

# ANALYSE MULTI CAPTEUR DE SIGNAUX TRANSITOIRES ISSUS DES SYSTEMES ELECTRIQUES

**Bertrand GOTTIN**

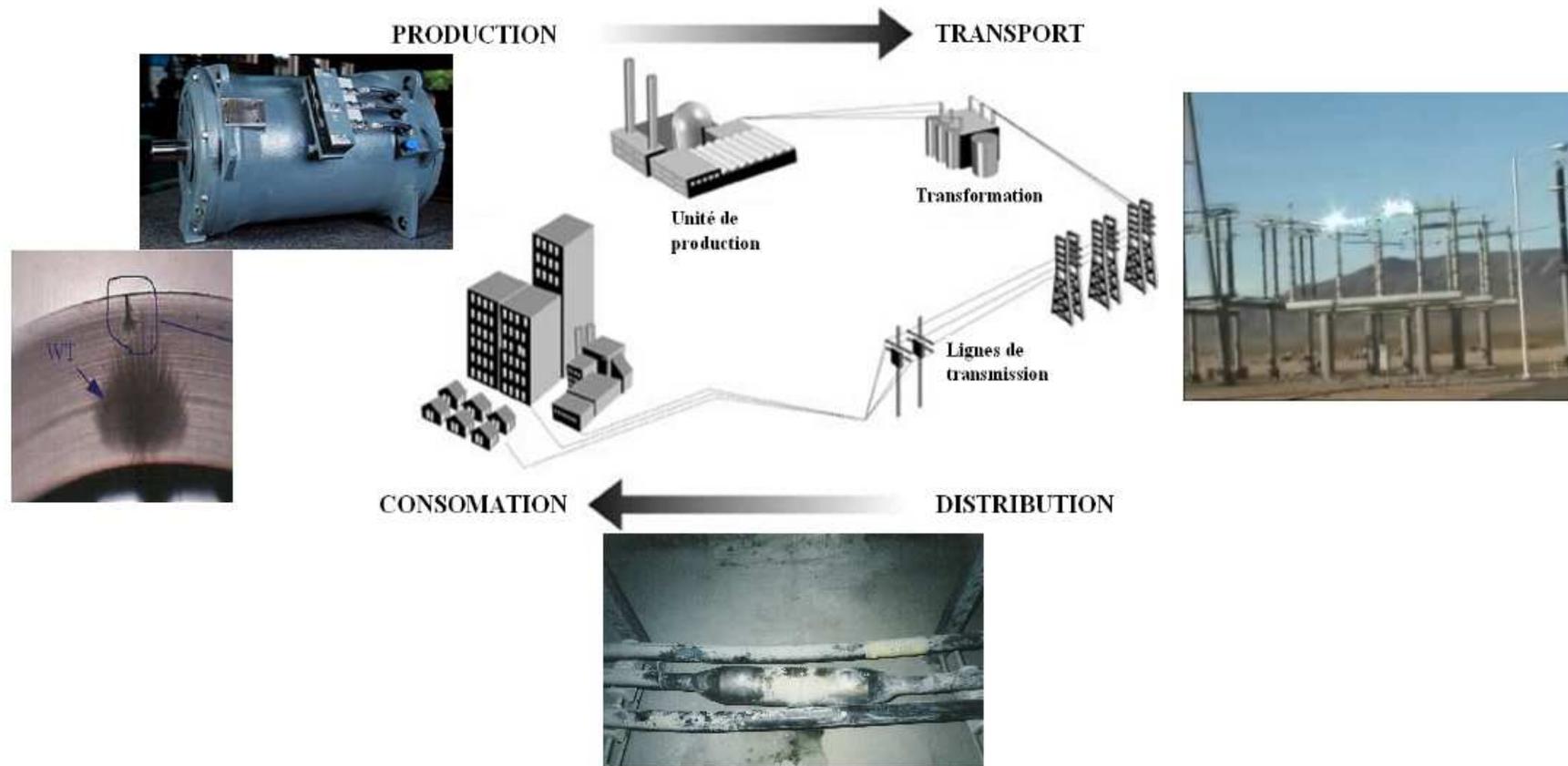
**Directeurs de thèse: Cornel IOANA et Jocelyn CHANUSSOT**

**03 Septembre 2010**



# Sommaire

- 1. Introduction: Problématique liée aux transitoires d'origine électrique**
  - a) Contexte de la thèse**
  - b) Origine et modèle électrodynamique des Décharges Partielles**
  - c) Modèle des décharges partielles en câble coaxial**
  - d) Techniques existantes**
  - e) Interface avec la problématique Traitement du Signal**
- 2. Détection de signaux transitoires**
- 3. Localisation des sources de signaux transitoires dans les câbles**
- 4. Conclusion et Perspectives**



Défauts transitoires tout au long de la chaîne de production-transport-distribution

- Causes: fatigue et usure du matériel ; humidité ; problème de fabrication
- Exemple: Décharges Partielles (DPs) → 30% des pannes des systèmes



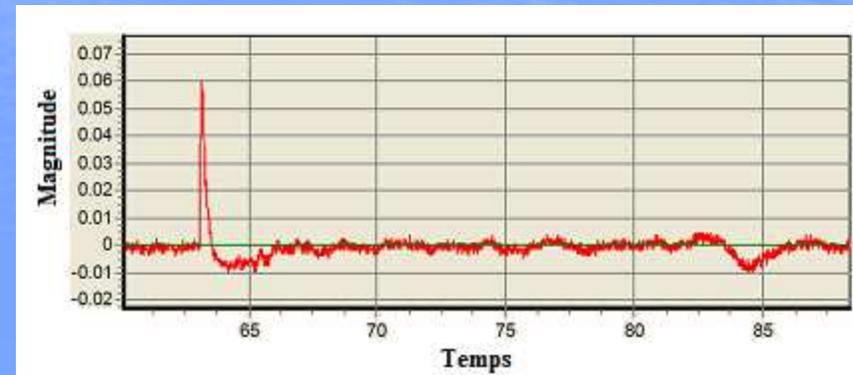
Difficultés :

➤ phénomènes transitoires, aléatoires

➔ Monitoring continu  
nécessaire pour la Détection

➤ localisés sur tout le périmètre du  
réseau (des km)

➔ Localisation distribuée



Défaut d'isolation



Vacuole remplie de gaz dans le matériau diélectrique isolant



Modification du niveau de potentiel aux électrodes

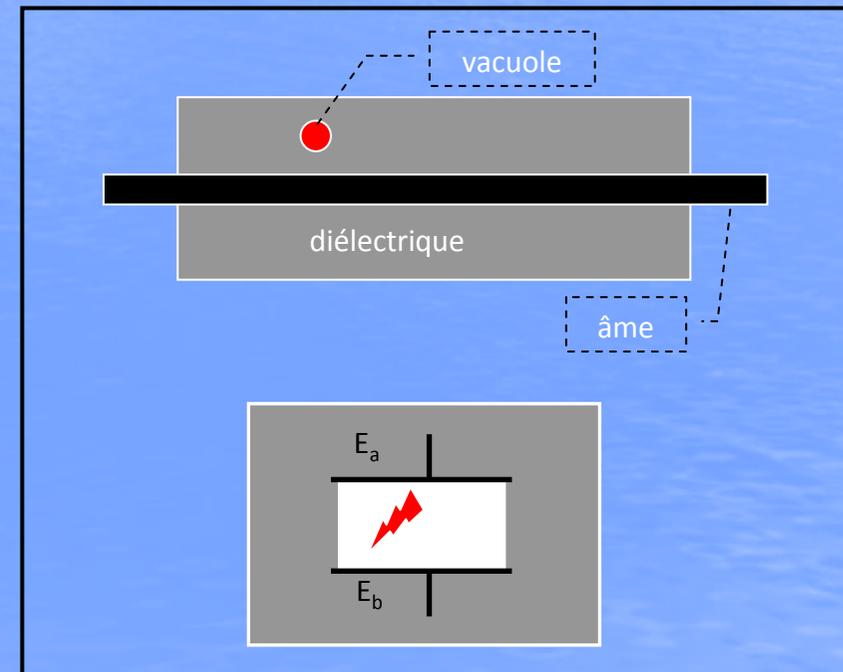


Charges induites sur les électrodes dans la vacuole

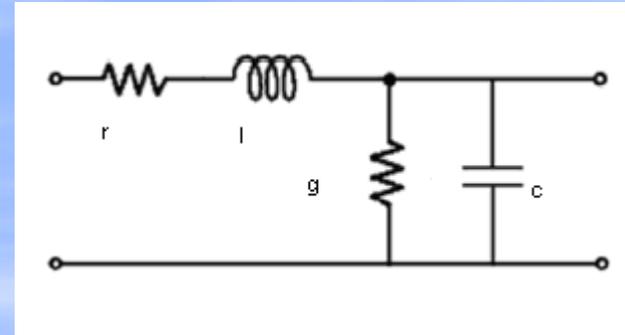


Modification du champ électrique dans la vacuole

La vacuole se comporte comme une capacité dans laquelle il y a décharge électrique



- Schéma électrique équivalent d'un câble coaxial



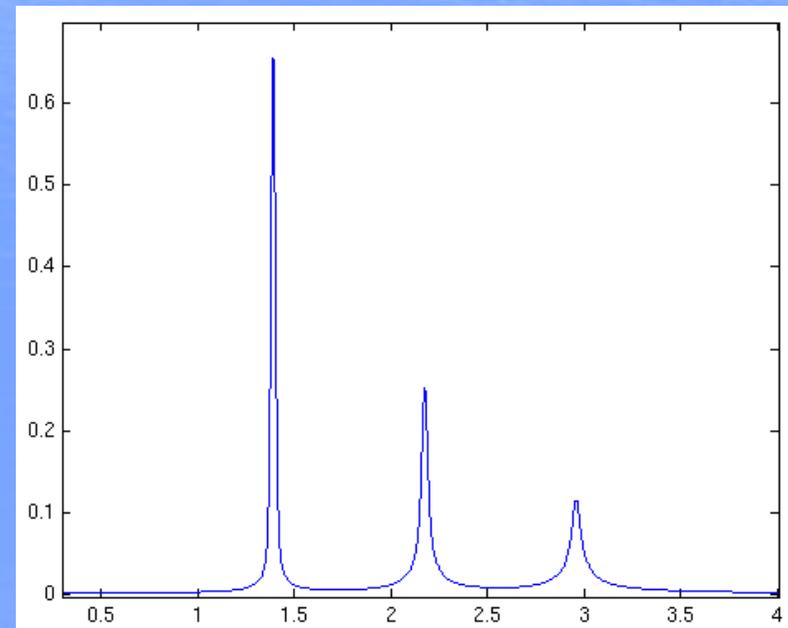
- Fonction de transfert du câble

$$H_c(\omega) = \exp(-\gamma_c(\omega) * L_c)$$

$$\gamma_c(\omega) = \sqrt{(r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c)} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$$

$$H_c(\omega) = \underbrace{e^{-\alpha(\omega) * L_c}}_{\text{Module}} \cdot e^{\underbrace{-j\beta(\omega) * L_c}_{\text{Phase}}}$$

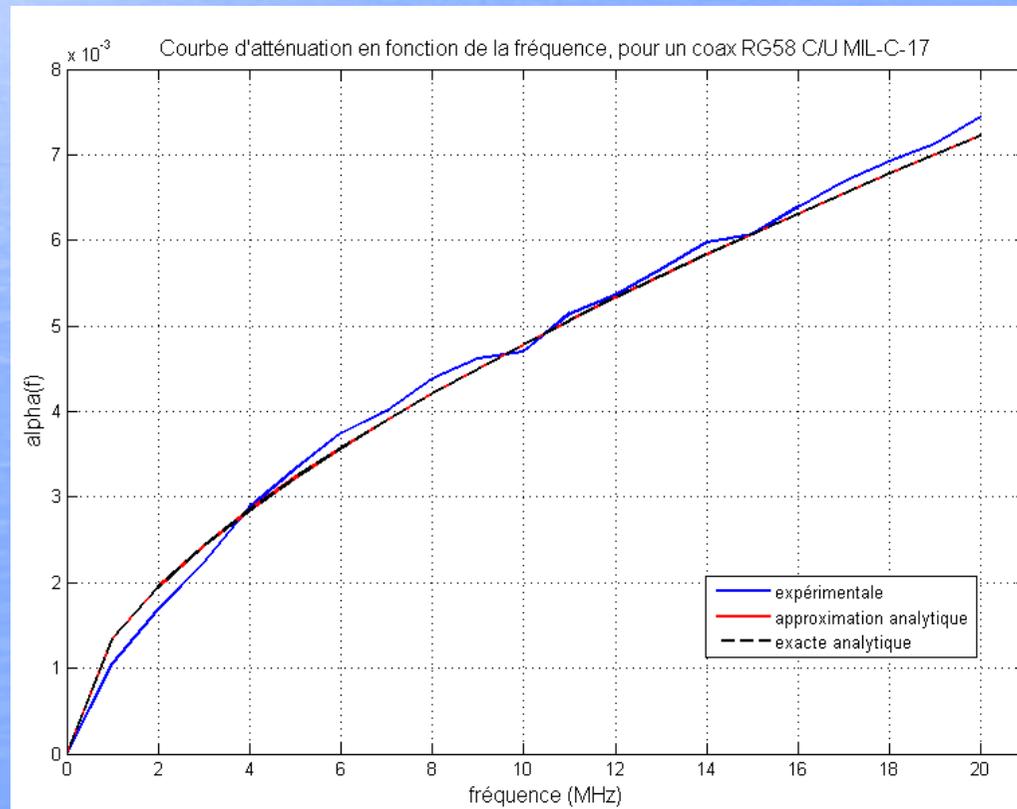
- Filtrage passe bas du câble
- Effet intégrateur de la propagation
- Élargissement de l'impulsion propagée



- Expression analytique de l'atténuation fréquentielle

$$\alpha(\omega) \approx \frac{r_0 \cdot \sqrt{lc}}{2l} \cdot \sqrt{\omega} + \frac{\tan \delta \cdot \sqrt{lc}}{2} \cdot \omega$$

Ne permet pas d'obtenir, par Transformée de Fourier Inverse, une expression analytique temporelle de l'impulsion propagée



➤ Décharges Partielles:

- signaux très courts
- large bande spectrale
- mini éclair → Signature acoustique  
→ Signature optique
- dégagement de chaleur → Signature optique  
Infra Rouge (IR)



➤ Toute l'information ( signal + effet physique ) est TRANSITOIRE

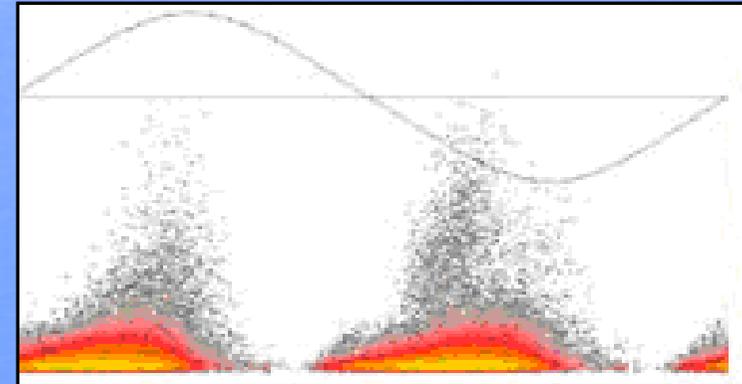
➤ Techniques de « Détection – localisation – caractérisation » basées sur ces effets physiques des signaux

