

La physique des Oscilloscopes Digitaux

François Lamarche,
Test Engineering Manager,
LeCroy Corporation
« Innovators in Instrumentation »

Ce que vous connaissez déjà de LeCroy

- Modules logique rapide NIM
- Modules CAMAC (TDC, QADC, ...)
- Modules FASTBUS, VME, Sources hautes tensions.
- Un musée dans une étagère à Chestnut Ridge, maintenant...

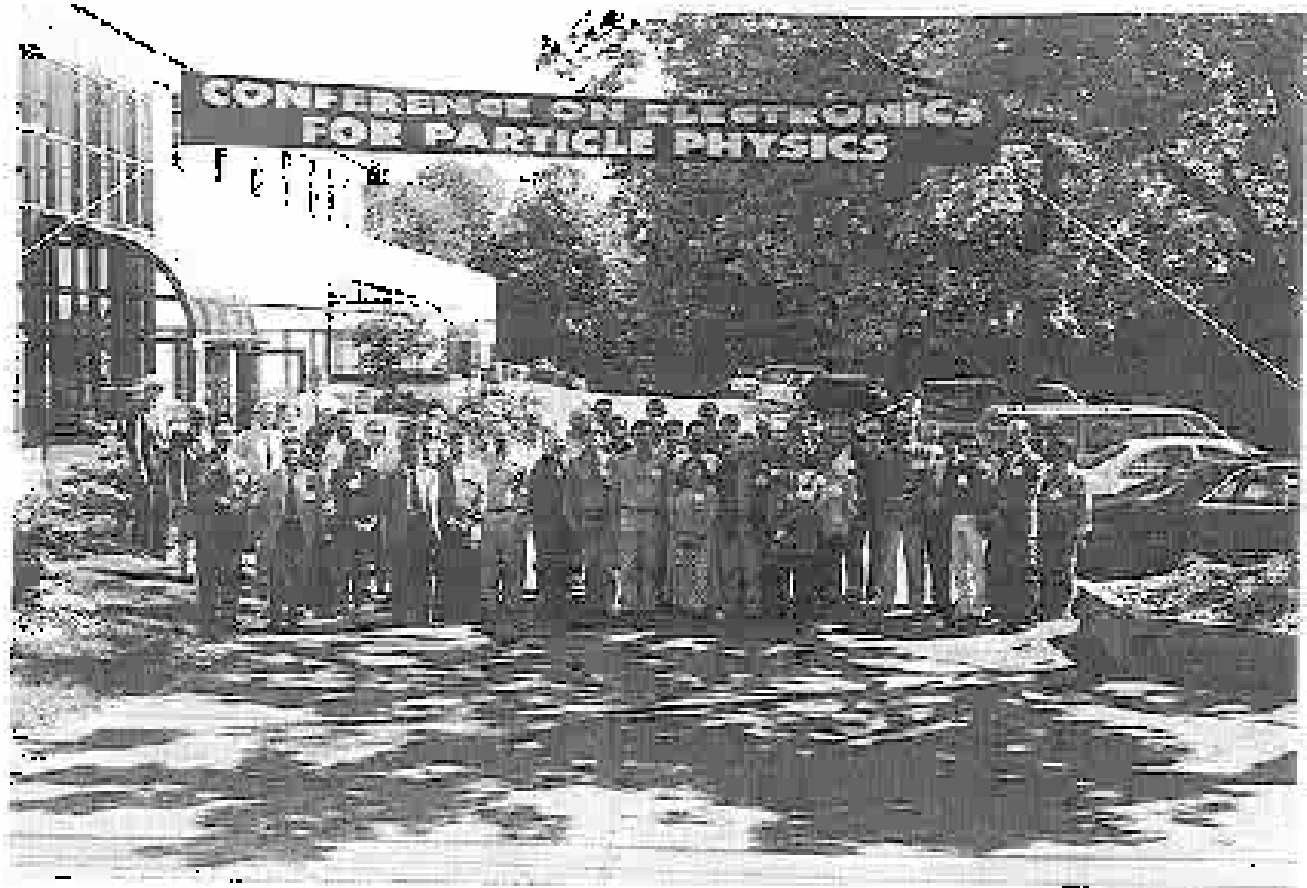


Le lien avec la physique

- Historique: fondation par Walter LeCroy, (physicien de Columbia) 1964. Mesure de quantités physiques (QDC, TDC)
- Durant l'évolution, évident: lien de LRS avec les expériences de physique des hautes énergies des années 1960, 1970, 1980.
- Important: le lien avec le CERN, et la division genevoise produisant *l'oscilloscope digital* en 1986 (R. Chevalier), à partir du CAN/ADC 8 bit.

Changement depuis 1998 (arrêt du développement LRS)

→ Mais toujours à la pointe de la technologie & de l'innovation.



Le lien avec la physique continue...

Après conférences
collisionneurs...

