### Soutenance d'Habilitation à Diriger les Recherches

"Apports des approches paramétriques pour la surveillance des signaux électriques et les communications optiques cohérentes"

#### Vincent Choqueuse



Jury : Karim ABED-MERAIM, Polytech Orleans, Francois AUGER, Universite de Nantes, Stephane AZOU, ENIB, Pascal LARZABAL, IUT de Cachan, Erwan PINCEMIN, Orange Labs, Emanuel RADOI, UBO, Cedric RICHARD, Université Cote d'Azur.

### Table des matières

#### Parcours Professionnel

### Surveillance des Machines Électriques

Positionnement Scientifique Estimation Paramétrique Détection des interharmoniques

### Surveillance des Réseaux Électriques

Positionnement Scientifique Analyse des performances théoriques Estimation Paramétrique Caractérisation des phaseurs

Compensation dans les chaînes de communications optiques Positionnement Scientifique Travaux Actuels

### Parcours Professionnel





#### Formation Académique

- ▶ 1999 2004 : Formation Ingénieur (UTT),
- ▶ 2004 2005 : Master Recherche (UTT),
- 2005 2008 : Thèse de Doctorat (UBO / ENSTA Bretagne)
  - Financement : DGA / CNRS,
  - ▶ Laboratoire :  $E^3I^2$  (EA 3876) → Lab-STICC (UMR 6285).

### Parcours Professionnel





#### Activités Professionnelles

- > 2008 2009 : ATER à l'IUT de Brest,
- 2009 2018 : Maître de Conférences à l'IUT de Brest
  - Enseignement : Dept. GEII ( $\approx 287 \text{H/an}$ ),
  - ▶ Recherche : LBMS (EA 4325)  $\rightarrow$  IRDL (UMR 6027),
  - Administratif : Responsable LP SARII (2013 2018).
- > 2018 ... : Maître de Conférences à l'ENIB
  - ► Enseignement : Dept. Electronique (≈ 210H/an),
  - Recherche : Lab-STICC (UMR 6285).

### Parcours Professionnel





### Thématiques de Recherche

- 2005 2008 : Analyse des communications numériques en contexte non-coopératif,
- 2009 2018 : Surveillance des signaux électriques,
- 2018 ... : Développement d'algorithmes de compensation pour les systèmes de communication par fibre optique.

#### Collaborations

A. Belouchrani, F. Auger, P. Granjon, G. Bouleux.



### Synthèse des activités de recherche

### Contexte

Malgré leur robustesse, les machines électriques peuvent présenter des défauts mécaniques ou électriques.



FIGURE 1: Moteur



FIGURE 2: Éolienne



FIGURE 3: Hydrolienne

### Problématique

Pour optimiser les opérations de maintenance, il est nécessaire de détecter la présence de défauts à un stade précoce.





#### Current Signature Analysis







Problématique d'estimation / détection



• Estimation (semi-)paramétrique :  $\mathbf{x} = \mathbf{H}(\mathbf{f})\mathbf{c} + \mathbf{b}$ 

Comment estimer les fréquences f et les phaseurs c à partir du signal x?



Problématique d'estimation / détection



• Estimation (semi-)paramétrique :  $\mathbf{x} = \mathbf{H}(\mathbf{f})\mathbf{c} + \mathbf{b}$ 

Comment estimer les fréquences f et les phaseurs c à partir du signal x?

#### Positionnement Scientifique

• Exploitation de la structure fréquentielle.

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & -L \\ 1 & -L+1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_c \end{bmatrix} \qquad \qquad \overset{-\overset{-\overset{-}}{\underline{s}}}{\underset{f_0 - 2f_c \\ f_0 - f_c \\ f_0 \\ f_c \\ f_c$$



#### Estimation Paramétrique



Estimateur des moindres carrés non-linéaires (NLS) :

$$\{\widehat{\boldsymbol{\theta}}, \widehat{\mathbf{c}}\} = \arg\min_{\boldsymbol{\theta}, \mathbf{c}} \|\mathbf{x} - \mathbf{H}(\mathbf{A}\boldsymbol{\theta})\mathbf{c}\|^2$$

Technique varpro :

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} \mathbf{x}^T \mathbf{P}_{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{x}$$
  
 $\widehat{\mathbf{c}} = \mathbf{H}^{\dagger}(\widehat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{x}$ 



#### Problématiques

Comment étendre les estimateurs spectraux "classiques" ?