➤ Technique Chimique

- modification de la structure chimique de la zone soumise à la décharge partielle (sous l'action du champ électrique)
- n'offre pas de possibilité de localisation
- nécessite des prélèvements donc la mise hors fonctionnement du système

➤ Technique Electrique

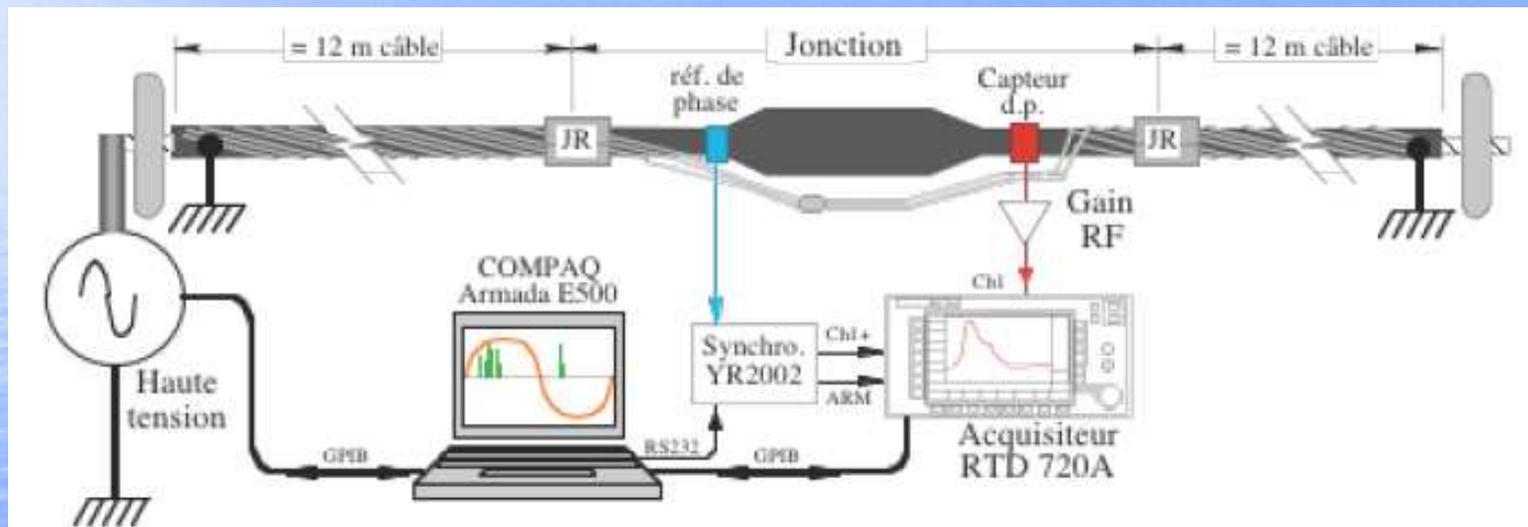
- limitée par présence de bruit issu de l'environnement électrique
- difficultés matérielles et de traitement de l'information pour un contrôle global



➤ Technique par Mesure optique

- réchauffement produit par les décharges identifié par signature IR
- applicable uniquement sur régions (affectées de décharges) visibles par la caméra IR

- Technique par Mesure de champ électromagnétique
  - mesure de perturbations champ magnétique externe
  - complexité d'interprétation physique des mesures
  - nécessité de systèmes d'acquisition (dans les très hautes fréquences) coûteux



- Technique par Mesure des émissions acoustiques
  - complexité du modèle de propagation de l'onde acoustique transitoire
  - sources transitoires parasites dans le spectre acoustique (bruit impulsionnel, commutateurs...)

- Surveillance et diagnostic in situ et continu de l'équipement électrique, à prix réduit
  - Détection automatique des phénomènes transitoires
  - Localisation des sources de transitoires en contexte distribué
  
- Techniques d'analyse de décharges partielles par Traitement du Signal:
  - Temps Fréquence
  - Ondelettes
  - Statistiques d'Ordre Supérieur
  - Analyse de Phase Instantanée
  
- Performances de Détection:
  - Probabilité de détection  $P_d$  élevée
  - Probabilité de fausses alarmes  $P_{fa}$  réduite

# Sommaire

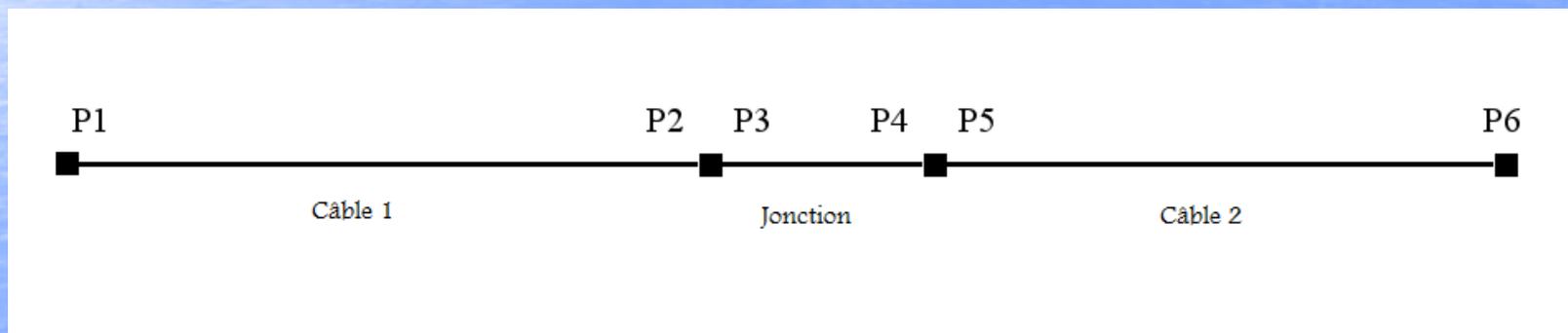
1. **Problématique liée aux transitoires d'origine électrique**
2. **Détection de signaux transitoires**
  - a) **Contexte d'étude et protocole d'évaluation**
  - b) **Techniques traditionnelles**
    - **Spectrogramme**
    - **Statistiques d'Ordre Supérieur et Ondelettes**
  - c) **Distribution Généralisée à Temps Complexe**
    - **Présentation de la Distribution**
    - **Méthode de détection de transitoires par DGTC**
3. **Localisation des sources de signaux transitoires dans les câbles**
4. **Conclusion et Perspectives**

➤ Problématique

Contexte d'étude type « Propagation de l'impulsion dans un réseau de câbles électriques »

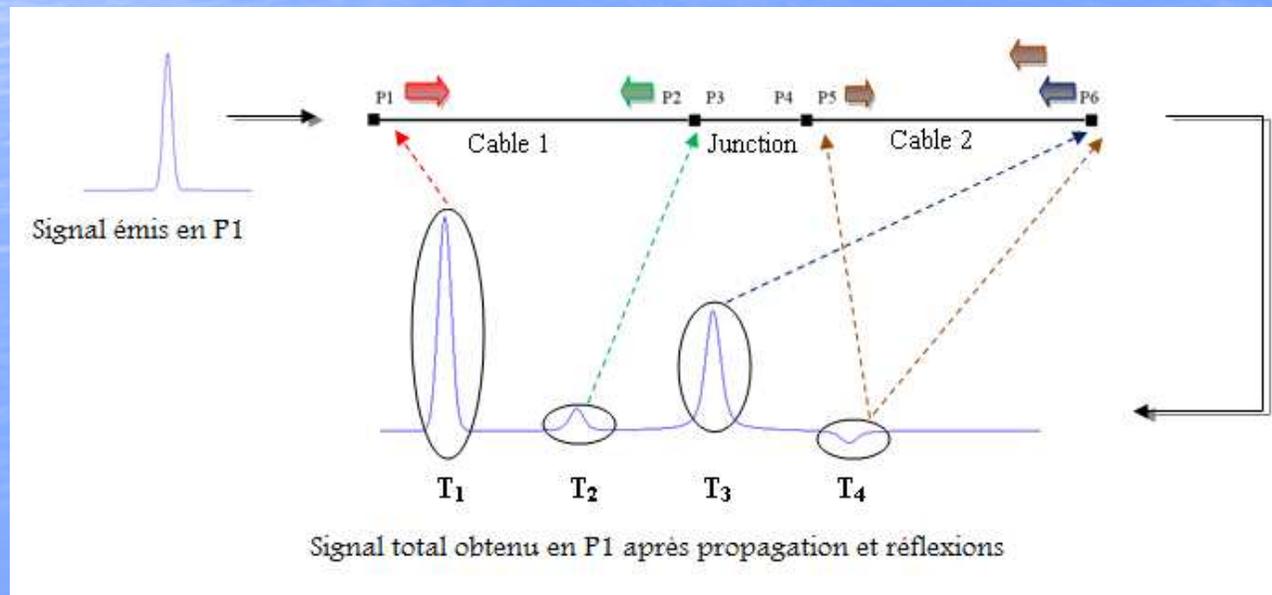
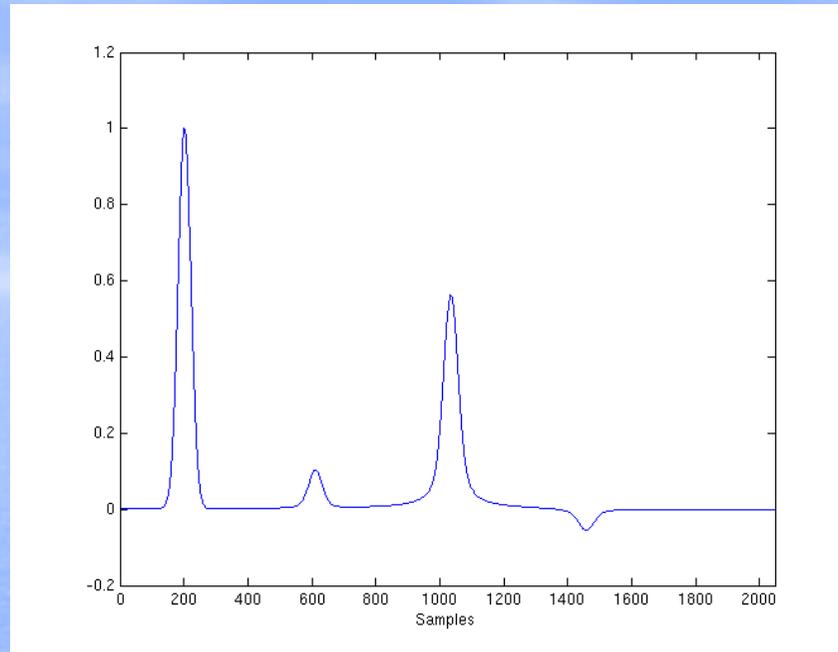
➤ Configuration réseau de câbles

- réseau hétérogène
- points de changement d'impédance

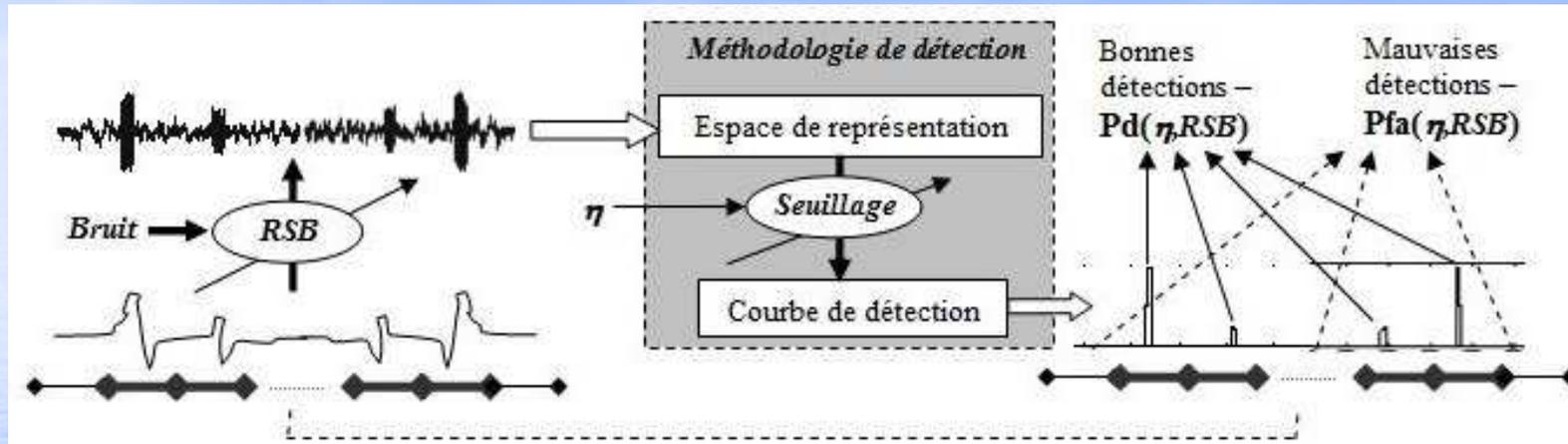


mise en évidence de limites de performances des méthodes traditionnelles statistiques et énergétiques pour la détection de transitoires.