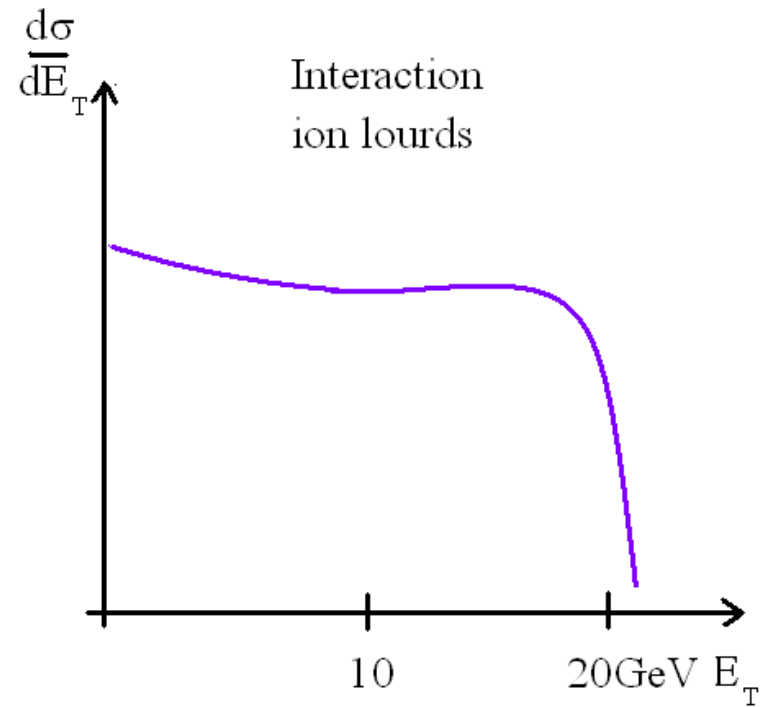
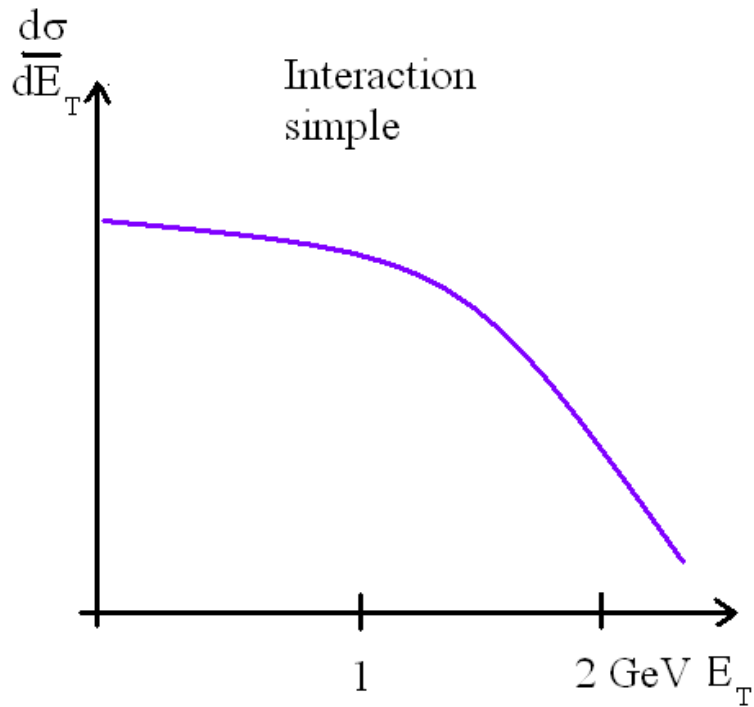
- Des liens OPAL (J. Richstein, F. Lamarche),
CERN/PPE (J.L. Lehmann)..
- Columbia chair...



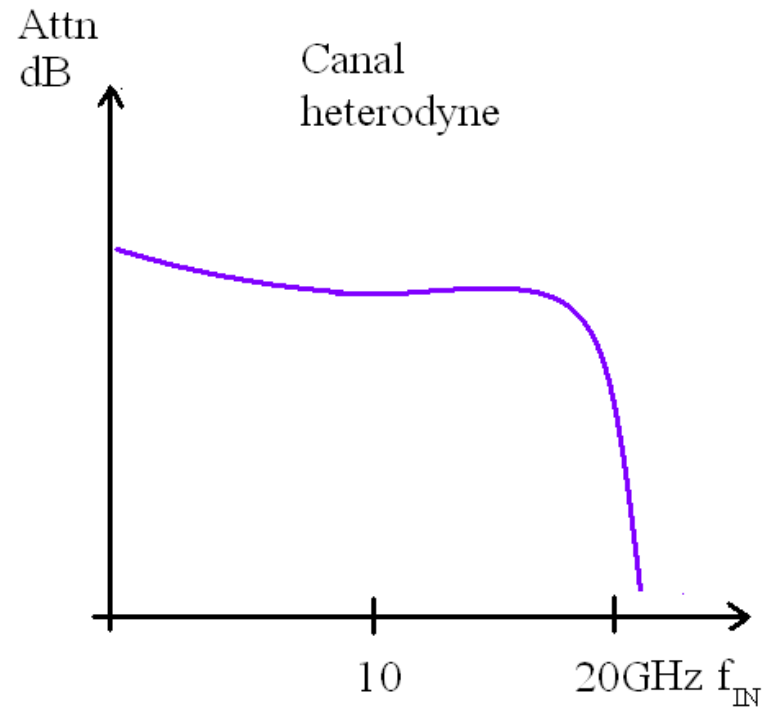
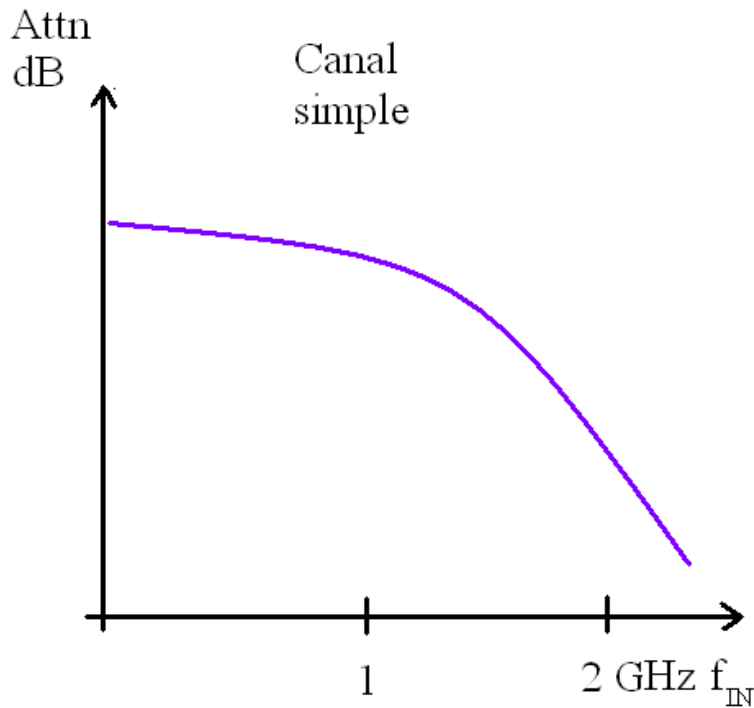
... mais les horizons sont nouveaux

- Le Giga Hertz remplace le GeV !
- Dans ce contexte, les réseaux télécom haute performance remplacent les accélérateurs
 - Horizon de: bande passante élevée
 - Horizons de temps très précis:
 - Horodatage et gigue
 - Horizon de modélisation de « deembedding »
 - *Horizon futurs? modèles propagation non linéaire*

A propos d'analogies...



A propos d'analogies...