FIGURE 9: Allure des fonctions de coût ( $f_0 = 60.6$  Hz,  $f_c = 3.4$  Hz, Fs = 720 Hz, N = 500 échantillons, SNR = 10 dB).

► Est-il possible de forcer la structure fréquentielle a posteriori?



#### Performances statistiques



FIGURE 11: Estimation des fréquences  $f_0$  et  $f_c$  ( $f_0 = 60.6$  Hz,  $f_c = 3.4$  Hz, Fs = 720 Hz, SNR = 30 dB).



Détection des interharmoniques



Modèle de signal :

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}_1(\omega_s)\mathbf{c}_1 + \mathbf{H}_2(oldsymbol{ heta})\mathbf{c}_2 + \mathbf{b}$$

- Hypothèse  $\mathcal{H}_0$  :  $\mathbf{c}_2 = \mathbf{0}$  (pas d'interharmonique),
- Hypothèse  $\mathcal{H}_1$  :  $\mathbf{c}_2 \neq \mathbf{0}$ .



Détection des interharmoniques



Modèle de signal :

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}_1(\omega_s)\mathbf{c}_1 + \mathbf{H}_2(oldsymbol{ heta})\mathbf{c}_2 + \mathbf{b}$$

- Hypothèse  $\mathcal{H}_0$  :  $\mathbf{c}_2 = \mathbf{0}$  (pas d'interharmonique),
- Hypothèse  $\mathcal{H}_1 : \mathbf{c}_2 \neq \mathbf{0}$ .

### Problématiques

- Comment choisir l'hypothèse  $\mathcal{H}_k$  à partir de **x**?
- Est-il possible de proposer des détecteurs à faible complexité calculatoire?



#### Performances statistiques



FIGURE 13: Détection des interharmoniques. Evolution des probabilités de détection  $P[\hat{\mathcal{H}}_1|\mathcal{H}_1]$  et de fausse alarme  $P[\hat{\mathcal{H}}_1|\mathcal{H}_0]$ .



#### **Quelques** Publications

- E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, F. Auger, M. Benbouzid. Motor Current Signal Analysis Based on a Matched Subspace Detector. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017 (IF : 3.6)
- Y. Trachi, E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, T. Wang . A Novel Induction Machine Fault Detector Based on Hypothesis Testing. IEEE Transactions on Industry Applications, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016, 2017 (IF : 3.4)
- Y. Trachi, E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid. Induction Machines Fault Detection Based on Subspace Spectral Estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016 (IF: 7.5)
- E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid. Induction machine faults detection using stator current parametric spectral estimation. Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, 2014 (IF : 6.4)
- E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid. Current Frequency Spectral Subtraction and Its Contribution to Induction Machines' Bearings Condition Monitoring. IEEE Transactions on Energy Conversion, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012 (IF: 4.5)
- V. Choqueuse, M. Benbouzid, Y. Amirat, S. Turri. Diagnosis of Three-Phase Electrical Machines Using Multidimensional Demodulation Techniques. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012 (IF: 7.5)



### Contexte

- L'introduction des sources d'énergies renouvelables dans le mix énergétique complexifie considérablement la gestion du réseau électrique.
- Pour équilibrer les flux d'énergie, il est nécessaire d'apporter de l'intelligence au réseau électrique (*smart-grid*).

### Problématique

La gestion de l'équilibre nécessite

- d'observer finement et fréquemment l'état du réseau électrique au moyen de capteurs,
- d'adapter si besoin la structure du réseau.



Surveillance du réseau électrique

► Utilisation de Phasor Measurement Units (PMUs).