Signal type étudié



- Capacité à détecter **tous** les transitoires du signal en même temps -
  - i.e: obtenir  $T$  bonnes décisions de détection
  - sur un nombre  $N_r$  de réalisations du signal bruité (RSB variable)
  - $T$  étant le nombre de transitoires présents dans le signal



$q_i$  : critère de détection vérifié sur intervalle de transitoires (nombre de bonnes détections) par réalisation  $i$

$r_i$  : critère de détection vérifié hors support de transitoires (nombre de fausses alarmes) par réalisation  $i$

- Calcul pour l'estimation des probabilités:

$$\hat{P}_d = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} q_i}{T \times N_r}$$

$$\hat{P}_{fa} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} r_i}{(L_c - T \times L_{inter}) \times N_r}$$

➤ Outils de traitement du signal:

Statistiques d'Ordre Supérieur (SOS), Transformée en ondelette et Spectrogramme largement utilisés pour détection et localisation des transitoires

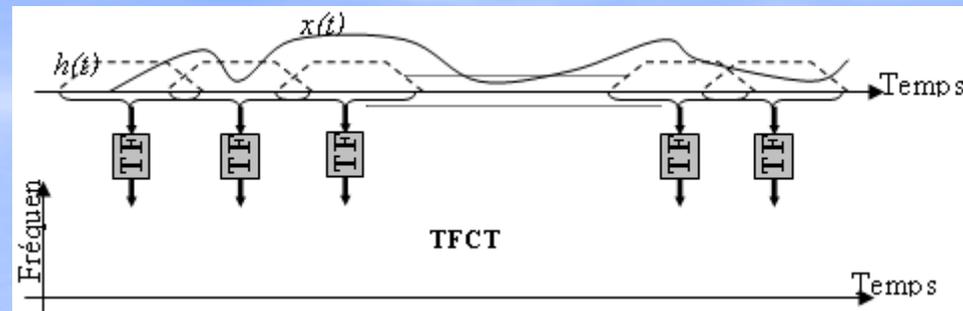
➤ Méthode des SOS adaptée pour la détection de transitoires noyés dans un bruit additif gaussien [*Ph. Ravier 1996*] :

- valeurs élevées de SOS pour toute composante non-gaussienne comme les transitoires
- SOS très proches de zéro pour toute partie gaussienne du signal

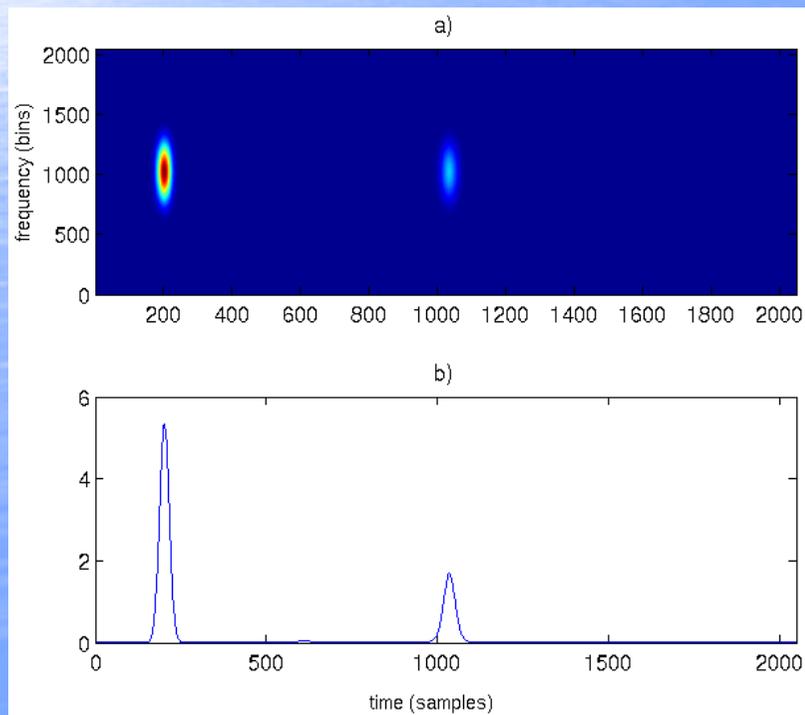
➤ Coefficients d'ondelettes et spectrogramme:

- basés sur des critères d'énergie
- détection des transitoires via marques correspondant à des fortes valeurs énergétiques aux instants d'occurrence des transitoires

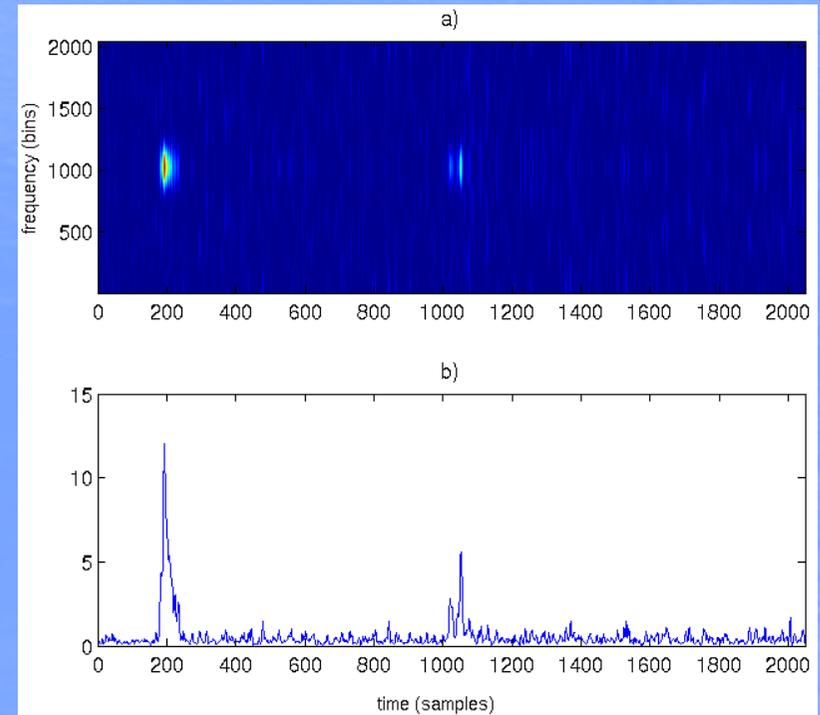
$$TFCT_x^{(h)}(t, f) = \int_{\mathbf{R}} x(\theta) h_{t,f}^*(\theta) d\theta = \int_{\mathbf{R}} x(\theta) h^*(\theta - t) e^{-j2\pi f\theta} d\theta$$



RSB = 30 dB



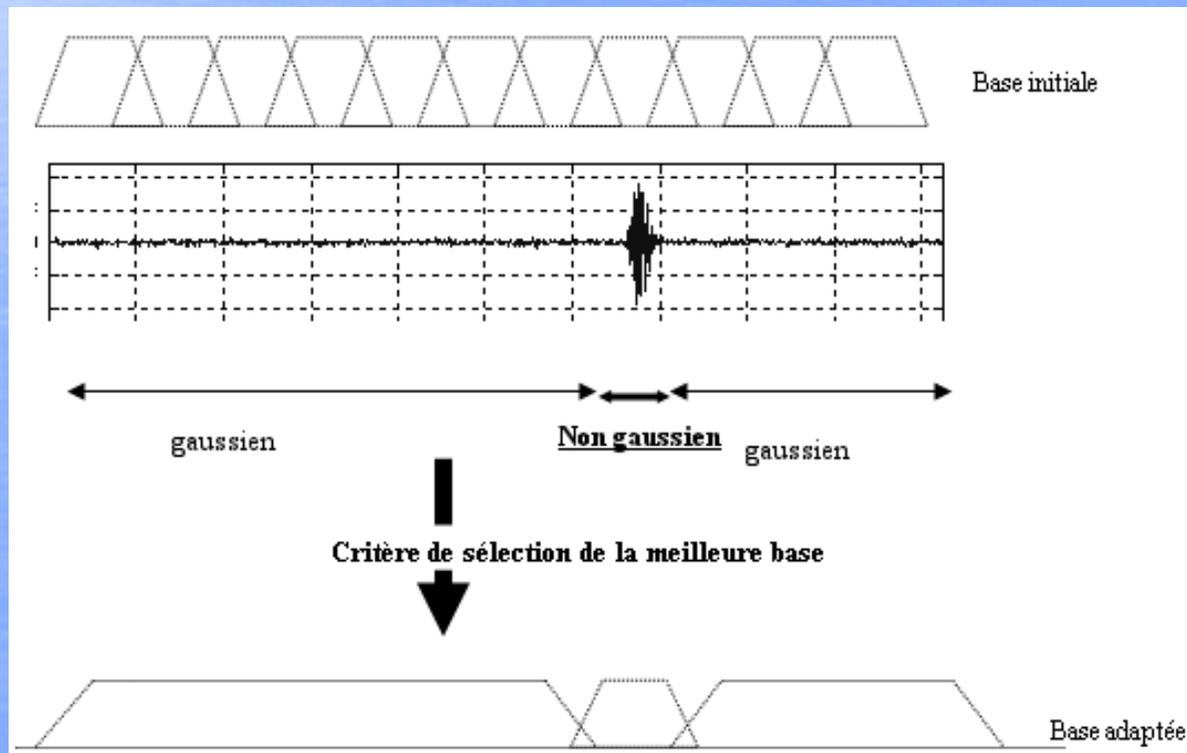
RSB = -8 dB



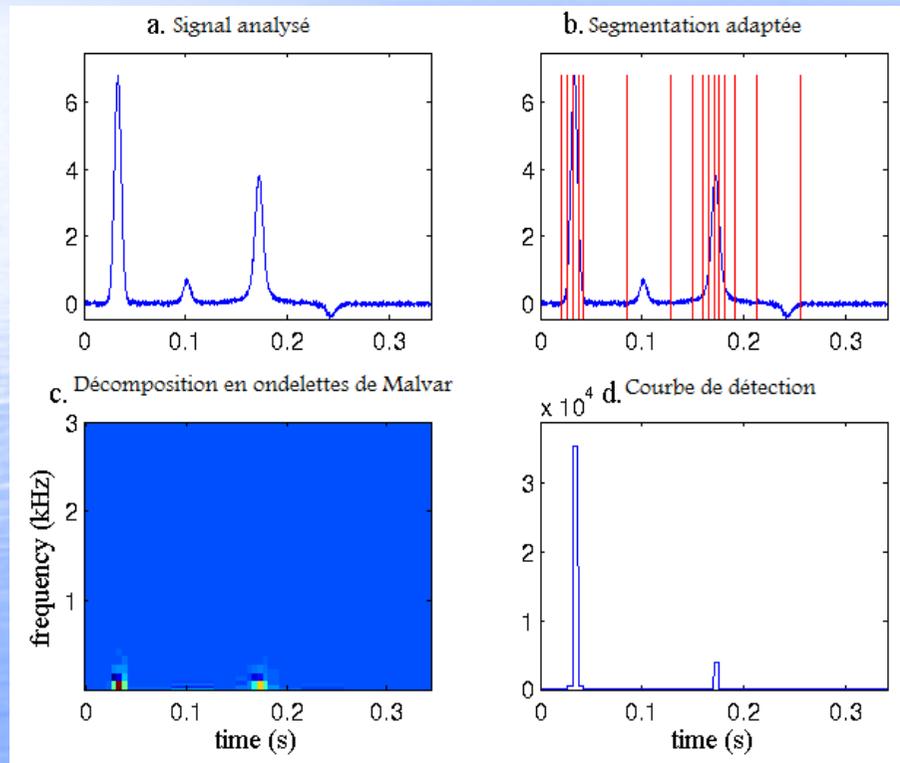
- Estimateur du cumulante d'ordre 4 à partir des coefficients de la décomposition en ondelettes de Malvar du signal

$$\tilde{k}_4^j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_{jk}^4 - 3 \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_{jk}^2 \right)^2$$

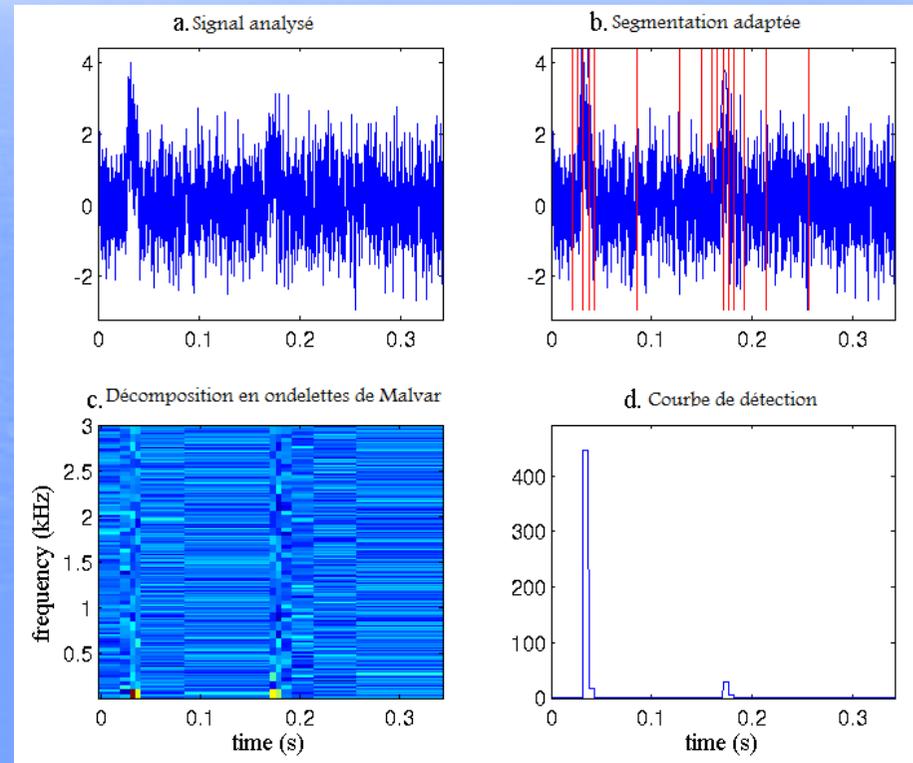
- Principe de segmentation adaptée pour obtenir la meilleure base ondelettes



RSB = 30 dB



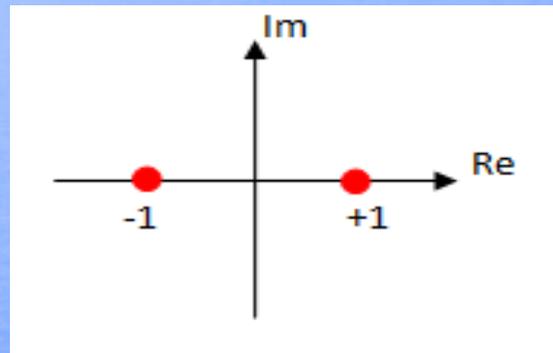
RSB = -8 dB



Présentation de la distribution

- solution pour réduction d'intraférences en comparaison avec Wigner Ville

$$s(t) = Ae^{j\phi(t)}$$



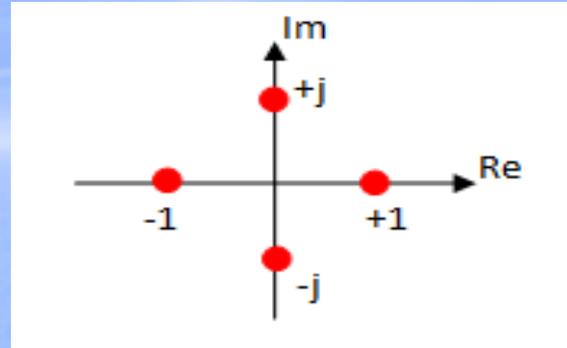
$$WVD(t, \omega) = \mathfrak{F}_\tau \left[ s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right]$$

$$WVD(t, \omega) = \delta\left(\omega - \phi'(t)\right) *_{\omega} \mathfrak{F}_\tau \left[ e^{jQ_{wv}(t, \tau)} \right]$$

avec le Facteur d'étalement

$$Q_{wv}(t, \tau) = \phi^{(3)}(t) \frac{\tau^3}{2^2 3!} + \phi^{(5)}(t) \frac{\tau^5}{2^4 5!} + \dots$$