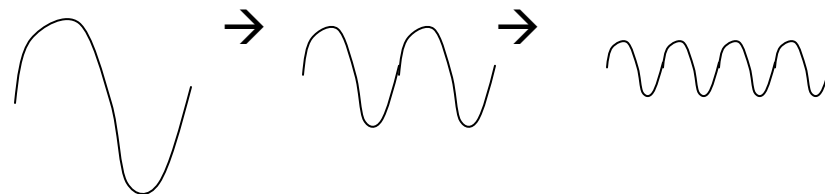
Évolution de la bande passante des oscilloscopes à échantillonnage en temps réel.

- La loi de Moore (industrie de l'électronique/télécommunications):
doublements de la densité de composant par circuit chaque deux ans

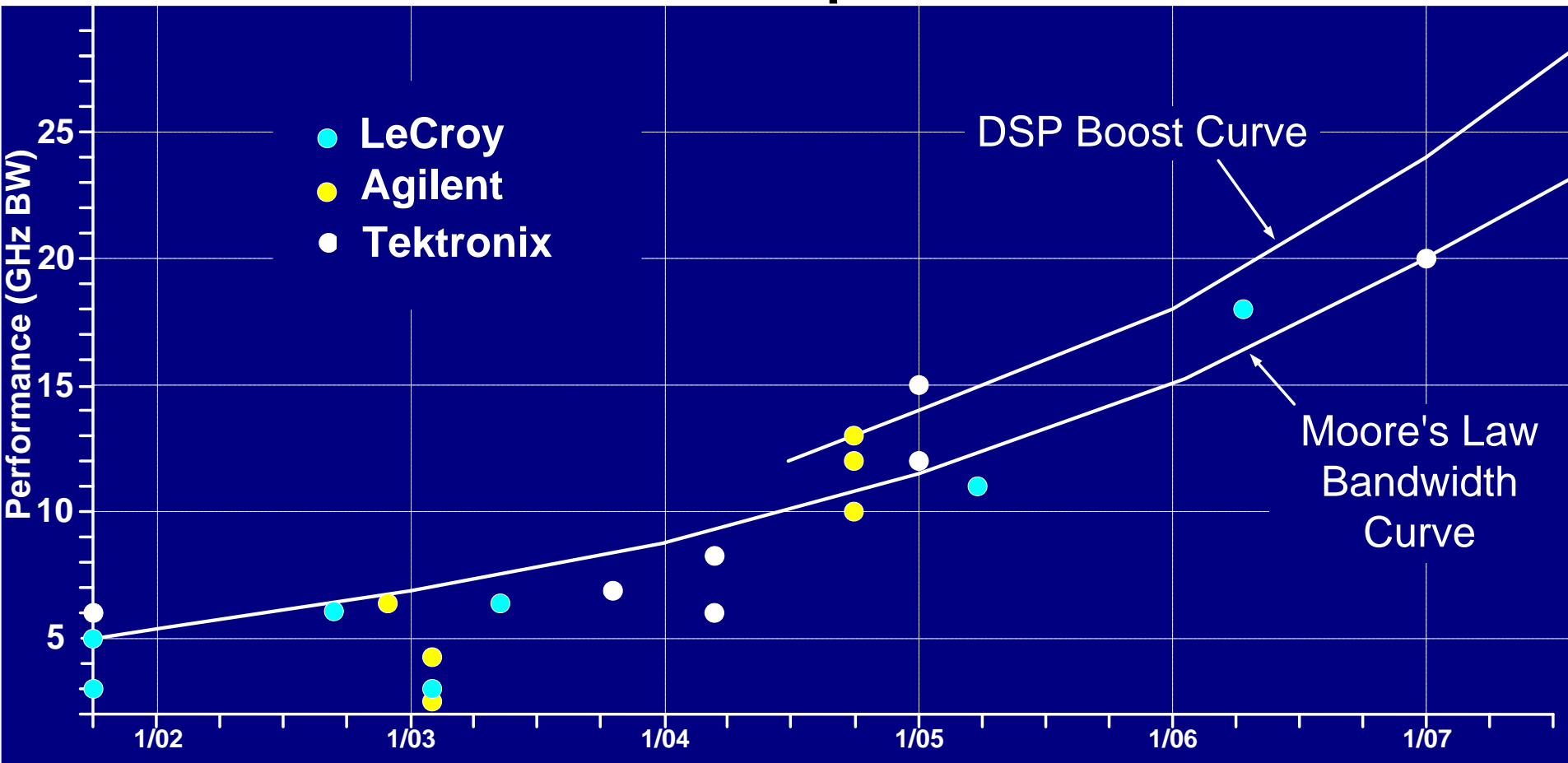


- Appliquée aux oscilloscopes:
la taille typique d'un composant diminue par un facteur $2^{1/2}$ chaque deux ans
(facteur deux tous les quatre ans)... mais...
la capacité C d'un transistor diminue par un facteur 2 chaque deux ans
→→ La bande passante d'un oscilloscope fabriqué avec une technologie ou
fabriqué pour analyser une technologie donnée augmente entre ces bornes.

- Loi de Moore de la bande passante des oscilloscopes:
doublement tous les 3 ans.



Tendances Bande passante oscillos



- Doublement tous les trois ans
- Coût de l'instrument (&développement→20M) croît exponentiellement (OK: ça suit le marché)

L'accroissement de la bande passante se heurte à des défis sérieux

- La limite du bruit thermique
- La limite de la dissipation de chaleur
- La limite des pertes diélectriques & effet de peau

La limite du bruit thermique

A l'ambiante, le mouvement brownien des électrons finit par devenir visible.

ou:

$R_L = 50$ Ohms

k = constante de Boltzmann

$T \approx 300$ K

$$V_{rms} = \sqrt{4kTR_L f_{BW}}$$

On écrit encore:

$P(\text{dBm}) = -174 + 10 \log(\text{BW})$

A une bande passante de 250GHz, 8 bit devient impossible avec 10mV/div.

Donc, à partir de 2018 (dans 10 ans) pour chaque doublement de la bande passante, soit 3dB de gamme dynamique ou $\frac{1}{2}$ bit effectif est perdu.

Facteurs aggravants...