FIGURE 15: Système Equílibré ( $f_0 = 60$ Hz)





### Estimation des paramètres

• Modèle de signal triphasé (k = 0, 1, 2) :

$$x_k[n] = a_k \cos(2\pi f_0 n/F_s + \varphi_k)$$

► Critères de performances (standard IEEE C37.118.1) :

$$\begin{split} FE &= |f_0 - \widehat{f_0}| < 0.005 Hz \qquad & (\text{Frequency Error}) \\ TVE_k &= \frac{|c_k - \widehat{c}_k|}{|c_k|} < 0.01 \qquad & (\text{Total Vector Error}) \end{split}$$

#### Positionnement scientifique

 Utilisation d'approches paramétriques exploitant la structure triphasée pour l'estimation des paramètres.



### Problématique

Quelles sont les performances optimales atteignables en présence de signaux bruités ?



$$P[FE < 0.005] < P_{FE}^{\star}$$
  
 $P[TVE_k < 0.01] < P_{TVE,k}^{\star}$ 



#### Estimation Paramétrique



### Problématiques

- Comment exploiter pleinement la nature triphasée du signal pour estimer la fréquence et les phaseurs?
- Est-il possible d'atteindre des performances d'estimation optimales en utilisant une pré-étape de réduction de dimension ?



#### Réduction de dimension

Transformation triphasée vers biphasée :  $\mathbf{Y}^T = \mathbf{U}_c \mathbf{X}^T$ 



FIGURE 20: Transformation de Clarke : Signaux équilibrés



#### Réduction de dimension

Transformation triphasée vers biphasée :  $\mathbf{Y}^T = \mathbf{U}_c \mathbf{X}^T$ 



FIGURE 20: Transformation de Clarke : Signaux déséquilibrés



#### Réduction de dimension

Transformation triphasée vers biphasée :  $\mathbf{Y}^T = \mathbf{U}\mathbf{X}^T$ 



FIGURE 20: Transformation de Clarke : Signaux déséquilibrés

#### Problématique

Comment choisir  $\mathbf{U}$  de sorte à minimiser la perte d'information?



Estimateurs basés sur la PCA / SVD





b: Probabilité de FE compliance

FIGURE 22: Estimation de la fréquence  $f_0$  (SNR = 25 dB,  $f_0 = 65$  Hz,  $Fs = 60 \times 24$  Hz).



### Caractérisation / Compression des phaseurs



Représentation parcimonieuse des phaseurs :

$$\mathbf{c} = \mathbf{W}\boldsymbol{\alpha} \ s.t \ \|\boldsymbol{\alpha}\|_{\boldsymbol{\theta}} < \epsilon$$

### Problématiques

Comment choisir la matrice de transformation W?



Transformée de Fortescue

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-2j\pi/3} & e^{2j\pi/3} \\ 1 & e^{2j\pi/3} & e^{-2j\pi/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_+ \\ \alpha_- \end{bmatrix}$$



a: Phaseurs complexes



FIGURE 24: Représentation des composantes symétriques : Signaux Equilibrés



#### Caractérisation des phaseurs



a: Définition des 7 classes.

b: Proba.  $P_{avg} = \frac{1}{7} \sum_{k=0}^{6} P[\widehat{k} = k | \mathcal{C}_k]$ 

FIGURE 26: Caractérisation des phaseurs ( $f_0 = 65.13$  Hz,  $f_0 = 60 \times 24$  Hz, SNR = 10dB).