[Stankovic 2002]: Considération de retards pris sur l'axe imaginaire



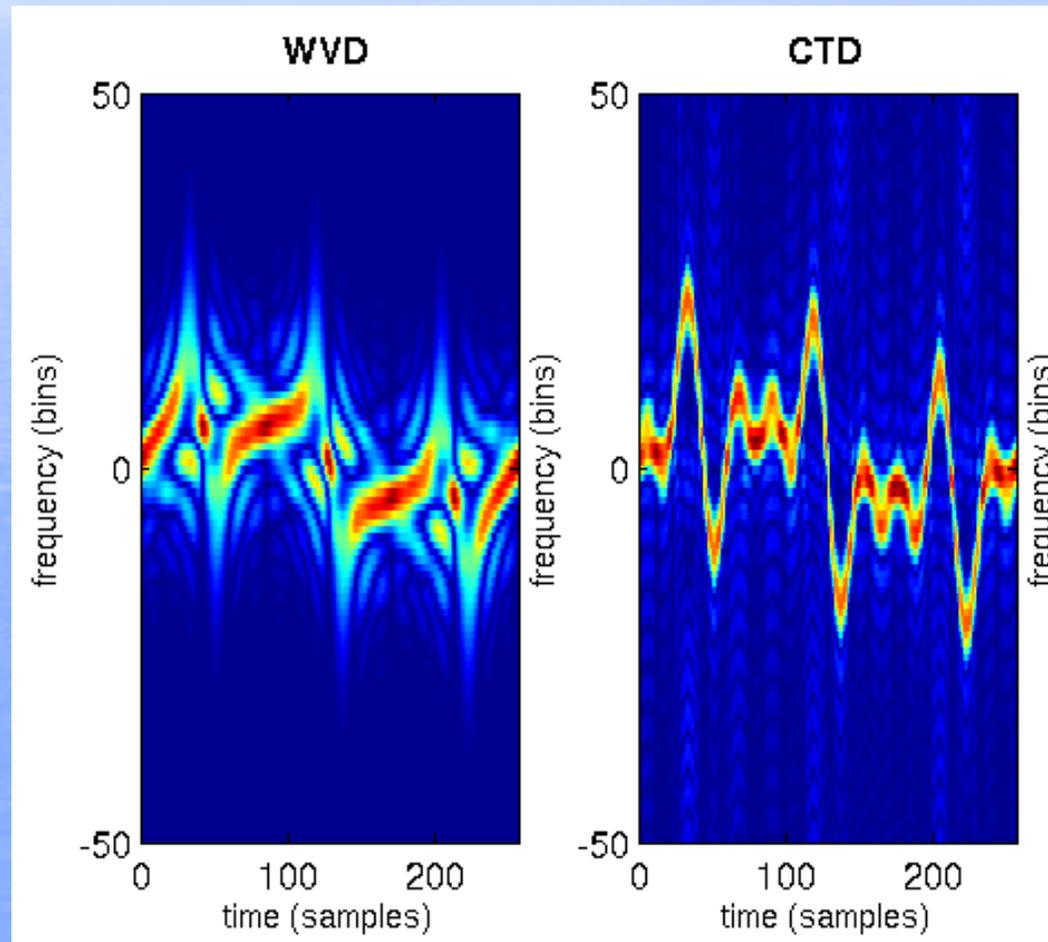
$$CTD(t, \omega) = \mathfrak{F}_\tau \left[ s(t + \frac{\tau}{4}) s^*(t - \frac{\tau}{4}) s^{-j}(t + j\frac{\tau}{4}) s^j(t - j\frac{\tau}{4}) \right]$$

$$CTD(t, \omega) = \delta(\omega - \phi'(t)) *_{\omega} \mathfrak{F}_\tau [e^{jQ_{ct}(t, \tau)}]$$

avec le Facteur d'étalement

$$Q_{ct}(t, \tau) = \phi^{(5)}(t) \frac{\tau^5}{4^4 5!} + \phi^{(9)}(t) \frac{\tau^9}{4^8 9!} + \dots$$

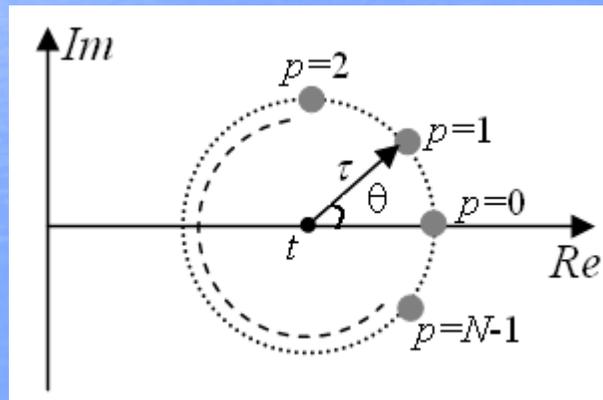
$$s_1(t) = e^{j(3\cos(\pi t) + \cos(3\pi t) + \frac{2}{3}\cos(6\pi t) + \frac{1}{3}\cos(9\pi t))}$$



[C. Cornu et al. 2007]: « Distribution temps-fréquence à argument généralisé de retard complexe »

➤ Formule d'intégrale de Cauchy ➔ calcul de la dérivée d'ordre  $K$  de  $f$  à l'instant  $t$

$$\phi^{(K)}(t) = \frac{K!}{2\pi j} \oint_{\gamma} \frac{\phi(z)}{(z-t)^{K+1}} dz$$



$$\phi^{(K)}(t) = \frac{K!}{N\tau^K} \sum_{p=0}^{N-1} \phi\left(t + \tau e^{j\frac{2\pi p}{N}}\right) e^{-j\frac{2\pi pK}{N}} + \varepsilon$$

$$\begin{aligned} GCD_N^K[s](t, \omega) &= \mathfrak{F}_\tau [GCM_N^K[s](t, \tau)] \\ &= \delta(\omega - \phi^{(K)}(t)) *_{\omega} \mathfrak{F}_\tau [e^{jQ(t, \tau)}] \end{aligned}$$

où

$$GCM_N^K[s](t, \tau) = \prod_{p=0}^{N-1} s^{\omega_{N,p}^{N-K}} \left( t + \omega_{N,p} \sqrt[K]{\tau \frac{K!}{N}} \right)$$

avec

$$\omega_{N,p} = e^{j2\pi p/N}$$

et

$$Q(t, \tau) = N \sum_{p=1}^{+\infty} \phi^{(Np+K)}(t) \frac{\tau^{\frac{Np}{K}+1}}{(Np+K)!} \left(\frac{K!}{N}\right)^{\frac{Np}{K}+1}$$

➤ Propriété de « réduction des intraférences » :

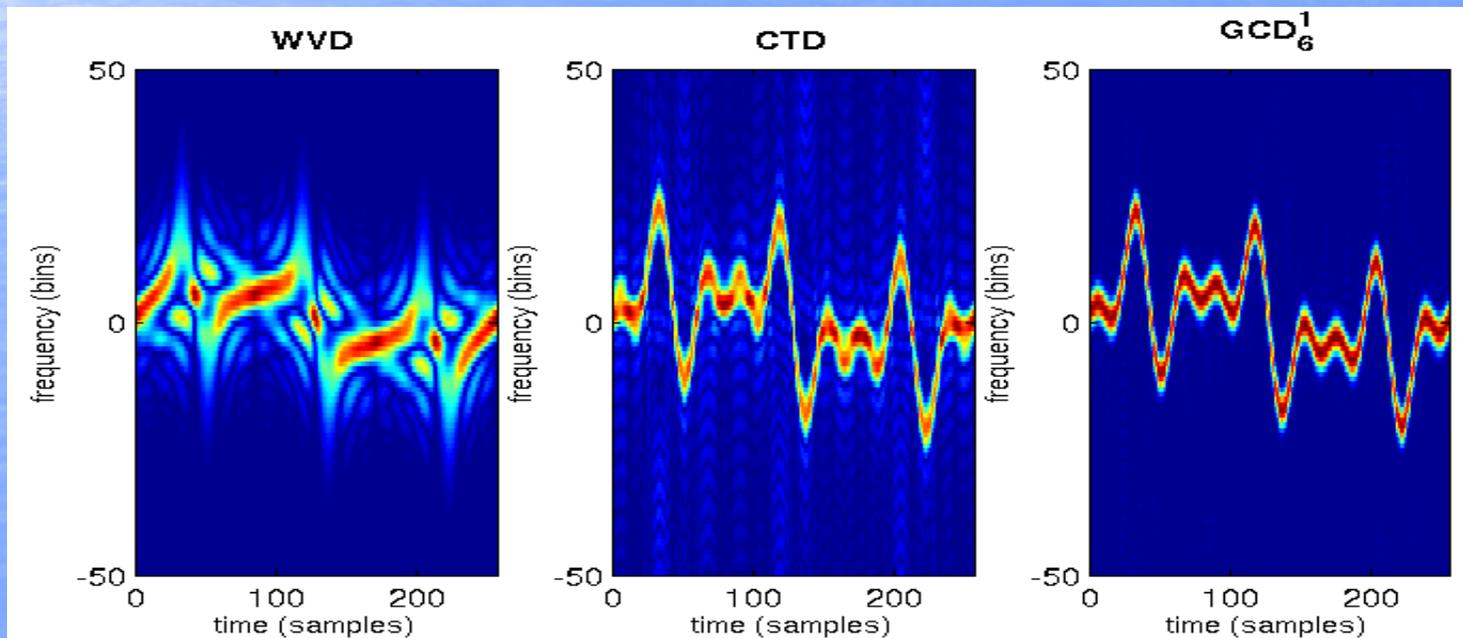
Augmenter le paramètre  $N$  ( $N \Leftrightarrow$  nombre de retards complexes) réduit le Facteur d'étalement et atténue les intraférences

- Calcul du Facteur d'étalement pour quelques Distributions Temps-Fréquence

Distribution	Spread factor
$STFT \Leftrightarrow GCD_1^1$	$Q(t, \tau) = \phi^{(2)}(t) \frac{\tau^2}{2!} + \phi^{(3)}(t) \frac{\tau^3}{3!} + \dots$
$WVD \Leftrightarrow GCD_2^1$	$Q(t, \tau) = \phi^{(3)}(t) \frac{\tau^3}{2^2 3!} + \phi^{(5)}(t) \frac{\tau^5}{2^4 5!} + \dots$
$CTD \Leftrightarrow GCD_4^1$	$Q(t, \tau) = \phi^{(5)}(t) \frac{\tau^5}{4^4 5!} + \phi^{(9)}(t) \frac{\tau^9}{4^8 9!} + \dots$
$GCD_6^1$	$Q(t, \tau) = \phi^{(7)}(t) \frac{\tau^7}{6^6 7!} + \phi^{(13)}(t) \frac{\tau^{13}}{6^{12} 13!} + \dots$

- Illustration pour le signal test

$$s_1(t) = e^{j(3\cos(\pi t) + \cos(3\pi t) + \frac{2}{3}\cos(6\pi t) + \frac{1}{3}\cos(9\pi t))}$$

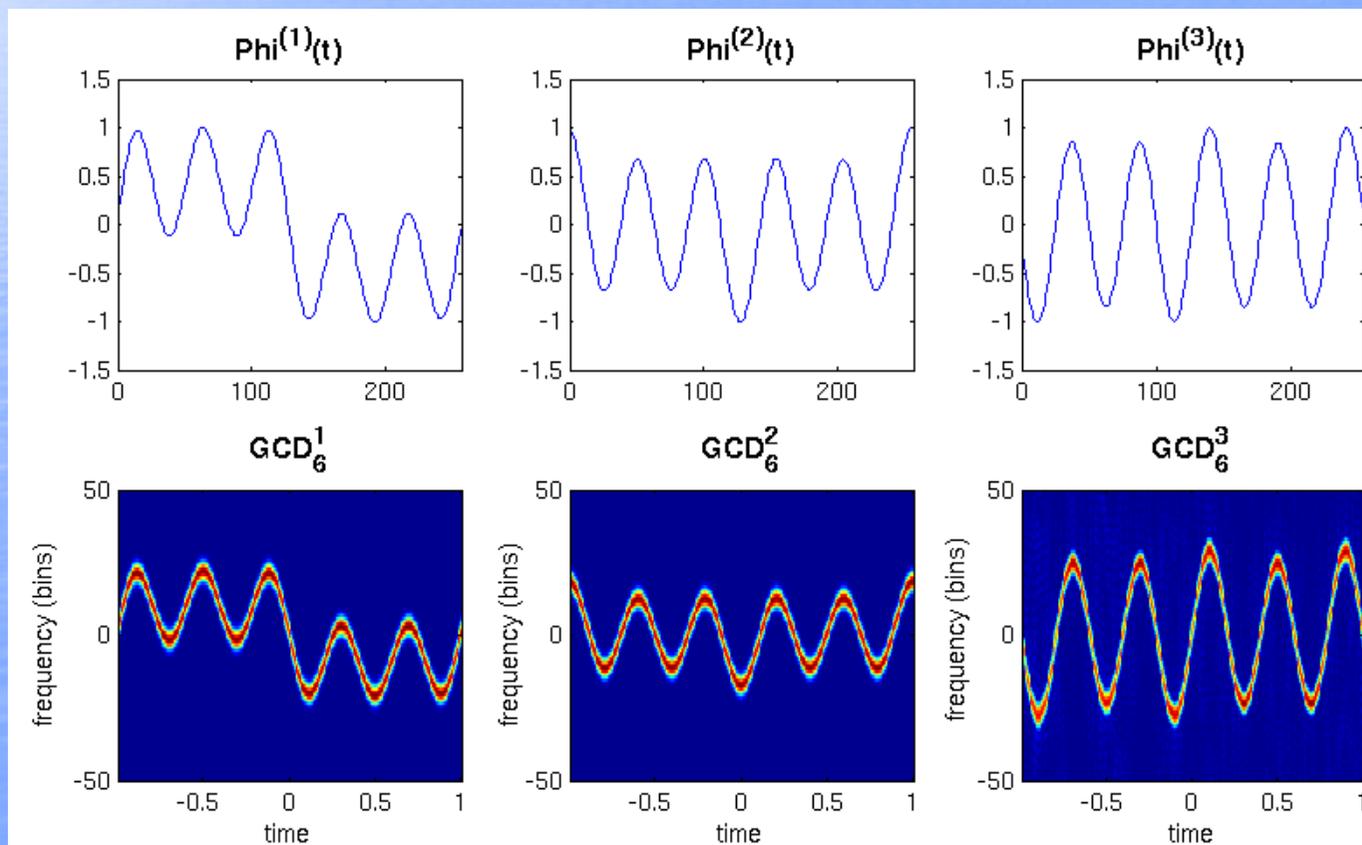


DGTC  $\Leftrightarrow$  Représentation « Temps – Dérivées de Phase »

➤ permet la représentation de dérivées de tout ordre K de la loi de phase instantanée du signal