Perdre l'échelle la plus sensible dans 10 ans ne semble pas si préoccupant ...sauf que:

- La résistance effective est typiquement plus que 50Ohms et plusieurs bruits sont combinés (réponse DC de l'oscillo: ~"op-amps")
- La température est plutôt 400K que 300K
- Plusieurs échelles sont produites via atténuateurs, facteur de bruit=atténuation.
- Le progrès de l'électronique se fait en *diminuant* la course en voltage des signaux logiques

La limite de la dissipation de chaleur

- Pour maintenir l'impédance caractéristique de 50 Ohms, et une échelle de voltage de l'ordre du volt, chaque transistor bipolaire doit dépenser 20mW.
- A mesure que le transistor rapetisse, la densité de puissance par unité de surface augmente.
- La densité a du être arbitrairement limitée (c.à.d. la surface augmentée) dans les derniers circuits développés par LeCroy pour accommoder les techniques « standard » de refroidissement à l'eau, $\sim 50W / cm^2$

La limite des pertes diélectriques

- Câble “coaxial/semi-rigide/semi flexible”
40GHz→60→110GHz, il devra rapetisser en dessous des diamètres standards pour éviter les modes de transmissions non désirés.
- Effet de peau pertes proportionnelles $f^{1/2}$
- Coax pas rempli de vide: recherche de matériaux à faibles pertes diélectriques devient essentiel. Effet de $\tan\theta$ (composante imaginaire de la constante diélectrique) proportionnel à f .
\$\$\$
- $D(\text{sonde, canal}) \ll 1\text{m}$ ($\rightarrow 10\text{ cm...}$).

Techniques pour contourner les limites

- Le filtrage numérique (« dsp »)
- L'oscilloscope hétérodyne
- CIS (à discuter si le temps permet).
Atteindre 110GHz en pseudo temps réel.
- Les CAN à effet Josephson (pas dans nos plans présentement, mais on a déjà le code Gray).

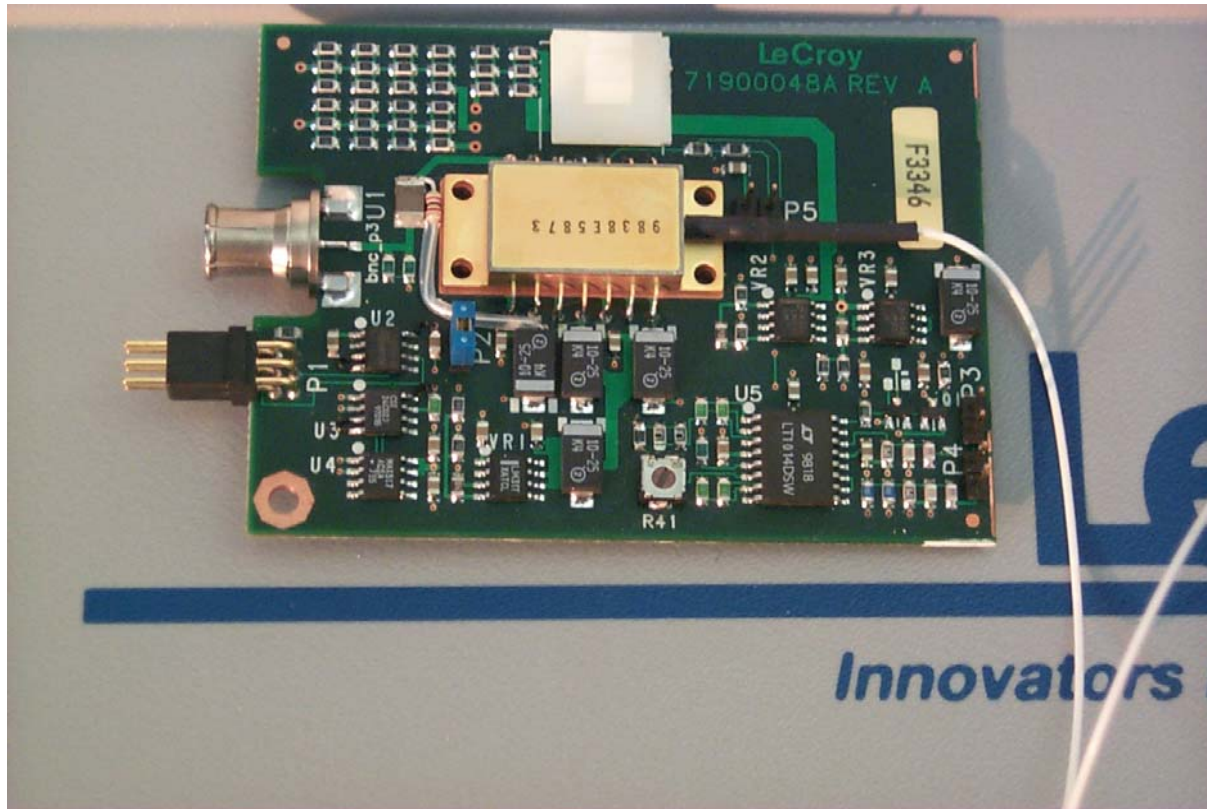
Le Filtrage numérique

- Mis en oeuvre par votre serviteur (1999) dans la sonde optique OE325, pour obtenir un récepteur de référence conforme à UIT-957 pour OC-3/OC-12. (→OC-48, etc...)
- La forme idéale est le filtre Bessel-Thompson de quatrième ordre.

$$T = \frac{105}{105 + 105i\omega / \omega_0 - 45\omega^2 / \omega_0^2 - 10i\omega^3 / \omega_0^3 + \omega^4}$$

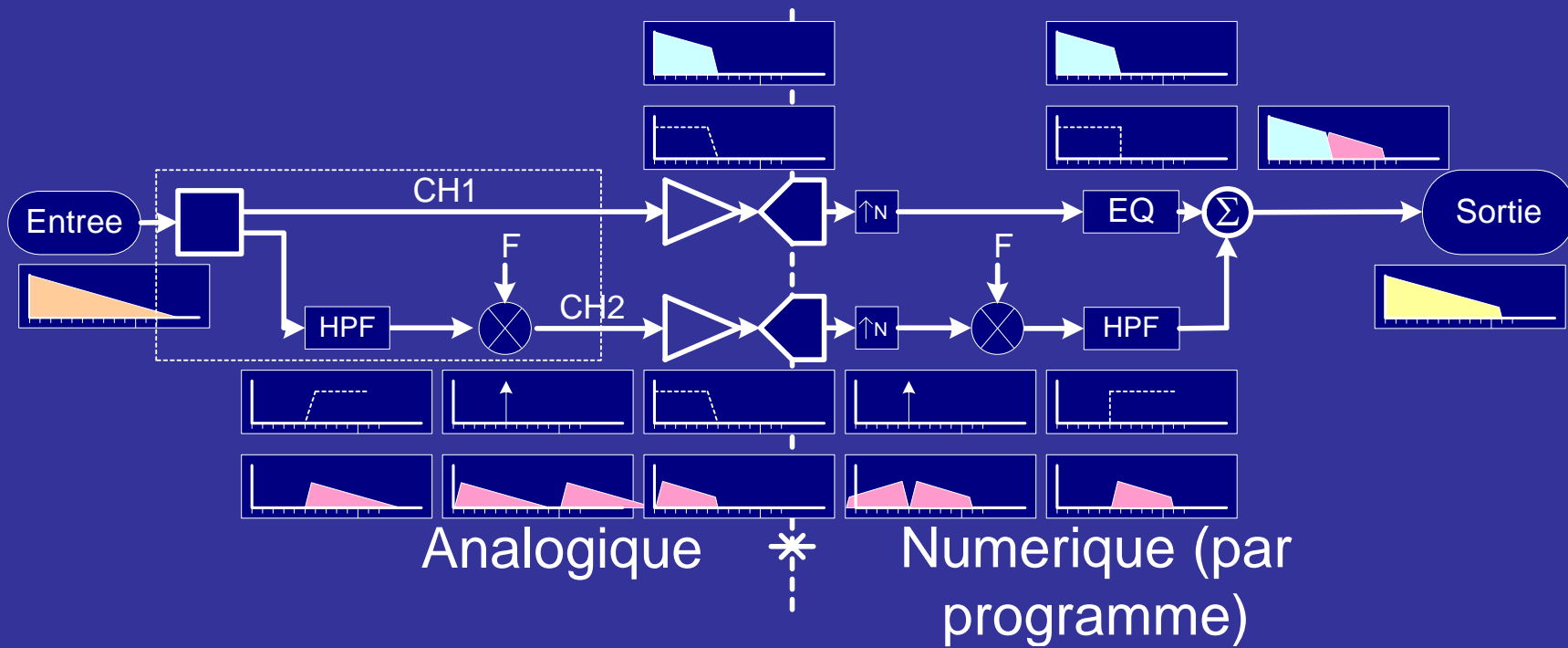
- Pour une fonction escalier à l'entrée, le dépassement est vraiment très petit (<1%). Approximation successives gaussienne.
- Un filtre typique pourrait avoir 256 bouchons, convolution FIR d'un filtre annulant la réponse (imparfaite) du canal et de la sonde, et d'un filtre assurant Bessel-Thompson
- Certains (ab)usent de cette technique pour vendre comme 20GHz un oscilloscope 16GHz...
- Filtre(canal&sonde) =? Filtre(canal) \oplus convolution \oplus Filtre(sonde)
Pas toujours...voir à la suite...

Récepteur de référence UIT-957 pour OC-12



L'oscilloscope hétérodyne

- 2000: ingénieur LeCroy réalise:
possible d'employer le régime linéaire d'un Mélangeur micro-onde pour repositionner une ou des plages de fréquences « normalement trop haute » de façon à les rendre accessible via un autre canal.
- Grâce au brevet d'invention de DBI (2003), une bande passante de 18GHz a été obtenue sur un oscilloscope permettant normalement 6GHz de bande passante
(record, 2006, pour oscilloscope « temps réel »)



SDA11000 (2004)

- Deux groupes de deux canaux
- Dans chaque groupe,
Deux canaux à 6GHz
Ou
Un canal à 11GHz



SDA18000 (2006)

- Canal 1, 18GHz & canal 4, 6GHz

Ou

- Canal 1, 11GHz & canaux 3 et 4, 6GHz

Ou

- Quatre canaux à 6GHz



SDA13000 (2007)

- Même idée que le SDA11000 (mais $13 > 2 \times 6$)
- En mieux: 2GHz de plus (attaque directe CAN, synchronisation sans perte de gamme dynamique), moins de bruit...
- Vient de sortir...
- Nouveau brevets...

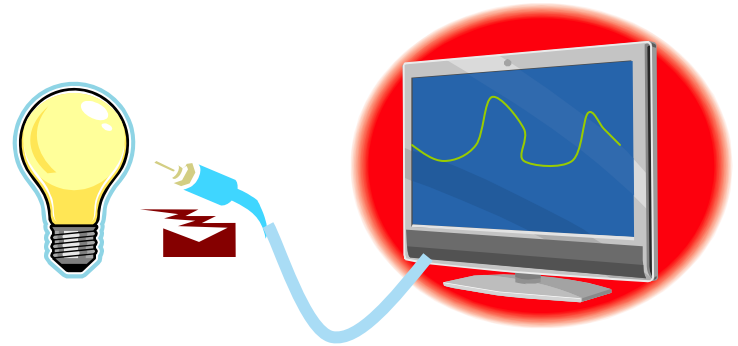


Combien de bande passante soutient un canal hétérodyne?

- Un canal de taux d'échantillonnage F_s peut « porter » $F_s/2$
- Un canal hétérodyne regroupant N canaux peut « porter » $N F_s/2$
- Le pourquoi et le comment?
→ US patent 7304597, 4-dec-2007, de votre serviteur, 50 pages

Un vieux rêve de physicien...

- Voir l'onde électromagnétique de la lumière affichée sur un écran d'oscilloscope
- Possible avec l'oscilloscope hétérodyne. (avant 2030 ...Moore 3THz ... IR lointain)
 - Diplexeur → prisme
 - Mixer → modem optique
- Déjà possible (sur bande étroite)
- Oui, mais quel marché?



... demain peut-être un réalité?

- LeCroy a déjà un brevet pour l'idée inverse: générer un signal complexe de haute fréquence en mélangeant des sinusoïdes hautes fréquences avec des signaux AWG basse fréquence
- Avec la technologie des défecteurs acousto-optiques, le HAWG déjà possible...
- Un marché: la biophysique des attosecondes?
- Limitation: mode spatial unique...

→ Horizon nouveau: Mesure très précise du temps

- Mesures absolues.

Grâce à GPS, possible d'asservir les horloges d'oscilloscopes aux meilleures horloges atomiques (p.e. NIST) (« volant » donne 30 minutes d'autonomie en cas perte signal).

Le système d'horodateur permet de localiser chaque déclenchement précisément.

(pour les amateurs... utilise « time stretcher »)

Ex: Si un oscilloscope Lecroy était ainsi monté, pourrait aider à mesurer le temps de vol des neutrinos de SN 1987A

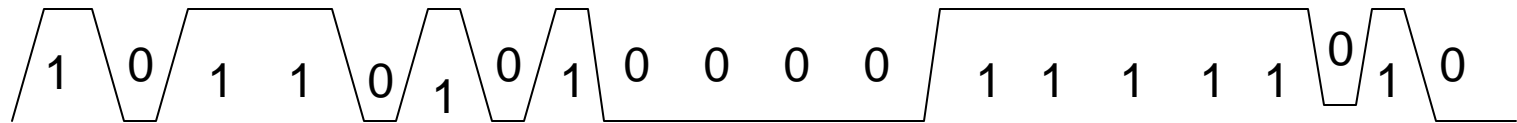
→ Mesure très précise du temps

- Mesures relatives

Lors de la transmission de données, une longue séquence de « 1 » peut modifier l'indice de réfraction d'une fibre optique.

Le flanc suivant est retardé ou avancé.

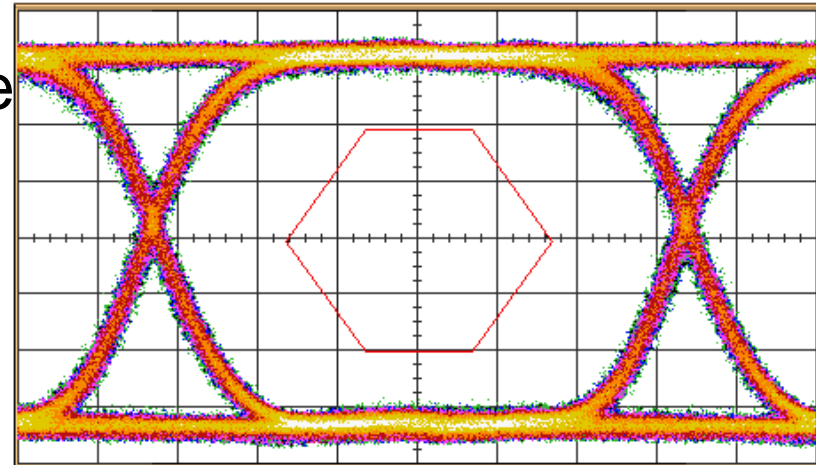
La position du flanc est soumis a une « gigue » (pseudo) aléatoire.



- Le diagramme de l'œil montre l'étendue de la gigue.

Diagramme de l'oeil

- Voltage en fonction du temps “cyclique” sur des milliers de cycles.
- Logiciel de boucle de verrouillage de phase.
- La transition entre les deux états se fait parfois, parfois pas
- Composante purement aléatoire de la gigue: temps de montée ($\sim 0.4 / \text{bande passante}$) multiplié par le bruit vertical, divisé par la course verticale. $1/100 (0.4/13\text{GHz}) \rightarrow 300 \text{ fs}$.
- Composante non aléatoire (dépend de l'histoire récente)



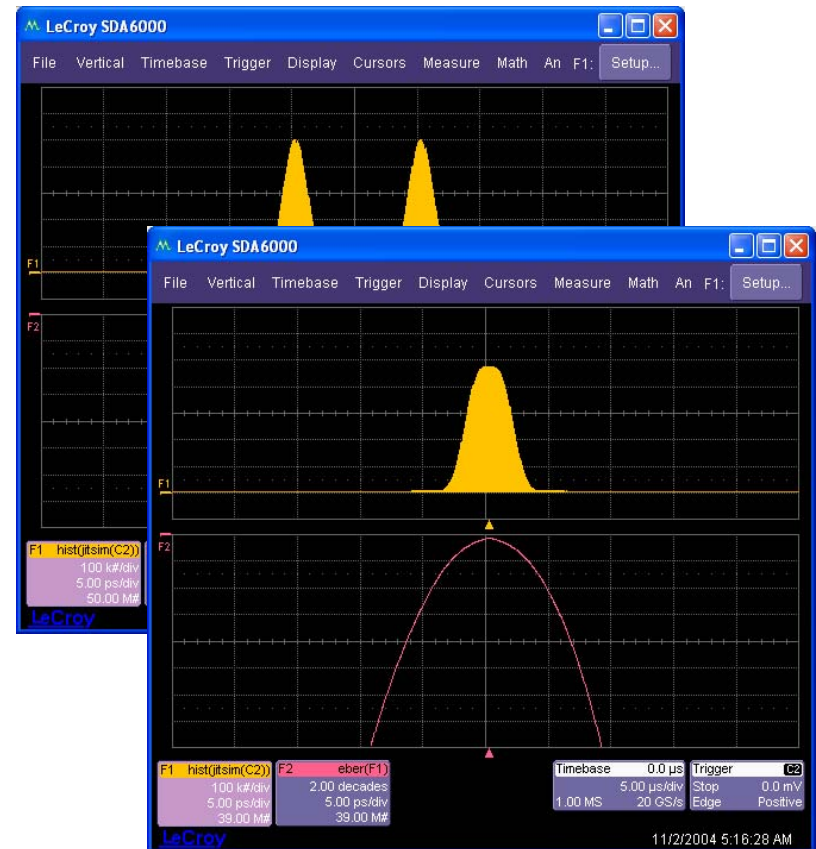
Analyse de la gigue – M. Miller et al.

- Un paquet de logiciel identifie les composantes aléatoires et déterministes de la gigue.
- Les erreurs aléatoires obéissent au théorème de la limite centrale, et s'additionnent sous la racine carrée. Les queues sont gaussiennes.
- Les erreurs non aléatoires s'additionnent linéairement.
- Il est ainsi possible de prédire marge pour BER à 10^{-13} sans attendre 10^{13} bits... et ça marche...!

The Bathtub curve

- Dual-Dirac convolved with Gaussian Model
- The extrapolated T_j curve (width gives T_j) from same
- “Heuristic” Jitter is based on this model
- And only for $D_j \gg R_j$

$$T_j = D_j + \alpha(BER) \cdot R_j$$



→ Horizon nouveau: modélisation

- Pourquoi ...

$$\text{Filt}(\text{sonde}\&\text{canal}) \neq \text{Filt}(\text{sonde}) \otimes \text{Filt}(\text{canal})$$

?

Parce que la sonde a quatre paramètres S,
et le canal, deux...!

→ Description paramètres S ←

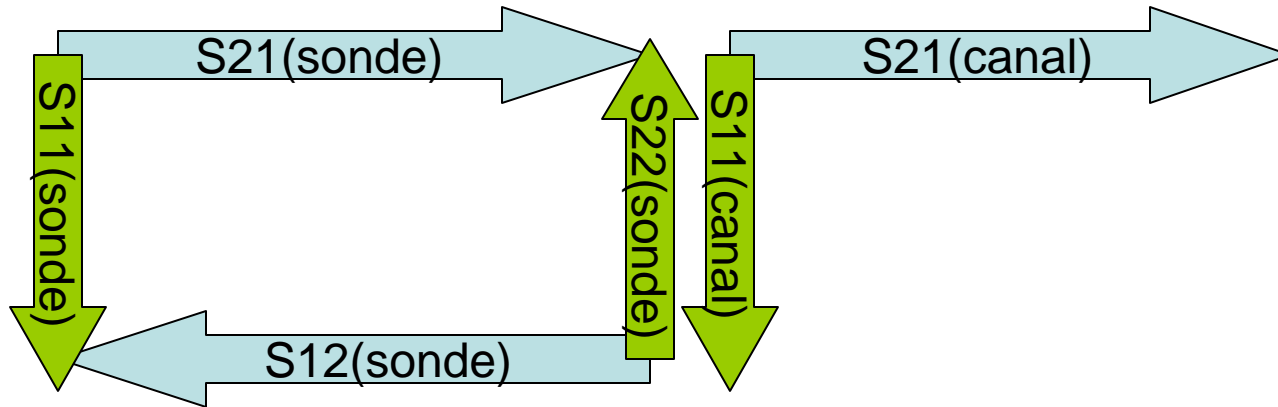
Physique des parametres S

Comme en physique des particules,
causalite:

dispersion \leftrightarrow absorption ...

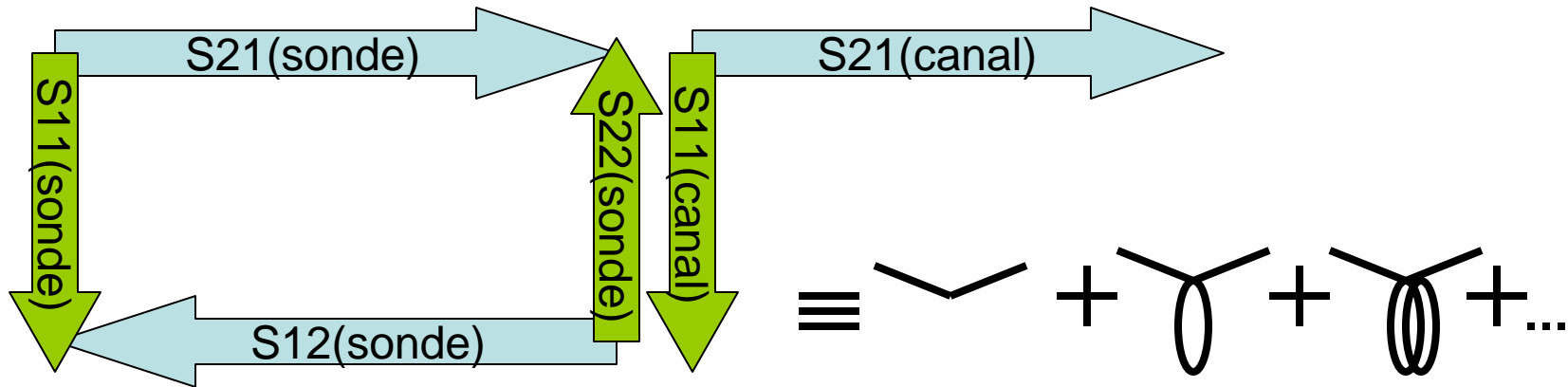
... aussi, comme en M.Q., principe: on ne
peut sonder sans affecter le circuit!

...modélisation



- Naivement, la fonction de transfert
$$= S_{21}(\text{sonde}) \otimes S_{21}(\text{canal})$$
- Mais il faut aussi considérer... etc...
$$S_{21}(\text{sonde}) \otimes S_{11}(\text{canal}) \otimes S_{22}(\text{sonde}) \otimes S_{21}(\text{canal})$$
- Somme globale
$$S_{21}(\text{sonde}) S_{21}(\text{canal}) / (1 - S_{11}(\text{canal}) S_{22}(\text{sonde}))$$

...modélisation



- Naivement, la fonction de transfert

$$= S_{21}(\text{sonde}) \otimes S_{21}(\text{canal})$$

- Mais il faut aussi considérer... etc...

$$S_{21}(\text{sonde}) \otimes S_{11}(\text{canal}) \otimes S_{22}(\text{sonde}) \otimes S_{21}(\text{canal})$$

- Somme globale

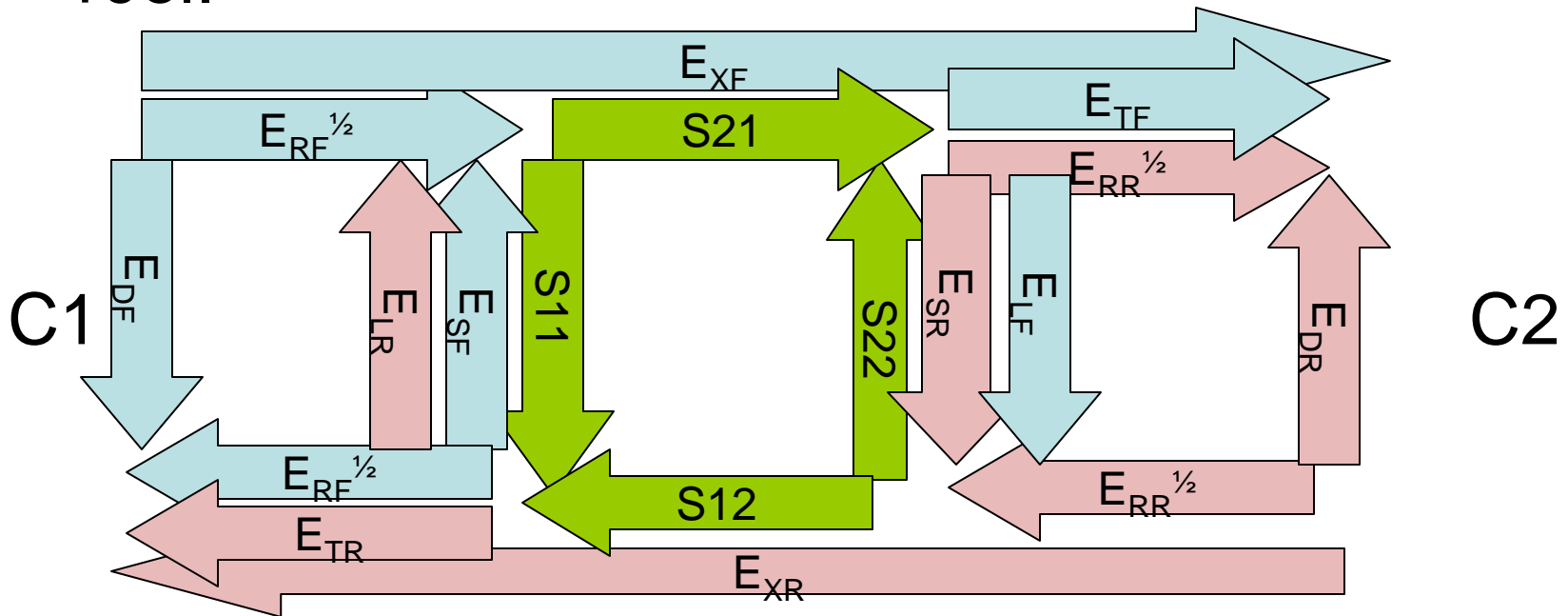
$$S_{21}(\text{sonde}) S_{21}(\text{canal}) / (1 - S_{11}(\text{canal}) S_{22}(\text{sonde}))$$

Nouvelles possibilités

- simuler (HFSS) champs électromagnétiques → paramètres S du circuit en interaction avec la sonde (fichier « Bell »)
- Simuler: champs, voltages & courants à chaque point. → afficher ces traces calculées à partir mesures oscilloscope.
- Simuler: Quels seraient champs, voltages & courants sans la sonde → afficher...
- Trouver: fonction de transfert
= œil(observé)/œil(idéal)
&appliquer l'inverse: sondage virtuel, « eye doctor », « virtual probing ».

L'ultime "deembedding"

- Si chaque canal contient un générateur d'impulsion, on pourrait avoir une combinaison Analyseur de réseaux (N.A.)/oscilloscope temps réel.



Peut-on retrouver les paramètres S du sujet à partir des paramètres S mesurés?

Solution (de Groot, Pupalaiakis, Wittwer)

- Les termes bleus sont trouvés lors d'une première calibration OSLT (F pour avant)
- Les termes roses sont trouvés lors d'une seconde calibration OSLT (R pour arrière)
- On peut alors résoudre pour les termes inconnus verts du sujet de l'expérience
- L'équation est apparemment du second degré alors que la solution est unique. En fait, la deuxième solution est non physique.
- La solution Pupalaiakis (LeCroy) / Wittwer (Uni Genève): démontrée & généralisable à N ports.

Utilisation optimale des données: prise en compte contraintes Physique

- Passivité

Si l'on **sait** qu'il n'y a pas d'amplification, on peut imposer cette contrainte dans le calcul des meilleurs paramètres S .

- Causalité

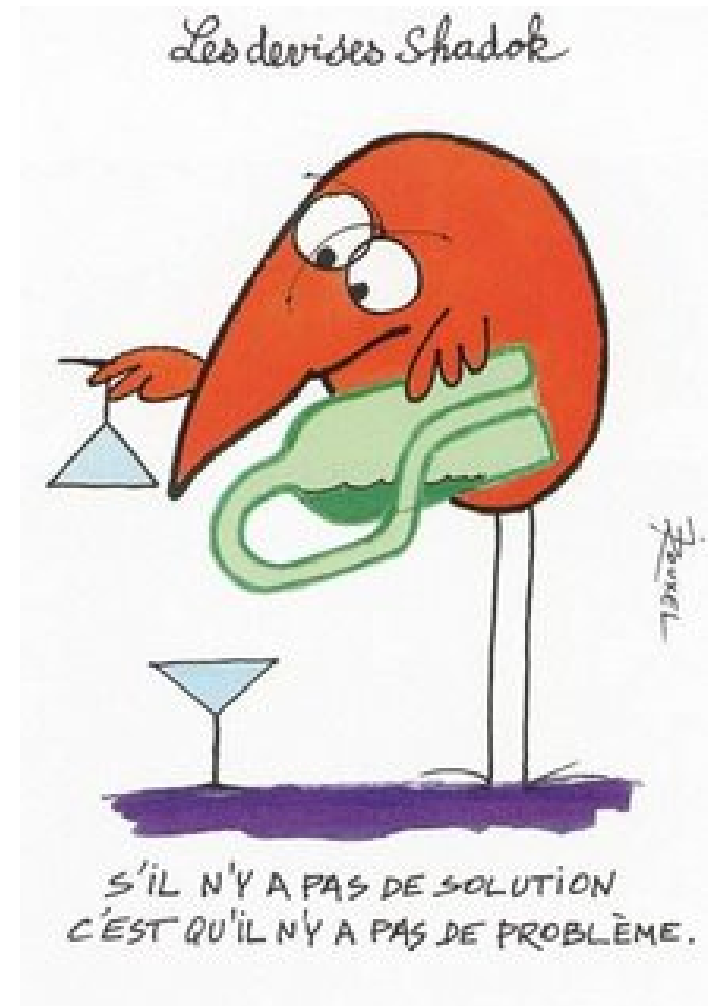
Connaissance de l'emplacement spatial des points... → "minimum" group delay

- Théorème optique.

Contrainte entre les pertes et la dispersion.

Le mot de la fin...

- Le développement de nouvelles technologies pose constamment de nouveaux défis



Oui, mais:

Les devises Shadok



IL VAUT MIEUX MOBILISER
SON INTELLIGENCE SUR DES
CONNERIES QUE MOBILISER
SA CONNERIE SUR DES
CHOSSES INTELLIGENTES.

- Non?