#### **Quelques** Publications

- V. Choqueuse, P. Granjon, F. Auger, A. Belouchrani, M. Benbouzid. Monitoring of Three-Phase Signals based on Singular-Value Decomposition. IEEE Transactions on Smart Grid, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019 (IF: 8.2)
- V. Choqueuse, A. Belouchrani, F. Auger, M. Benbouzid. Frequency and Phasor Estimations in Three-Phase Systems : Maximum Likelihood Algorithms and Theoretical Performance. IEEE Transactions on Smart Grid, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018 (IF : 8.2)
- Z. Oubrahim, V. Choqueuse, Y. Amirat, M. Benbouzid. Maximum Likelihood Frequency and Phasor Estimations for Electric Power Grid Monitoring. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018 (IF: 9.1)
- Z. Oubrahim, V. Choqueuse, Y. Amirat, M. Benbouzid. Disturbances Classification based on a Model Order Selection Method for Power Quality Monitoring. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017 (IF : 7.5)
- V. Choqueuse, A. Belouchrani, E. Elbouchikhi, M. Benbouzid. Estimation of amplitude, phase and unbalance parameters in three phase systems : analytical solutions, efficient implementation and performance analysis. IEEE Transactions on Signal Processing, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014 (IF : 5.2)



### Projet de recherche et travaux actuels



#### Contexte

Pour assurer des débits de plus en plus importants, les systèmes de communication par fibre optique se sont considérablement complexifiés :

Utilisation de la détection cohérente, du multiplexage en polarisation et des fibres multi-modes / multi-coeurs.

### Problématique

Pour garantir une qualité de service acceptable, les effets du canal optique et les imperfections hardware doivent être compensés à la réception.





FIGURE 27: Chaîne de communication optique cohérente.

#### Effets et Imperfections

- Modulateur : Déséquilibre IQ, retard entre branches, non-linéarités,
- Laser : Offset de fréquence (CFO), bruit de phase laser,
- Canal : Dispersion Chromatique (CD), Dispersion Modale de Polarisation (PMD), Effet de Kerr.



Chaîne de Communication



FIGURE 28: Exemple de système de communication par fibre optique.



### Chaîne de Communication



FIGURE 28: Exemple de système de communication par fibre optique.

### Problématique

$$\{\widehat{\mathbf{x}}, \widehat{\boldsymbol{\theta}}\} = \arg\min_{\mathbf{x} \in \mathcal{M}^N; \boldsymbol{\theta}} \mathcal{L}(\mathbf{y}, \mathbf{h}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta}))$$

- ► L(.,.) : fonction de coût (ex : moindres carrés)
- θ : paramètres inconnus de la chaîne,
- h(x; θ) : modélisation mathématique de la chaîne,



Positionnement Scientifique

Performance

Statistique





Positionnement Scientifique

Performance

Statistique





Positionnement Scientifique

Performance

Statistique





Positionnement Scientifique

Performance

Statistique



Du paramétrique....au Machine Learning.



Analogies avec les techniques de Machine Learning

Structure Multi-Couches :

$$\mathbf{X} \bigcirc \mathbf{h}_1(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta}_1) \xrightarrow{} \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_2; \boldsymbol{\theta}_2) \xrightarrow{} \cdots \xrightarrow{} \mathbf{h}_L(\mathbf{x}_L; \boldsymbol{\theta}_L) \xrightarrow{} \mathbf{Y}$$

- Modélisation de la couche  $L : \mathbf{x}_{L+1} = \mathbf{h}_L(\mathbf{x}_L; \boldsymbol{\theta}_L) + \mathbf{b}_L$
- Exemples : déséquilibre IQ, CFO, CD, PMD, Bruit de phase laser, SSM, etc.



Analogies avec les techniques de Machine Learning

Structure Multi-Couches :

$$\mathbf{X} \bigcirc \longrightarrow \boxed{\mathbf{h}_1(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta}_1)} \rightarrow \boxed{\mathbf{h}_2(\mathbf{x}_2; \boldsymbol{\theta}_2)} \rightarrow \boxed{\cdots} \rightarrow \boxed{\mathbf{h}_L(\mathbf{x}_L; \boldsymbol{\theta}_L)} \longrightarrow \mathbf{Y}$$

- Modélisation de la couche  $L : \mathbf{x}_{L+1} = \mathbf{h}_L(\mathbf{x}_L; \boldsymbol{\theta}_L) + \mathbf{b}_L$
- Exemples : déséquilibre IQ, CFO, CD, PMD, Bruit de phase laser, SSM, etc.
- Estimation du canal par apprentissage supervisé :

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}} = \arg\min_{\boldsymbol{\theta}} \|\mathbf{y}_{app} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_{app}; \boldsymbol{\theta})\|^2$$



Thèse d'Alexandru Frunza (2019 - ...)