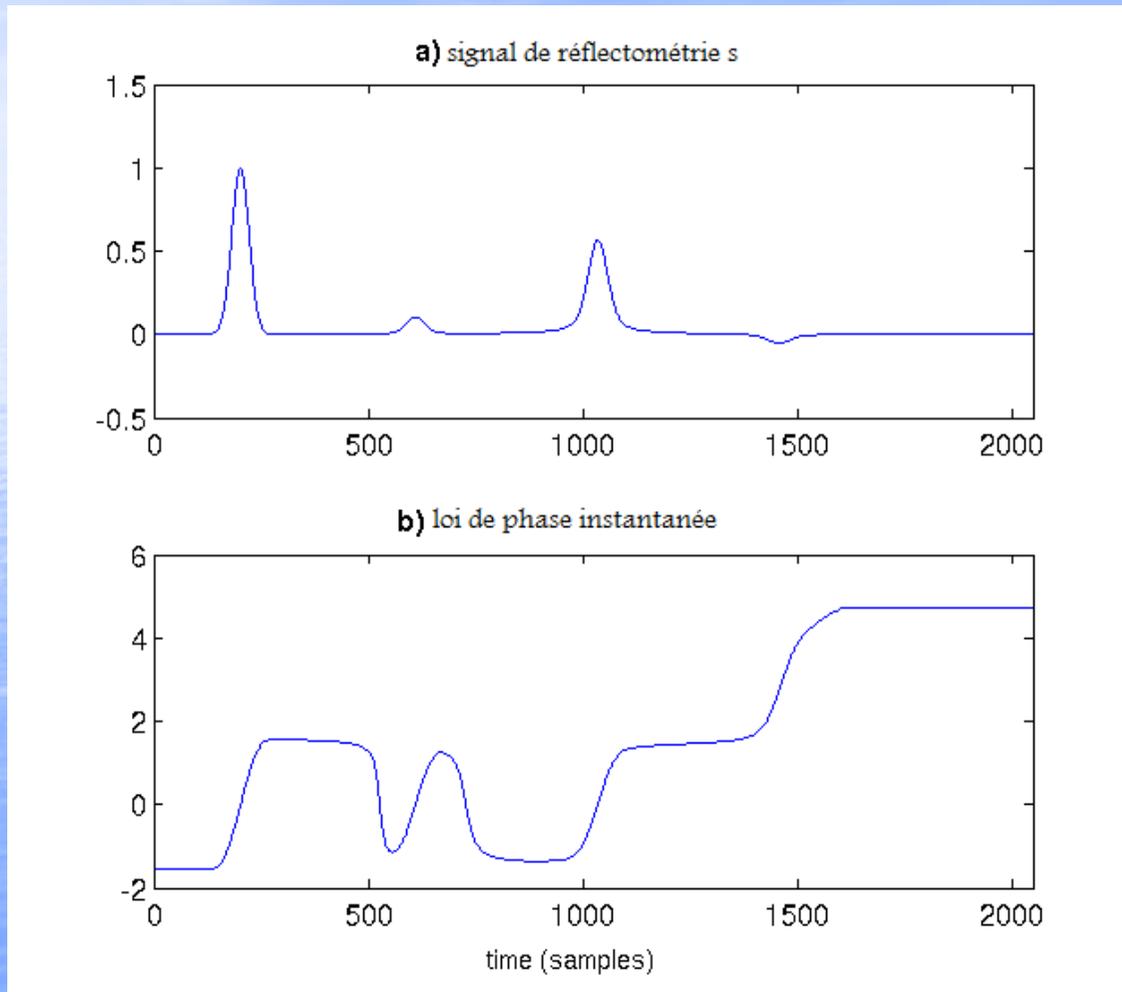
➤ illustration pour le signal test

$$s_2(t) = e^{j(6\cos(\pi t) + \frac{2}{3}\cos(3\pi t) + \frac{4}{3}\cos(5\pi t))}$$



Méthode de détection

➤ Détection par analyse dans le domaine de représentation de la phase



Saut de phase significatif et visible pour tous les transitoires indépendamment de leur amplitude:

chaque impulsion

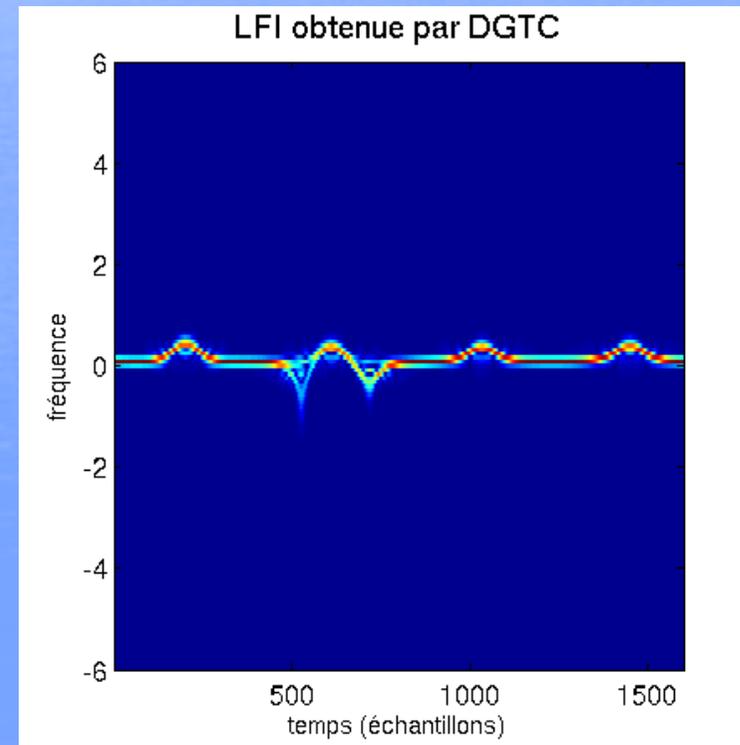
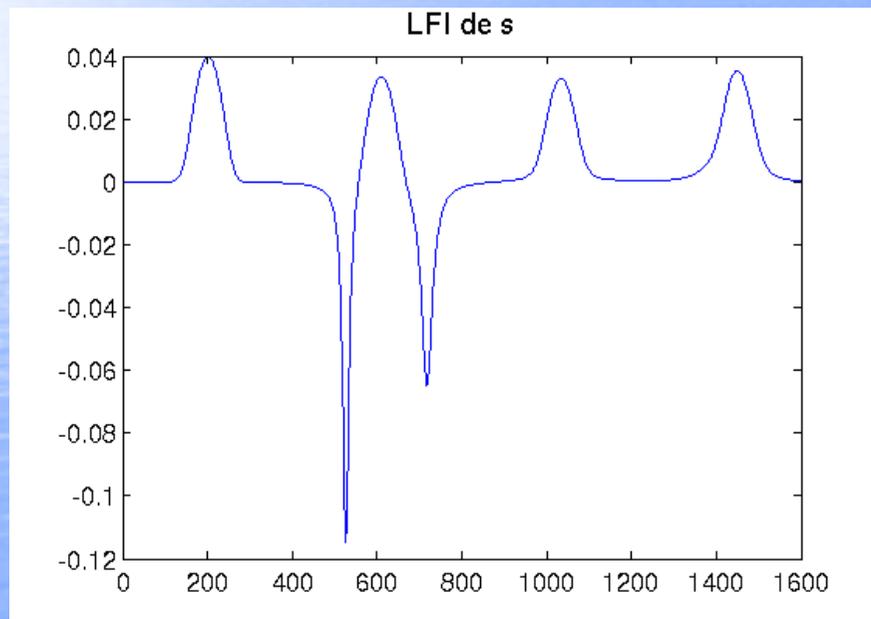


Échelon de phase

Détection des transitoires par dérivée première de la phase

Analyse de la Loi de Fréquence Instantanée (LFI)

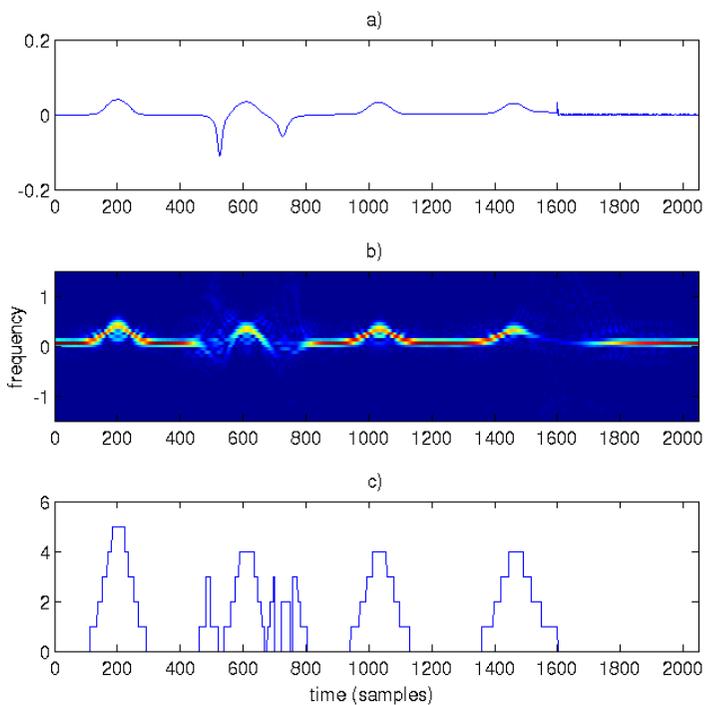
Mise en évidence **d'égle importance pour tous les transitoires** par « Dirac » en LFI



