=0,n/(2*fu)-1 DO BEGIN
    sig[i+ ,floor(j/(n/(2*nb*fu))),2]=1
  ENDFOR
  i--
ENDFOR
end
sig[* ,* ,3]=sig[* ,* ,1]*sig[* ,* ,2] ;***Def : 3=sigech***
;*****multiplexage*****
mux=fltarr(n)
.r
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  ;mux[* ,i]=sig[* ,i,3]
  mux[* ,i]=shift(reverse(n*fft(fft(sig[* ,i,3])*fcl,-1)),+1)
ENDFOR
end
;*****demultiplexage*****
demux=fltarr(n,nb)
.r
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  demux[* ,i]=mux*sig[* ,i,2]
ENDFOR
end
;*****sample and hold*****
sh=fltarr(n,nb)
.r
FOR i=double(0),n-1 DO BEGIN
  FOR j=double(0),n/(2*fu)-1 DO BEGIN
    FOR k=0,nb-1 DO BEGIN
      sh[i+j,k]=mean(demux[i+((k+0.)/nb)*n/(2*fu),i+((k+0.9)/nb)*n/(2*fu),k])
      ;sh[i+j,k]=demux[i+((k+0.5)/nb)*n/(2*fu)]
    ENDFOR
  ENDFOR
  i+=n/(2*fu)-1
ENDFOR
end
;*****filtrage*****
sigdemux=fltarr(n,nb)
.r
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  sigdemux[* ,i]=shift(reverse(n*fft(fft(sh[* ,i])*ful,-1)),+1)
ENDFOR

```

Pour simuler les effets du multiplexage Code IDL

```

n=double(2)^20 ;***nb de points sur une seconde***
nb=2^2 ;***nb de signaux***
fu=2^7 ;***frequence du signal utile***
fc=double(nb)*fu*2. ;***frequence d'Echantillonnage***
;*****temps et frequences*****
t=findgen(n)/n ;***durÉE sur une seconde***
f=[findgen(n/2),findgen(n/2)-n/2] ;***affichage en freq***
f[n/2:n-1]=shift(reverse(ff[0:n/2-1]),+1)
f[n/2]=n/2
;*****filtre*****
fcl=intarr(n) ;***fcl***
fcl[0:fc-1]=1
fcl[n-fc:n-1]=1
ful=intarr(n) ;***ful***
ful[0:fu-1]=1
ful[n-fu:n-1]=1
;*****definition des signaux*****
sig=fltarr(n,nb,4) ;***0=sig, 1=sign, 2=ech, 3=sigech***
.r ;***Def : 0=sig, 1:sign***
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  sig[* ,i,0]=sin(2!*PI*fu*(10-(i+1))/30*t*(-1)^i)
  sig[* ,i,1]=shift(reverse(n*fft(fft(sig[* ,i,0]+1*randomn(seed,n))*ful,-1)),+1)
  ;sig[* ,i,1]=shift(reverse(n*fft(fft(sig[* ,i,0]+(i EQ 0)*randomn(seed,n))*1,-1)),+1)
ENDFOR
end
.r ;***Def : 2=porteuse***
FOR i=double(0),nb-1 DO BEGIN
  sig[* ,i,2]=sin(2!*PI*2*fu*t*(i+1))
ENDFOR
end
sig[* ,* ,3]=sig[* ,* ,1]*sig[* ,* ,2] ;***Def : 3=sigech***
;*****multiplexage*****
mux=fltarr(n)
.r
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  mux[* ,i]=sig[* ,i,3]
  ;mux[* ,i]=shift(reverse(n*fft(fft(sig[* ,i,3])*fcl,-1)),+1)
ENDFOR
end
;*****demultiplexage*****
demux=fltarr(n,nb)
.r
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  demux[* ,i]=mux*sig[* ,i,2]
ENDFOR
end
;*****filtrage*****
sigdemux=fltarr(n,nb)
.r
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
  sigdemux[* ,i]=shift(reverse(n*fft(fft(demux[* ,i])*ful,-1)),+1)
ENDFOR
end

```