Thèse d'Alexandru Frunza (2019 - ...)

$$\widetilde{\mathbf{X}} \xrightarrow{(\mathsf{Q}_{\mathsf{Lx}})} H_1(\theta_1) \xrightarrow{\mathsf{P}} H_2(\theta_2) \xrightarrow{\mathsf{P}} H_3(\theta_3) \xrightarrow{\mathsf{P}} H_4(\theta_4) \xrightarrow{\mathsf{P}} H_5(\theta_5) \xrightarrow{\mathsf{Y}} \widetilde{\mathbf{Y}}$$

### Problématiques

Comment exploiter les propriétés des couches d'entrée et de sortie pour estimer les paramètres du canal θ?

$$\tilde{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{H}_1(\boldsymbol{\theta}_1)\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{W}(\mathbf{x})\boldsymbol{\theta}_1$$



Thèse d'Alexandru Frunza (2019 - ...)

$$\widetilde{\mathbf{X}} \longrightarrow \begin{array}{ccc} & \mathsf{CD} & \mathsf{CFO} & \mathsf{LPN} & & IQ_{rx} \\ & \mathbf{H}_1(\theta_1) & \bullet & \mathbf{H}_2(\theta_2) & \bullet & \mathbf{H}_3(\theta_3) & \bullet & \mathbf{H}_4(\theta_4) & \bullet & \mathbf{H}_5(\theta_5) \end{array} \longrightarrow \widetilde{\mathbf{Y}}$$

### Problématiques

Comment exploiter les propriétés des couches d'entrée et de sortie pour estimer les paramètres du canal *θ* ?

$$\tilde{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{H}_1(\boldsymbol{\theta}_1)\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{W}(\mathbf{x})\boldsymbol{\theta}_1$$

 Comment détecter les symboles en entrée? (égalisation MIMO)

$$\widehat{\mathbf{x}} = \arg\min_{\mathbf{x}\in\mathcal{M}^N} \|\widetilde{\mathbf{y}} - \mathbf{H}(\widehat{\mathbf{ heta}})\widetilde{\mathbf{x}}\|^2$$



Architecture PhyCOM-net





Architecture PhyCOM-net



### Problématiques

Comment mettre à jour les paramètres de chaque couche en utilisant des séquences d'apprentissage?



Architecture PhyCOM-net



### Problématiques

- Comment mettre à jour les paramètres de chaque couche en utilisant des séquences d'apprentissage?
- Comment optimiser l'agencement des couches?



Architecture PhyCOM-net



### Problématiques

- Comment mettre à jour les paramètres de chaque couche en utilisant des séquences d'apprentissage?
- Comment optimiser l'agencement des couches?
- Comment réduire la taille des séquences d'apprentissage? Est-il possible d'utiliser des approches non-supervisées?

### Conclusion



### Synthèse des travaux au sein de l'IRDL

- Développement de l'expertise de l'équipe dans le domaine du Current Signature Analysis.
- Développement d'une nouvelle expertise de l'équipe dans le domaine des *smart-grids*.

### Conclusion



### Synthèse des travaux au sein de l'IRDL

- Développement de l'expertise de l'équipe dans le domaine du Current Signature Analysis.
- Développement d'une nouvelle expertise de l'équipe dans le domaine des *smart-grids*.

#### Perspectives au sein du Lab-STICC

- Appuyer l'équipe dans la mise en place d'algorithmes paramétriques et de Machine Learning pour la compensation des imperfections dans les dispositifs *hardware*.
- Evaluer la possibilité de mettre en place des systèmes end-to-end optimisés pour les communications par fibre optique.



### Questions

#### https://www.youtube.com/watch?v=SLhX4knLmxg