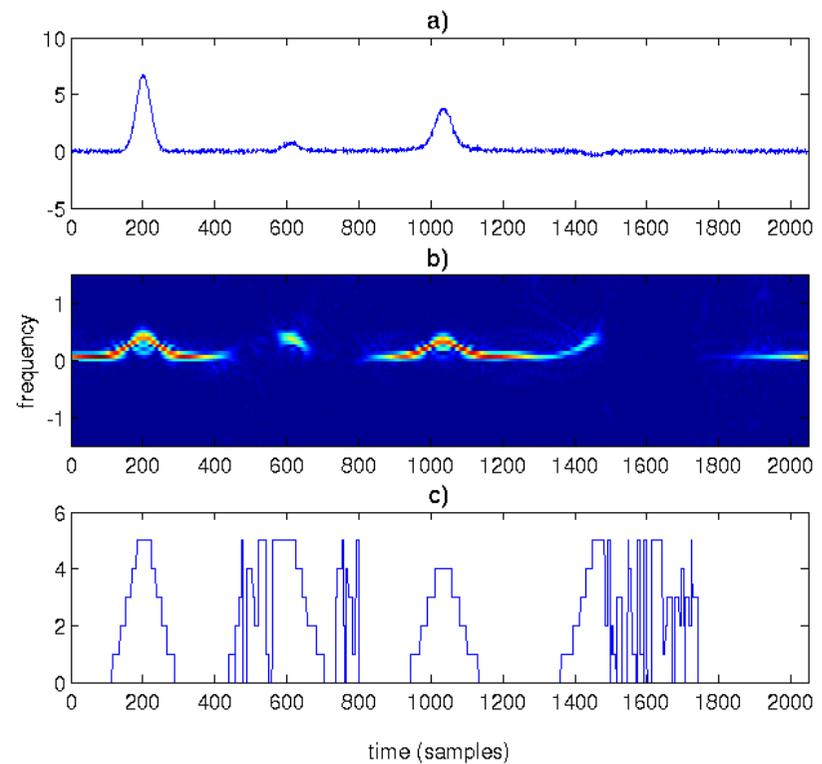
➤ Définition de la courbe de détection

$$DC_{DGTC}(t) = | \mathit{Argmax}_f |DGTC(t, f)| |$$

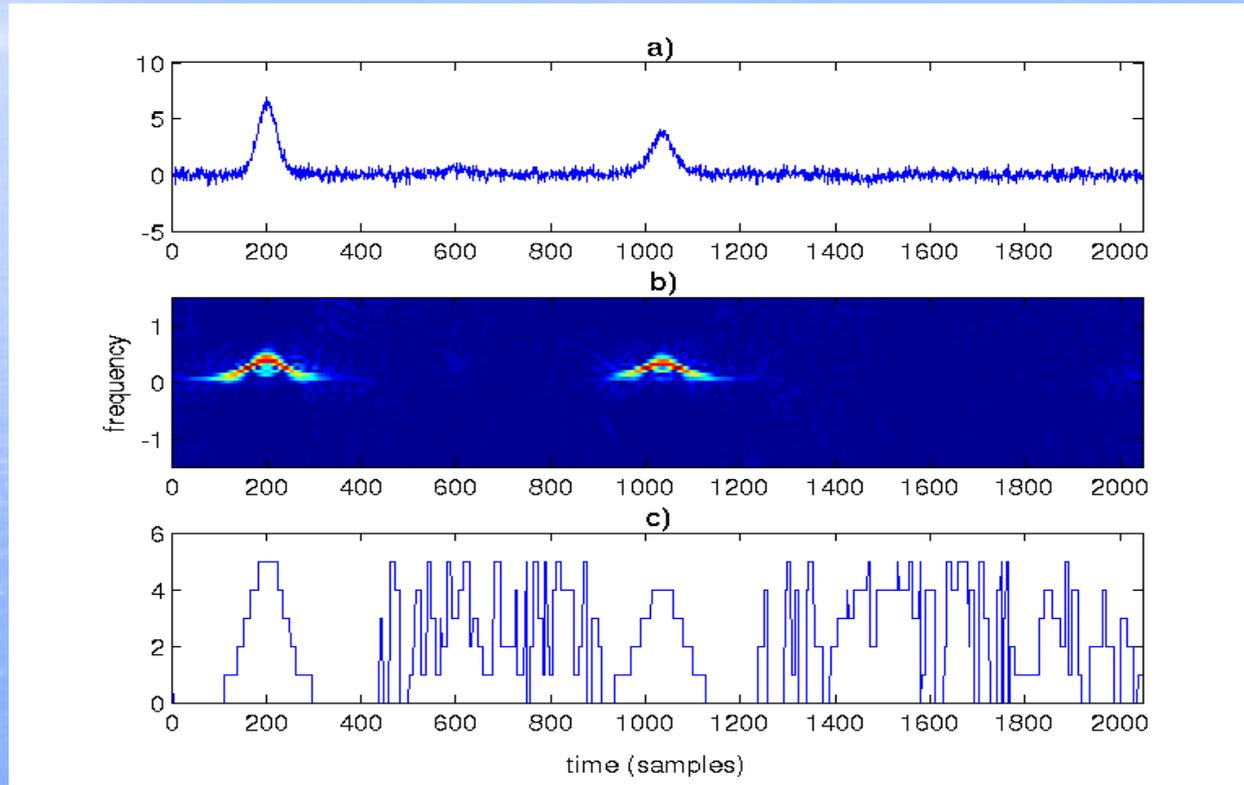
RSB = 30 dB

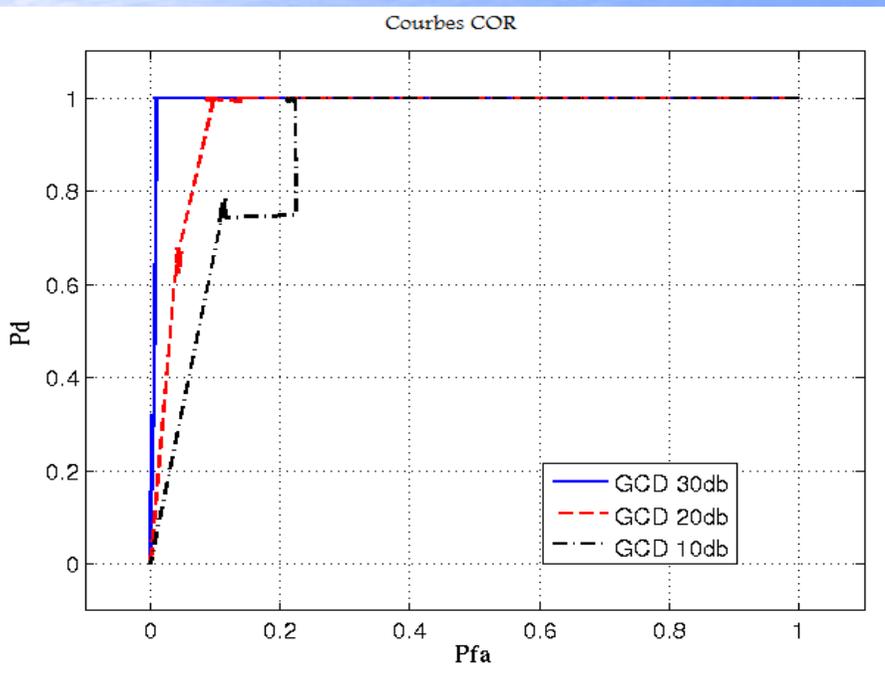
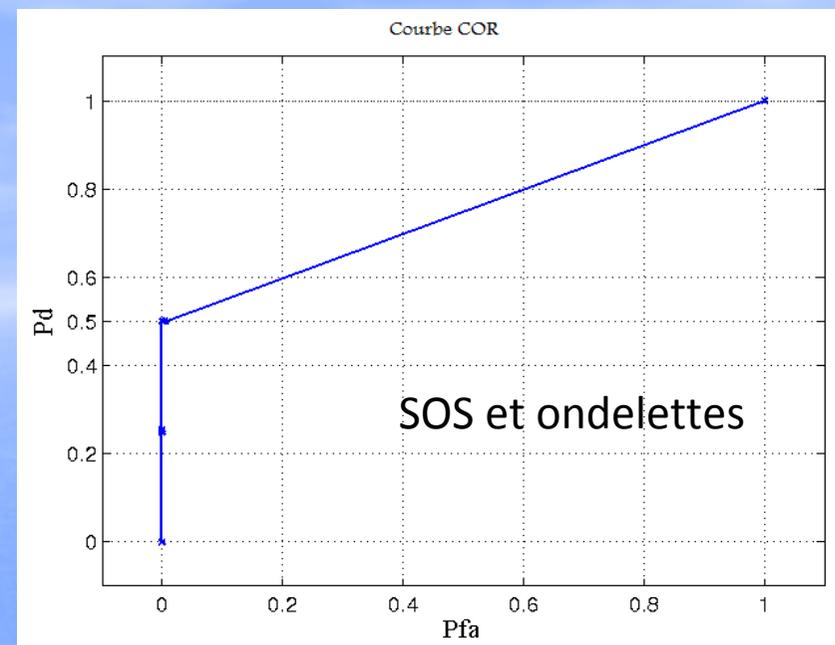
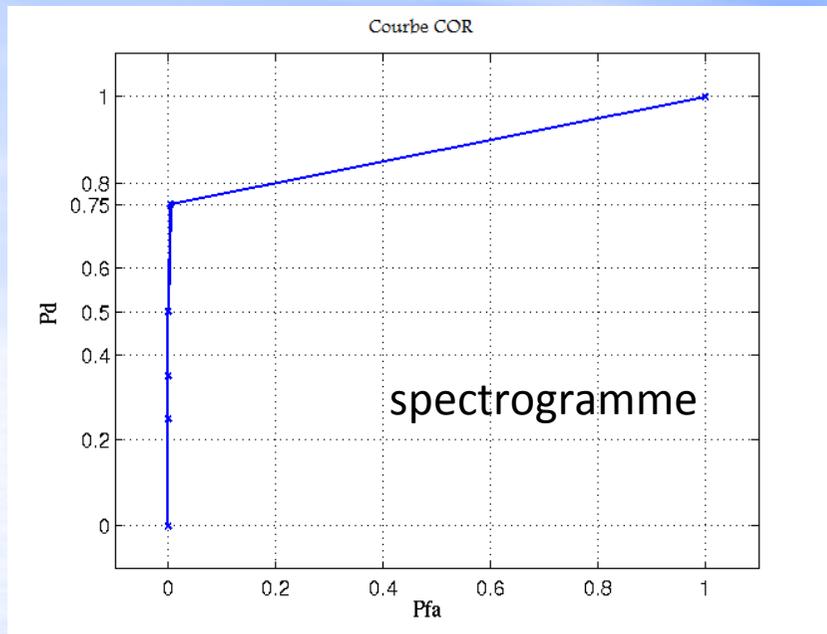


RSB = 20 dB



RSB = 10 dB





➤ Spectrogramme – SOS et ondelettes:

- seules les 2 plus fortes impulsions sont détectées Pd à 50% max à partir de 1 à 2 pas de calcul d'élévation seuil

- Pfa très faible (robuste au bruit)

➤ Distribution Généralisée à Temps Complexe:

- toutes les impulsions détectées ; Pd à 1 jusqu'à seuil élevé

- Pfa croissante avec le bruit

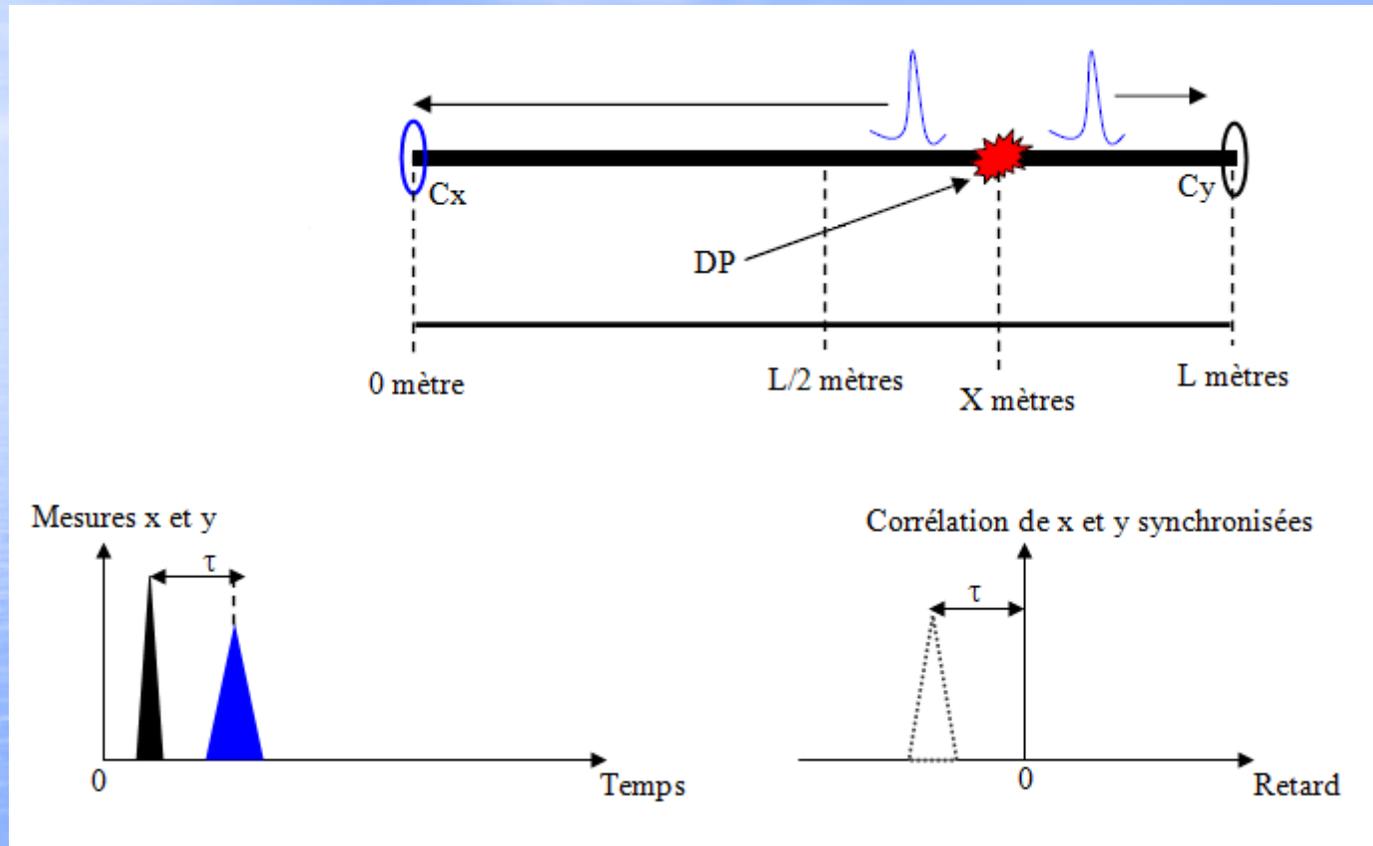
Distribution temps-fréquence basée sur les moments à retards Complexes:

- représentation de composantes temps-fréquence fortement non linéaires avec réduction des termes d'intraférences
  
  - représentation de tout ordre de dérivées de phase instantanée d'un signal.
  
  - intérêt pour détection de transitoires physiquement liés mais ayant de fortes différences d'amplitude:
    - travail en domaine de représentation de phase
- Transitoire → rupture de phase significative et visible malgré faible amplitude signal
- Inconvénients:
    - analyse dans le domaine de la phase très sensible au bruit

# Sommaire

- 1. Problématique liée aux transitoires d'origine électrique**
- 2. Détection de signaux transitoires**
- 3. Localisation des sources de signaux transitoires dans les câbles**
  - a) Contexte théorique et principe**
  - b) Etat de l'art**
  - c) Méthode de localisation basée sur la physique de propagation**
- 4. Conclusion et Perspectives**

- Localiser les sources de transitoires, une fois détectés
- En contexte distribué – capteurs loins l'un de l'autre



$$X = \frac{L}{2} + v \cdot \frac{|\tau|}{2} \quad \text{si } \tau < 0$$

$$X = \frac{L}{2} - v \cdot \frac{|\tau|}{2} \quad \text{si } \tau > 0$$

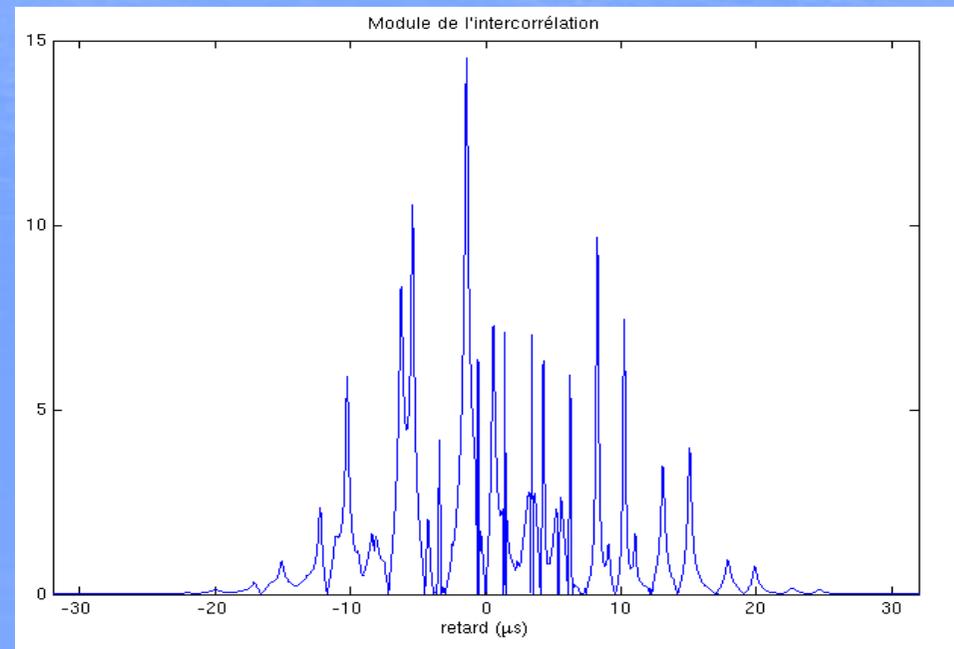
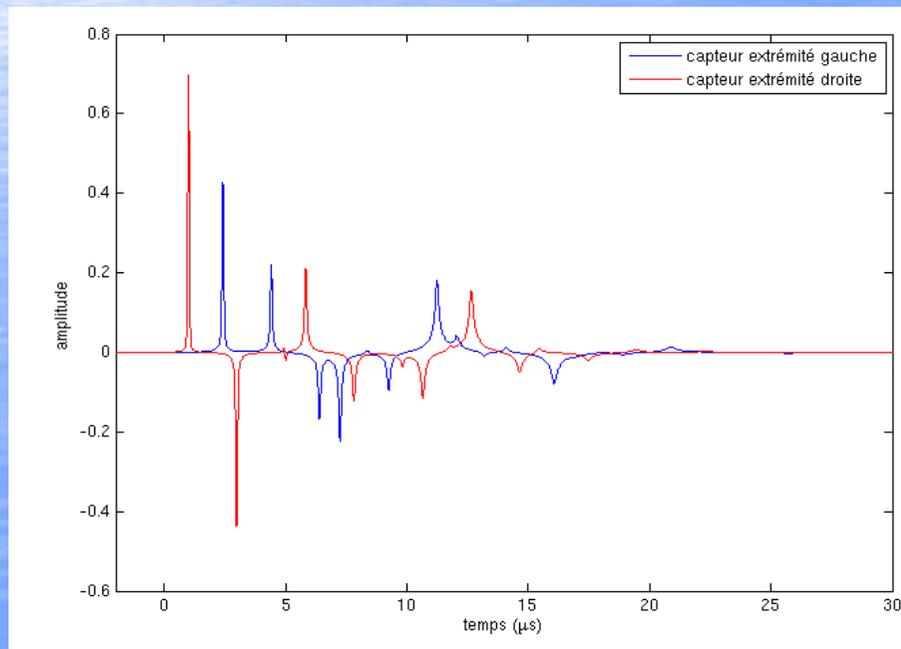
En réalité... (résultat de simulation en propagation *EDF R&D*)

Paramètres impulsion en P1			Coefficient de réflexion en P6		
Amplitude	1	t initial (μs)	-10	échantillonnage (μs)	0.001
Demi-largeur	0.3e-1	t final (μs)	50		1

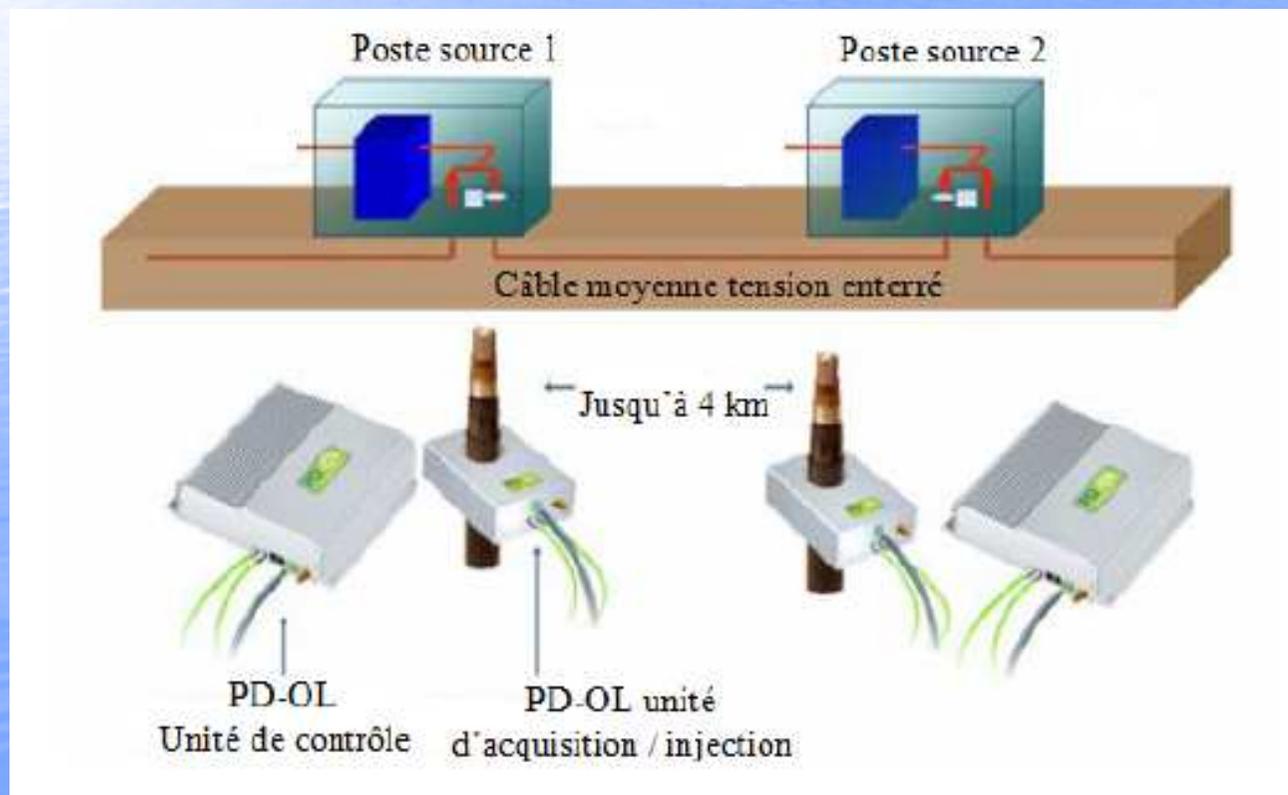
  

P1	P2	P3	P4	P5	P6
Cable 1		Jonction		Cable 2	
Résistance (Ohm/m)	0.196e-3	Résistance (Ohm/m)	0.196e-3	Résistance (Ohm/m)	0.196e-3
Conductance (S/m)	1.23e-14	Conductance (S/m)	1e-9	Conductance (S/m)	1.23e-12
Capacité (pF/m)	270	Capacité (pF/m)	700	Capacité (pF/m)	460
Inductance (nH/m)	102	Inductance (nH/m)	102	Inductance (nH/m)	102
Longueur (m)	460	Longueur (m)	1	Longueur (m)	145

Calcul

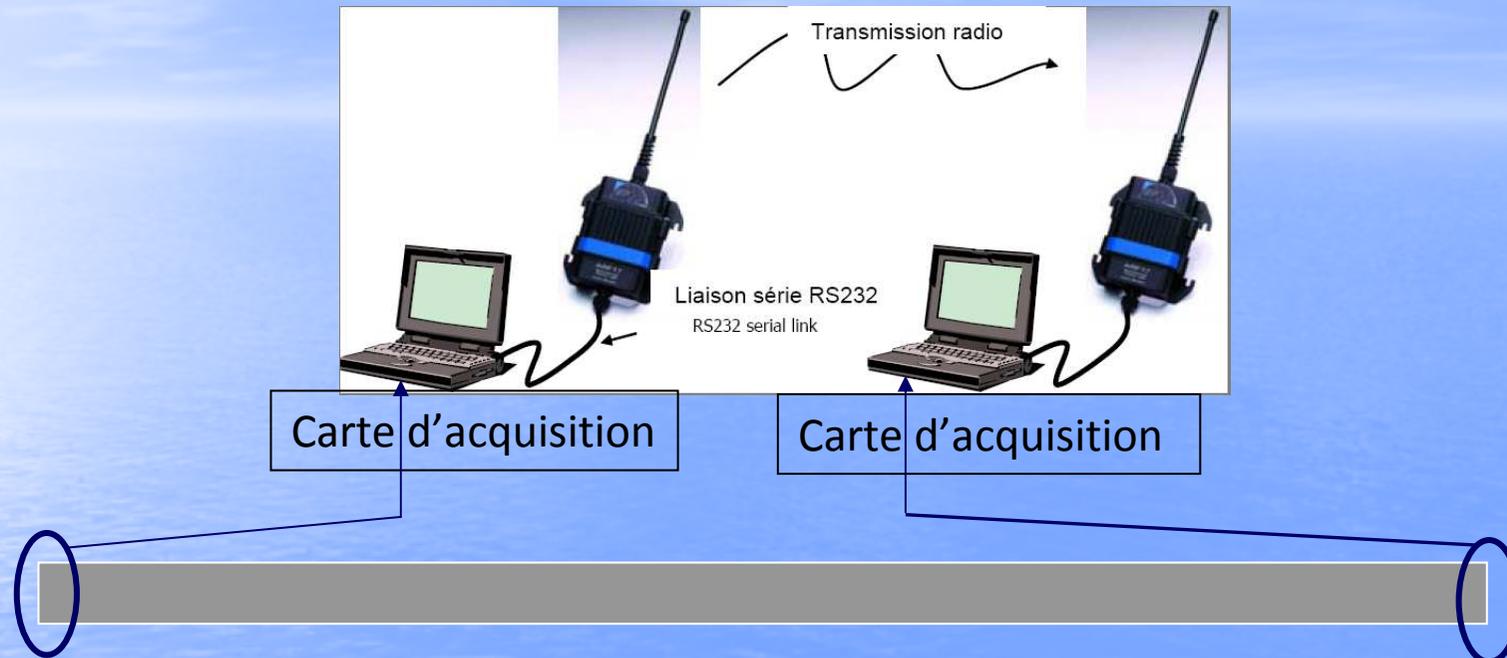


- Localisation des sources de défauts transitoires sur câbles en fonctionnement:
  - mesure très perturbée (bruit du réseau en fonctionnement, signaux parasites)
  - nécessité d'un capteur à chaque extrémité du réseau de câbles
  - nécessité de synchronisation entre les 2 capteurs distants de plusieurs kilomètres



- Synchronisation par injection de courant porteur

➤ Synchronisation par modems radio

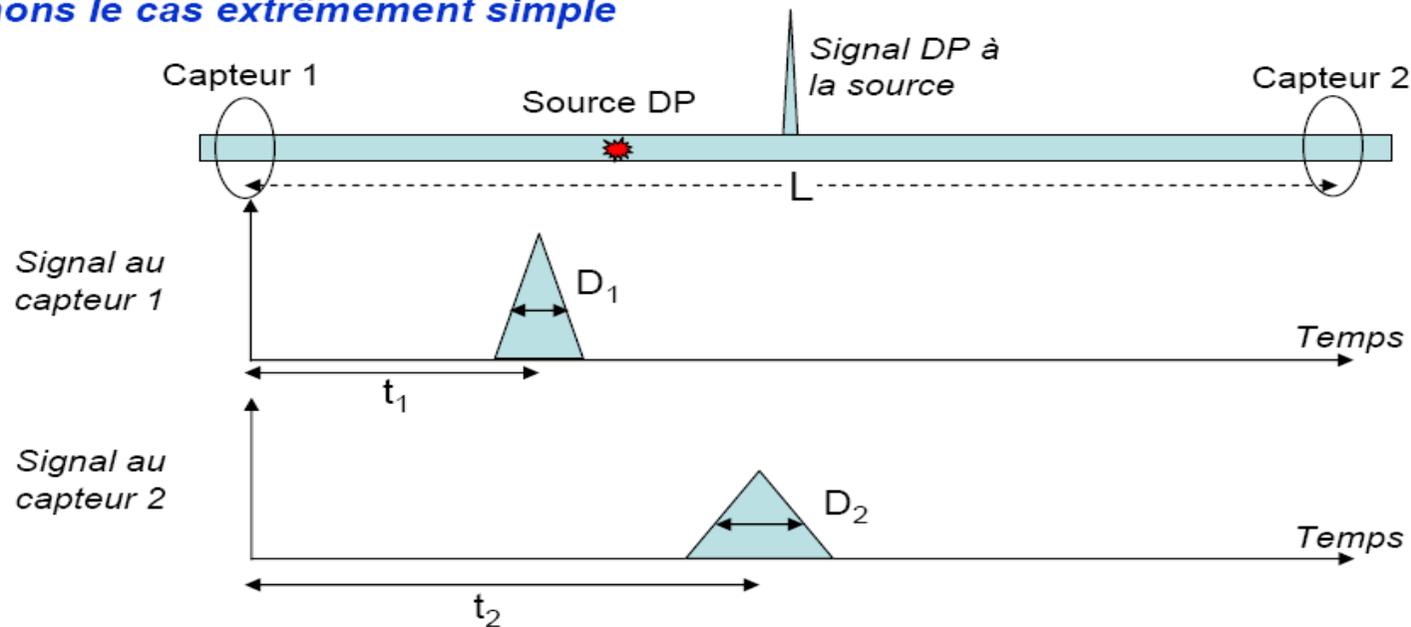


➤ La procédure de synchronisation reste:

- lourde à mettre en place
- coûteuse

- se baser sur le phénomène physique de distorsion de l'impulsion propagée et la quantifier en fonction de la durée de propagation de l'impulsion
- s'affranchir de la synchronisation

**Prenons le cas extrêmement simple**

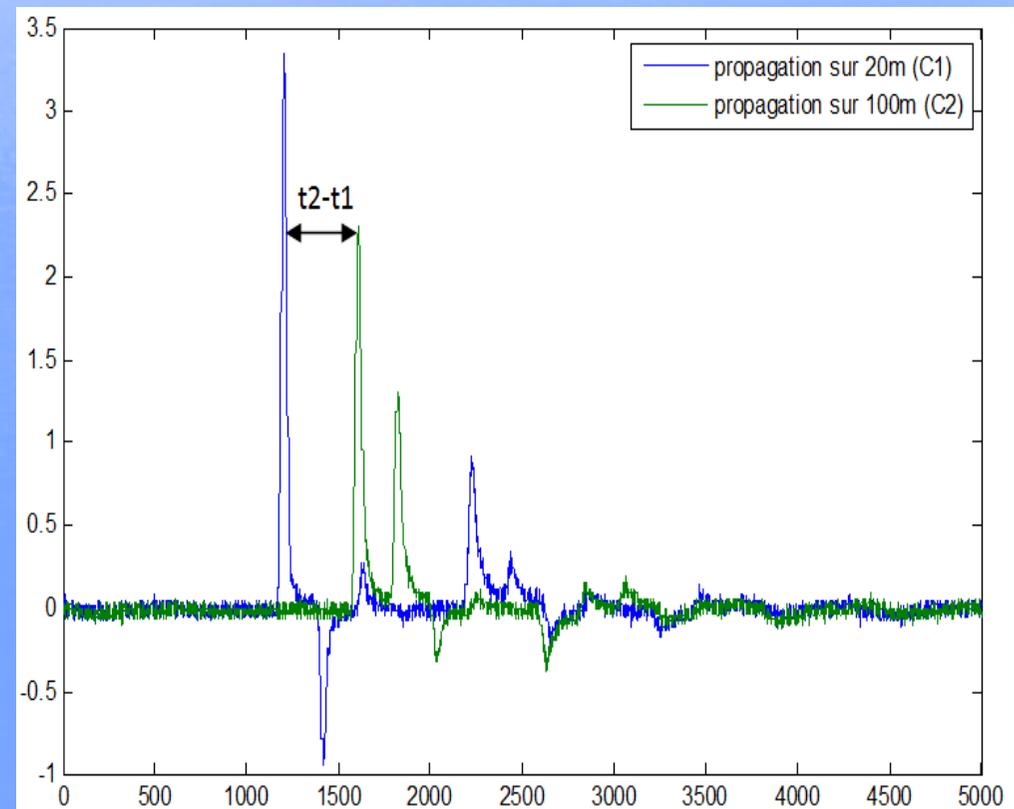
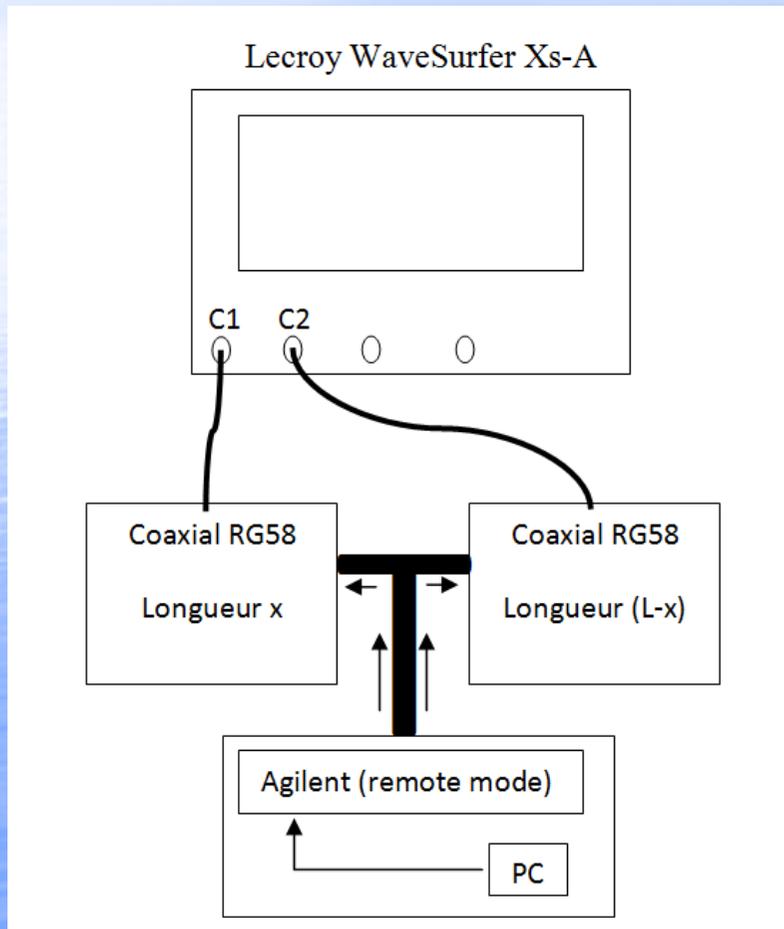


**K(câble) - dépend de la physique du câble et qui est sujet à des imprécisions**

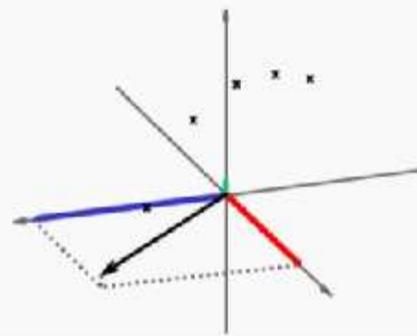
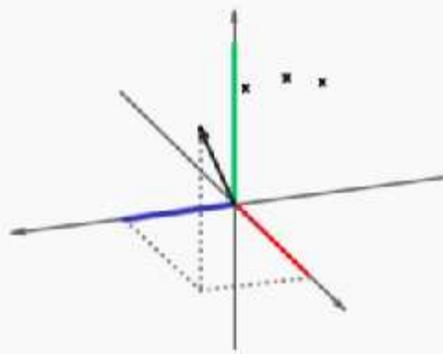
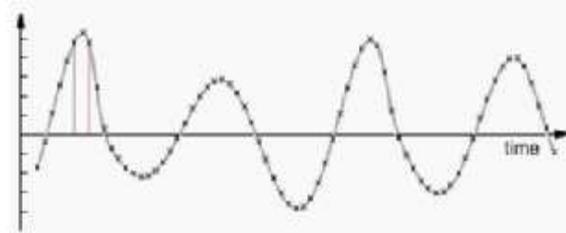
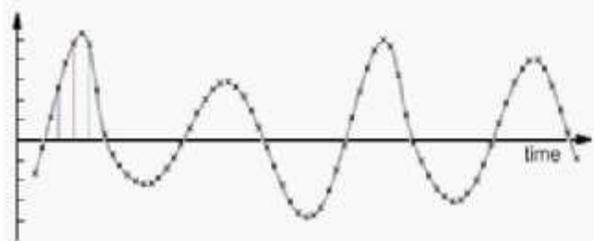
$$\left. \begin{array}{l} D_1 = K(\text{câble}) * t_1 \\ D_2 = K(\text{câble}) * t_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{D_1}{D_2} = \frac{t_1}{t_2} \text{ et } ct_1 + ct_2 = L$$

Si nous estimons D1 et D2, nous avons un système de deux équations qui nous permet d'accéder à la position

- définition d'un facteur empirique  $K(\text{câble})$  liant de manière proportionnelle la dilatation temporelle subie par le signal avec sa durée correspondante de propagation dans le câble
- expérimentation de la méthodologie:

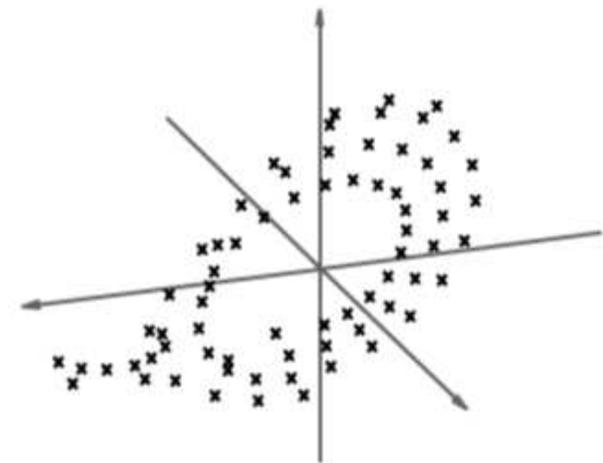


Estimation de la largeur d'impulsion – le Diagramme des Récurrences  
(Reccurence Plot Analysis)

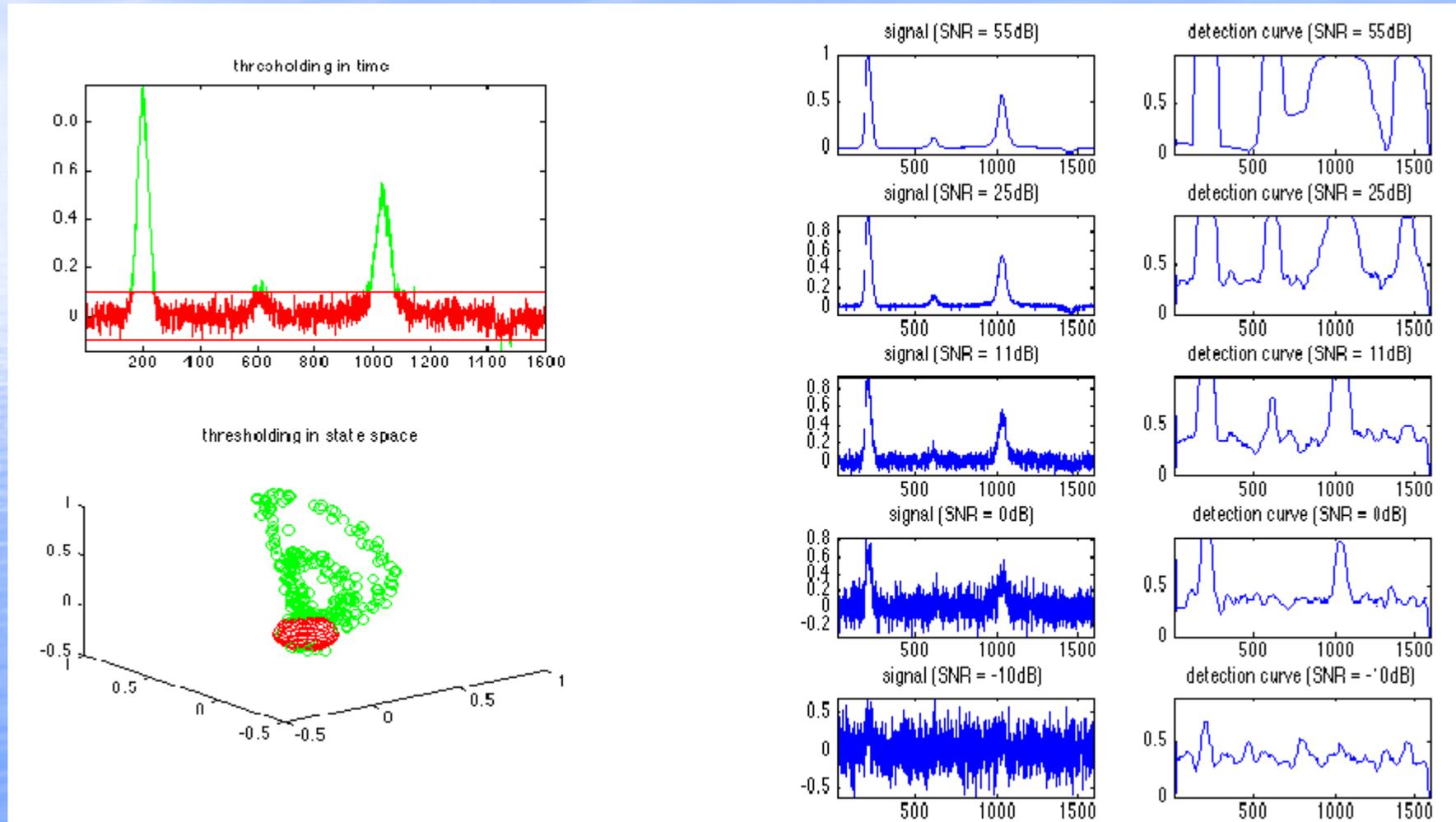


t

t+2

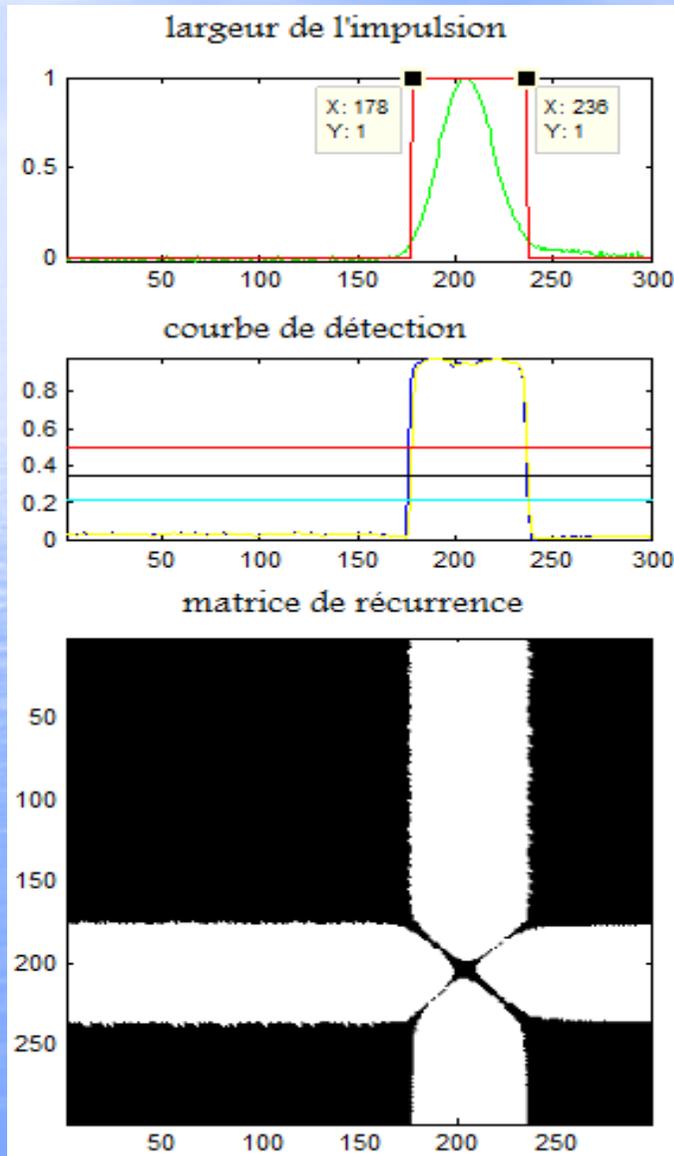


Estimation de la largeur d'impulsion - le Diagramme des Récurrences  
 (Reccurrence Plot Analysis)

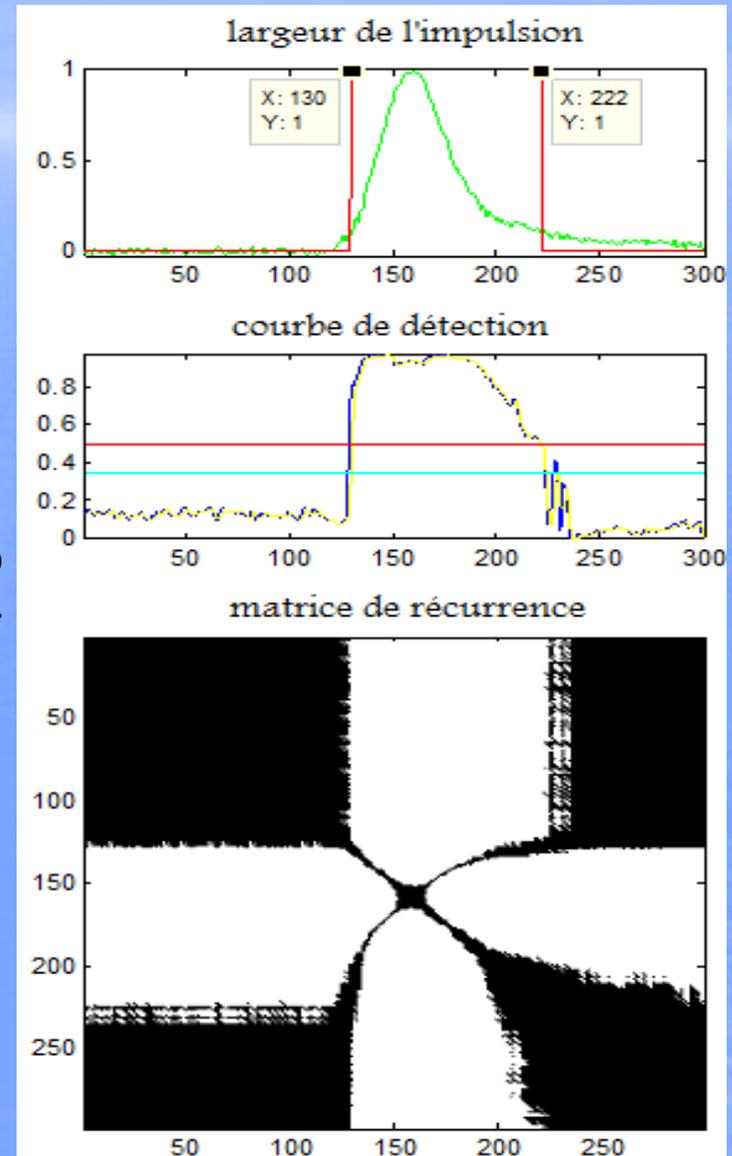


- Estimation de l'élargissement temporel  $D_i$  des impulsions par l'outil de Recurrence Plot Analysis

Propagée sur 20m



Propagée sur 100m



➤ Proportionnalité empirique apparente via la relation  $(D_2 - D_1) = K * (t_2 - t_1)$

➤ Résolution du système d'équation:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{D_2 - D_1}{K} = t_2 - t_1 \\ v * t_2 + v * t_1 = L \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} t_1 = \left( L - v * \frac{D_2 - D_1}{K} \right) * \frac{1}{2v} \\ t_2 = t_1 + \frac{D_2 - D_1}{K} \end{array}$$

$$\Rightarrow x_{DP} = v * t_1.$$

avec vitesse de propagation dans le câble

$$v = \frac{1}{\sqrt{l * c}}$$

position $x_{DP}$ estimée	configuration d'injection	erreur relative $ x - x_{DP}  / x$
21.36 m	20 m / 100 m	6.8 %
19.18 m	20 m / 57 m	4.1 %
55.77 m	57 m / 100 m	2.2 %
80.54 m	77 m / 100 m	4.6 %
53.27 m	57 m / 120 m	6.6 %

- Détermination de la position de la source de décharge partielle avec erreur de 3 à 4 mètres

# Sommaire

1. Problématique liée aux transitoires d'origine électrique
2. Détection de signaux transitoires
3. Localisation des sources de signaux transitoires dans les câbles
4. Conclusion et Perspectives

- positionnement de nos travaux visant à apporter des solutions d'amélioration au diagnostic des systèmes électriques
- difficultés techniques de diagnostic auxquelles peut répondre le Traitement du Signal
- problématique de Détection:
  - signal type d'impulsion propagée dans réseau de câbles (→ multiples transitoires avec fortes disparités)
  - performances limitées des techniques traditionnelles statistiques et énergétiques
  - détection globale permise par l'analyse en domaine de phase instantanée
- problématique de Localisation
  - nécessité du multi capteur en contexte on-line (réseau en fonctionnement)
  - nécessité de synchronisation entre capteurs distants (reste coûteuse et complexe à mettre en place)
  - s'affranchir de la synchronisation en interprétant la distorsion de l'impulsion propagée

- tester la localisation basée sur la physique en contexte off-line sur de vrais câbles réseau
- définir analytiquement la proportionnalité liant la distorsion de l'impulsion à sa durée de propagation
- modéliser les incertitudes du réseau de câbles et quantifier leur effet sur la précision de localisation
- caractérisation de la nature des défauts transitoires afin de remonter au phénomène de leur origine
- construction de nouveaux espaces de caractérisation pour les signaux de décharges partielles (ex. étude de dérivées successives de la phase par DGTC de plusieurs transitoires électriques)

**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION**