

**SGE NANTES**

**Juillet 2021**

**Djedjiga BENOUIOUA**

**Denis CANDUSSO**

**Fabien HAREL**

**Pierre PICARD**

**SATiE**

**COSYS  
COMPOSANTS  
ET SYSTÈMES**

**LABORATOIRE ECO7  
ÉCO-GESTION DES  
SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES  
POUR LES TRANSPORTS**

**FC LAB**

**Identification de régimes de fonctionnement  
de piles à combustible  
par reconnaissance de formes  
à partir d'enveloppes et de fréquences instantanées  
issues du signal de la tension**

 **Université  
Gustave Eiffel**

**efficacity** 

# PLAN

- **Contexte et objectifs**
  - Diagnostic de pile à combustible
- **Expérimentations**
  - Piles investiguées
  - Base de données expérimentales
- **Approche retenue**
  - Principe global
  - Enveloppes et fréquences instantanées - Éléments de méthode
  - Algorithme
- **Résultats**
  - Détails sur le processus de diagnostic
  - Classification - Matrices de confusion
- **Principales conclusions**

## CONTEXTE ET OBJECTIFS

### Diagnostic de pile à combustible PEMFC

Une stratégie de diag. pour :

- un **gain de sécurité** → détecter des anomalies afin d'éviter les incidents / accidents,
- un **gain de productivité** → réduire la durée d'indisponibilité et limiter les maintenances,
- une **augmentation de la durée de vie et de la fiabilité**.

#### ▪ **Différentes approches possibles**

Stratégies de diag. basées : - modèles (e.g. « de connaissance ») ou - données.

La nature non linéaire des phénomènes  $\varphi$ , les fortes interactions entre les  $\neq$  composants constituant le générateur rendent difficile une modélisation des défaillances permettant de restituer précisément les perf. réelles des systèmes PEMFC (en particulier aux  $\neq$  fréq.), un préalable à l'étape du diag.

→ **Choix d'une approche basée données (apprentissage machine)**.

#### ▪ **Enjeu de l'extraction d'info. pertinentes à partir de signaux issus de capteurs « ordinaires »**

Objectifs visés :

- **Instrumentation limitée** ( $\neq$  SIE), **non intrusive** → Utilisation de la seule Ustack évoluant librement. Mettre en avant une information diffuse, latente présente dans la morphologie du signal Ustack.
- Calculs simples ; **temps de calculs limités** ( $\neq$  analyse de singularités).
- Dépôt de brevet dans le cadre d'une recherche appliquée, « transformative ». Travaux déjà nombreux réalisés dans le domaine. → Recherche d'une « niche » pour le dépôt.

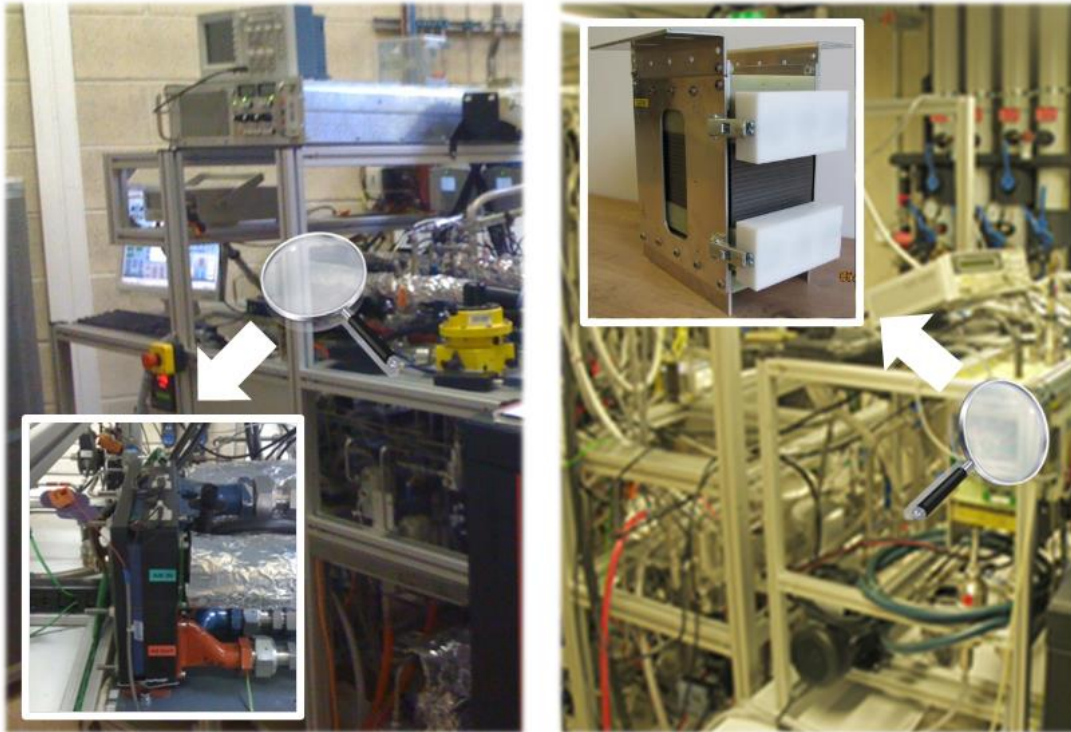
# EXPERIMENTATIONS

## Piles PEMFC investiguées

Deux stacks PEMFCs expérimentés à Belfort, FCLAB, plateforme H2 Energie, UTBM.

Gauche : pile « Auto » (CEA LITEN).

Droite : pile «  $\mu$ CHP » (RBZ, Inhouse Engineering).



### Caractéristiques et conditions nominales

Paramètres	Pile « Auto »	Pile « $\mu$ CHP »
Nombre de cellules	8	12
Surface active de l'électrode	220 cm <sup>2</sup>	196 cm <sup>2</sup>
Courant de pile	110 A	80 A
Facteur de Stœchiométrie Cathode, FSC (air)	2	2
Facteur de Stœchiométrie Anode, FSA	1.5 <b>(H<sub>2</sub> pur)</b>	1.3 <b>(75% H<sub>2</sub>+25% CO<sub>2</sub>)</b>
Pression d'entrée absolue à l'anode et à la cathode, P	<b>150 kPa</b>	<b>110 kPa</b>
Température de sortie du circuit caloporteur, T	80°C	70°C
Humidité Relative, entrées anode et cathode, HR	50 %	50%

# EXPERIMENTATIONS

## Bases de données expérimentales

Conditions expérimentales de référence (en **bleu** et en **vert**) et des autres régimes de fonctionnement (en **gras, rouge, soulignées**; **Nf = Non fait**) appliquées aux deux PACs « Auto » et «  $\mu$ CHP ».

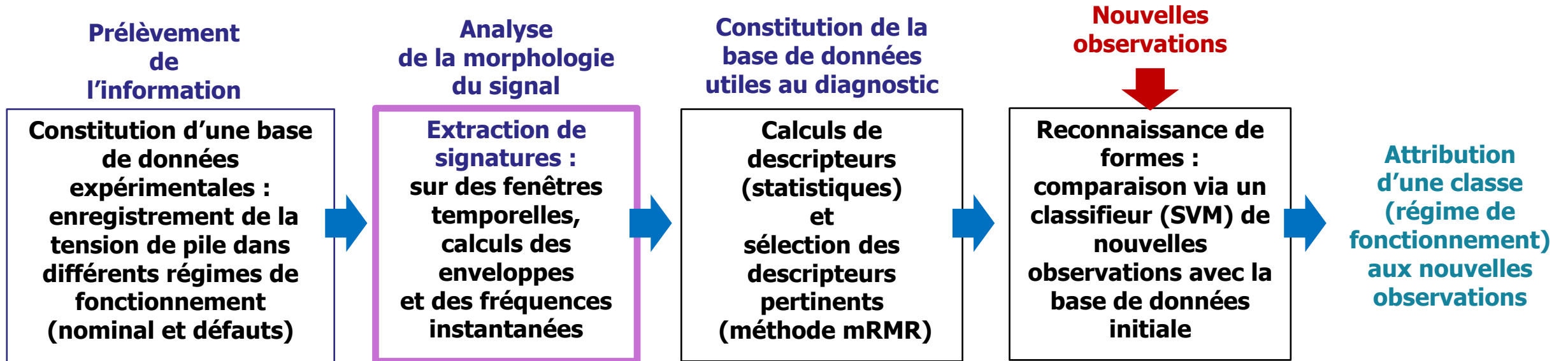
- « Défauts » = petites variations ( $\Delta$ ) autour du point de référence.
- Enregistrement de la tension de stack à 11 Hz (Labview™).

	Référence		$\Delta$ FSC		$\Delta$ FSA		$\Delta$ P		$\Delta$ T		$\Delta$ HR	
	Auto	$\mu$ CHP	Auto	$\mu$ CHP	Auto	$\mu$ CHP	Auto	$\mu$ CHP	Auto	$\mu$ CHP	Auto	$\mu$ CHP
<b>FSC</b>	2	2	<b><u>1.3</u></b>	<b><u>2.6</u></b> <b><u>1.6</u></b>	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>FSA</b>	1.5	1.3	1.5	1.3	<b><u>1.3</u></b>	<b><u>1.5</u></b> <b><u>1.2</u></b>	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3
<b>P (bar abs)</b>	1.5	1.1	1.5	1.1	1.5	1.1	<b><u>1.3</u></b>	<b>Nf</b>	1.5	1.1	1.5	1.1
<b>T (°C)</b>	80	70	80	70	80	70	80	70	<b><u>75</u></b>	<b><u>72</u></b> <b><u>65</u></b>	80	70
<b>HR (%)</b>	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	<b>Nf</b>	<b><u>54</u></b> <b><u>46</u></b>

# APPROCHE RETENUE

## Principe global

Basé sur des techniques d'analyse du signal de tension et de reconnaissance de formes



### ▪ Pourquoi ce choix ?

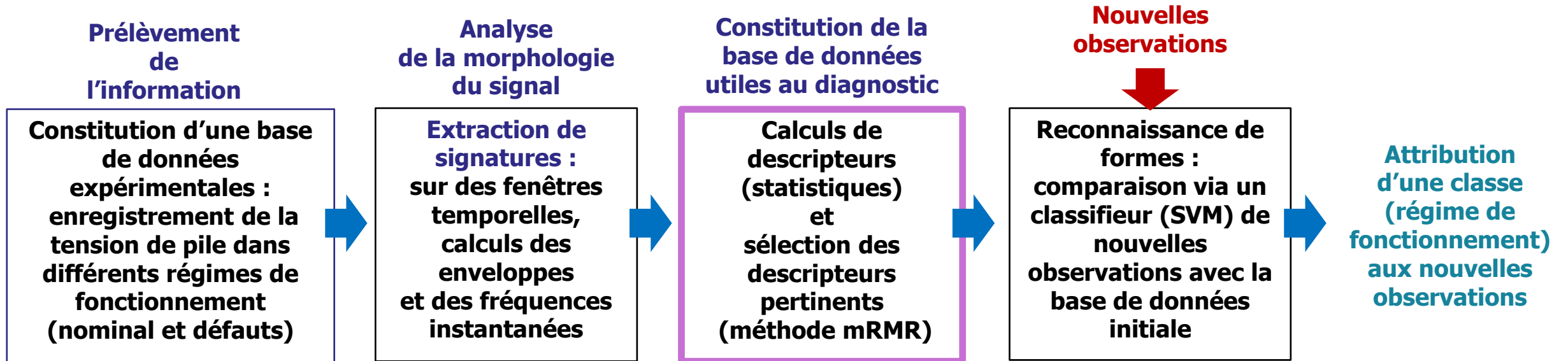
- Les tensions de PAC font apparaître des phénomènes oscillants, dont les caractéristiques évoluent dans le temps, en fonction des conditions opératoires.
- Il est donc intéressant de les décrire en faisant apparaître leurs caractéristiques instantanées.
- L'approche temps-fréquence qui fait ressortir l'enveloppe et la fréquence localisées dans le temps (instantanées) semble donc adaptée pour caractériser au mieux ce type de signaux.



# APPROCHE RETENUE

## Principe global

Basé sur des techniques d'analyse du signal de tension et de reconnaissance de formes



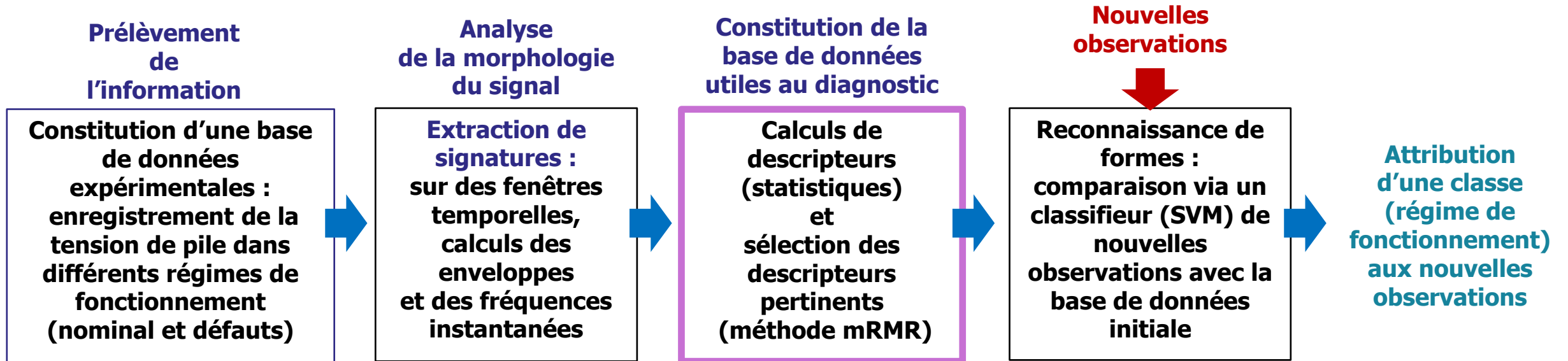
### ▪ Méthode mRMR :

Basée sur le calcul de l'info. mutuelle qui permet de mesurer la dépendance stat. d'une variable aléatoire sur une autre. L'idée de base est d'utiliser cette notion d'info. mutuelle pour : - minimiser la redondance (mR) entre les caractéristiques et - maximiser la pertinence (MR) entre la variable étudiée et la classe considérée. Ex. : passer de 24 paramètres stat. initiaux à 4 descripteurs stat. "pertinents". → Meilleure discrimination des classes + diminution de la dimension de la base de données initiale.

# APPROCHE RETENUE

## Principe global

Basé sur des techniques d'analyse du signal de tension et de reconnaissance de formes



### ▪ Application de mRMR à pile $\mu$ CHP :

8 paramètres stat. estimés sur chacun des 3 signaux : U brute, amplitude des enveloppes et f. instantanées.

8 Paramètres stat. = max., mini., moy.,  $\sigma$ , coeff. de variation, médiane, biais (« skewness »), kurtosis.

Initialement, avec 8 paramètres / signal, ce sont donc 24 descripteurs stat. qui résultent de l'analyse des 3 signaux. Suite à mRMR, 4 descripteurs stat. « pertinents » :

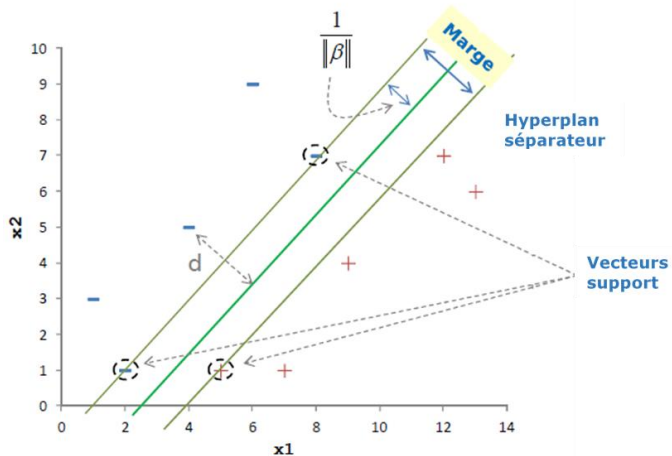
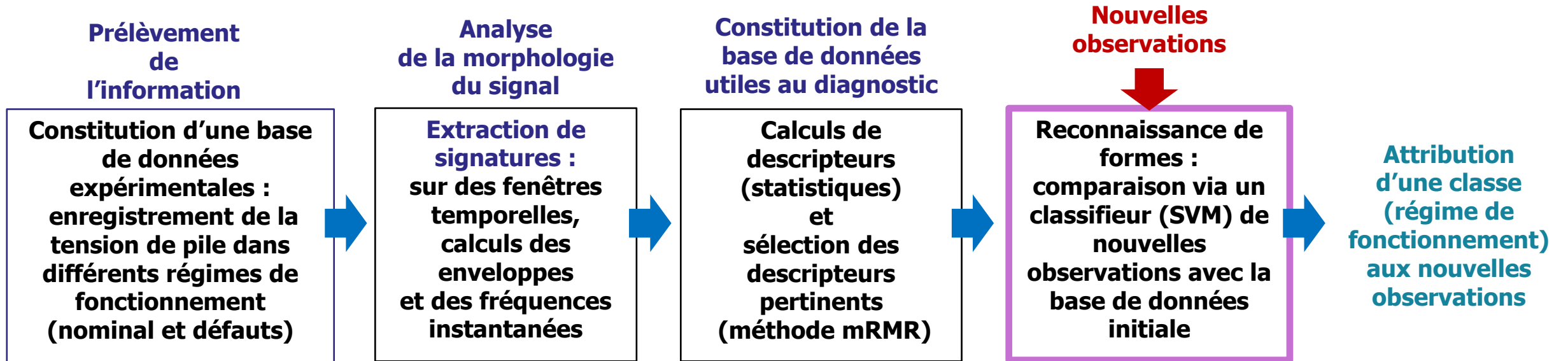
→ Coeff. de variation ( $\sigma/\text{moy}$ ) des f instantanées, moy. des amplitudes instantanées, max. et mini de U brute.



# APPROCHE RETENUE

## Principe global

Basé sur des techniques d'analyse du signal de tension et de reconnaissance de formes



### ▪ SVMs = Supports Vectors Machines

(machines à vecteurs de support ou séparateurs à vaste marge)

Classification supervisée. Le principe de maximisation de la marge est formulé de sorte à choisir une hyperplan optimal qui doit maximiser la distance entre la frontière de séparation et les points de chaque classe qui lui sont les + proches. Initialement définis pour des cas de discrimination binaire de données linéairement séparables (classes labélisées  $\{-1, 1\}$ ). Toolbox LIBSVM, Matlab™.

## APPROCHE RETENUE

### Enveloppes et fréquences instantanées – Éléments de méthode (1/3)

**La Transformée de Hilbert.** On peut associer à tout signal réel  $x(t)$  le signal analytique complexe  $z_x(t)$  (avec parties réelle et imaginaire en quadrature, i.e déphasées de  $\pm \pi/2$ ) :

$$z_x(t) = x(t) + j\check{x}(t) = x(t) + j H\{x(t)\}$$

$H$  est la Transformée de Hilbert. Elle permet d'étendre un signal réel dans le domaine complexe. Elle associe au signal  $x(t)$  le signal  $\check{x}(t)$  défini comme suit :

$$\check{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t-\tau)x(\tau)d\tau = g(t) * x(t)$$

**$H$  peut être apparentée à une opération de filtrage du signal  $x(t)$**  par un système linéaire de réponse impulsionnelle  $g(t) = 1/(\pi t)$ , appelé aussi « filtre de quadrature » (un filtre passe-tout, de bande passante infinie) **introduisant un déphasage de  $\pm \pi/2$ .**

$$\check{X}(f) = F \left\{ \frac{1}{\pi t} \right\} \cdot F\{x(t)\} = -j \operatorname{sgn}(f) X(f)$$

La Transformée de Fourier  $Z_x(f)$  du signal  $z_x(t)$  s'écrit comme suit avec  $U(f)$  échelon de Heaviside :

$$Z_x(f) = X(f) + j\check{X}(f) = (1 + j \operatorname{sgn}(f)) X(f) = 2 U(f) X(f)$$

## APPROCHE RETENUE

### Enveloppes et fréquences instantanées – Éléments de méthode (2/3)

**La Transformée de Hilbert.** On peut associer à tout signal réel  $x(t)$  le signal analytique complexe  $z_x(t)$  (avec parties réelle et imaginaire en quadrature, i.e déphasées de  $\pm \pi/2$ ) :

$$z_x(t) = x(t) + j \check{x}(t) = x(t) + j H\{x(t)\}$$

Ex. :  $x(t) = A \sin(2\pi f_0 t)$

$$\rightarrow z_x(t) = A \sin(2\pi f_0 t) + j A \sin\left(2\pi f_0 t - \frac{\pi}{2}\right) = A \sin(2\pi f_0 t) - j A \cos(2\pi f_0 t) = A \exp(j2\pi f_0 t) \exp(-j \frac{\pi}{2})$$

L'enveloppe et la fréquence instantanée peuvent alors être calculées à partir du signal analytique  $z_x(t)$ .

- **L'enveloppe**, ou amplitude instantanée (module de  $z_x(t)$ ), décrit la loi de modulation de l'amplitude :

$$\text{Amplitude instantanée}(t) = |z_x(t)|$$

Ex. :  $\text{Amplitude instantanée}(t) = A$

- **La fréquence instantanée** (dérivée de la phase de  $z_x(t)$ ) décrit la loi de modulation de phase :

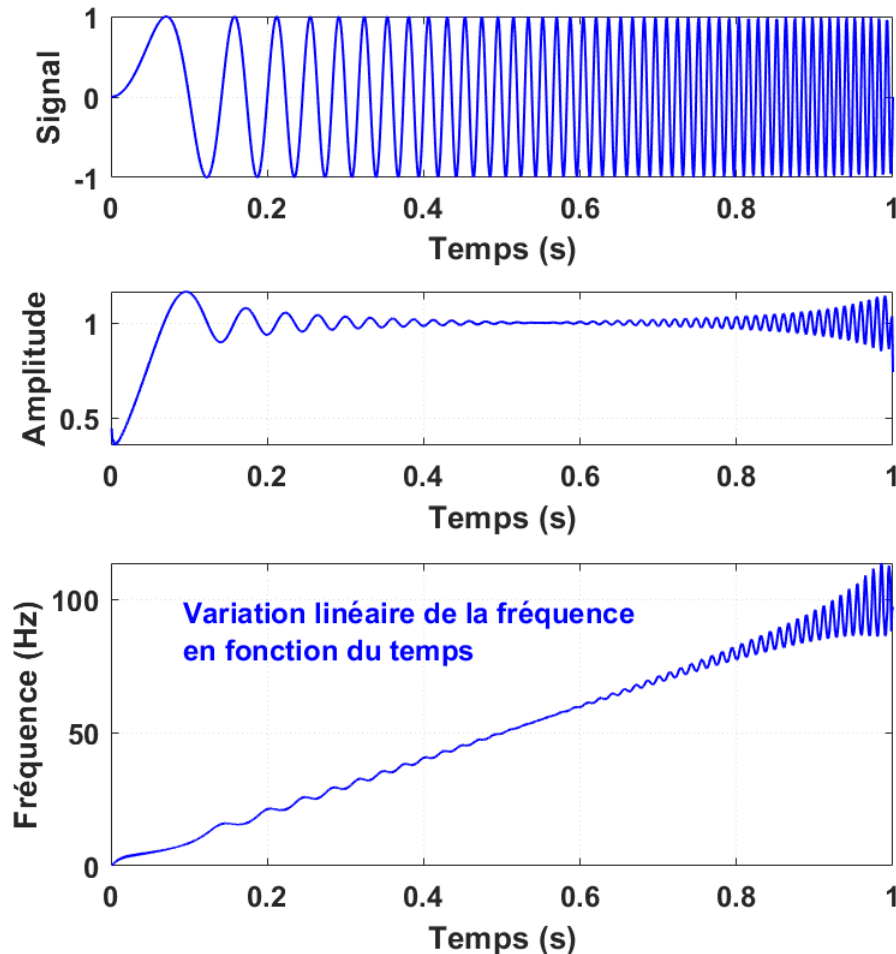
$$\text{Fréquence instantanée}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\arg(Z_x(t)))}{dt}$$

Ex. :  $\text{Fréquence instantanée}(t) = f_0$

## APPROCHE RETENUE

### Enveloppes et fréquences instantanées – Éléments de méthode (3/3)

**2 ex. simples pour comprendre.** Signaux « Chirp » modulés en fréquence  $f$  ( $Chirp(t) = a(t) \exp\{j\varphi(t)\}$ )



Ex. 1 : modulation linéaire de  $f$ ,  
de  $f_0 = 1$  Hz à  $f_{end} = 100$  Hz

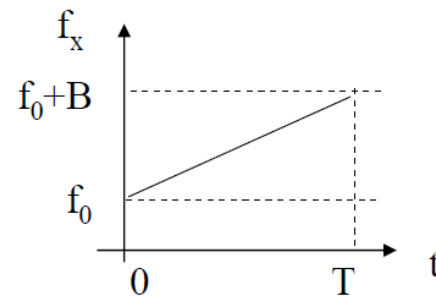
$$x(t) = A \sin\left(2\pi\left[f_0 + \frac{B}{2T}t\right]t\right)$$

**Signal analytique :**  $z_x(t) = A \exp\left(j2\pi\left[f_0 + \frac{B}{2T}t\right]t\right) \exp(-j\pi/2)$

**Enveloppe :**  $r_x(t) = |z_x(t)| = A$

**Phase instantanée :**  $\Phi_x(t) = \arg[z_x(t)] = 2\pi\left(f_0 + \frac{B}{2T}t\right)t - \pi/2$

**Fréquence instantanée :**  $f_x(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_x(t)}{dt} = f_0 + \frac{B}{T}t$



### Loi de modulation linéaire

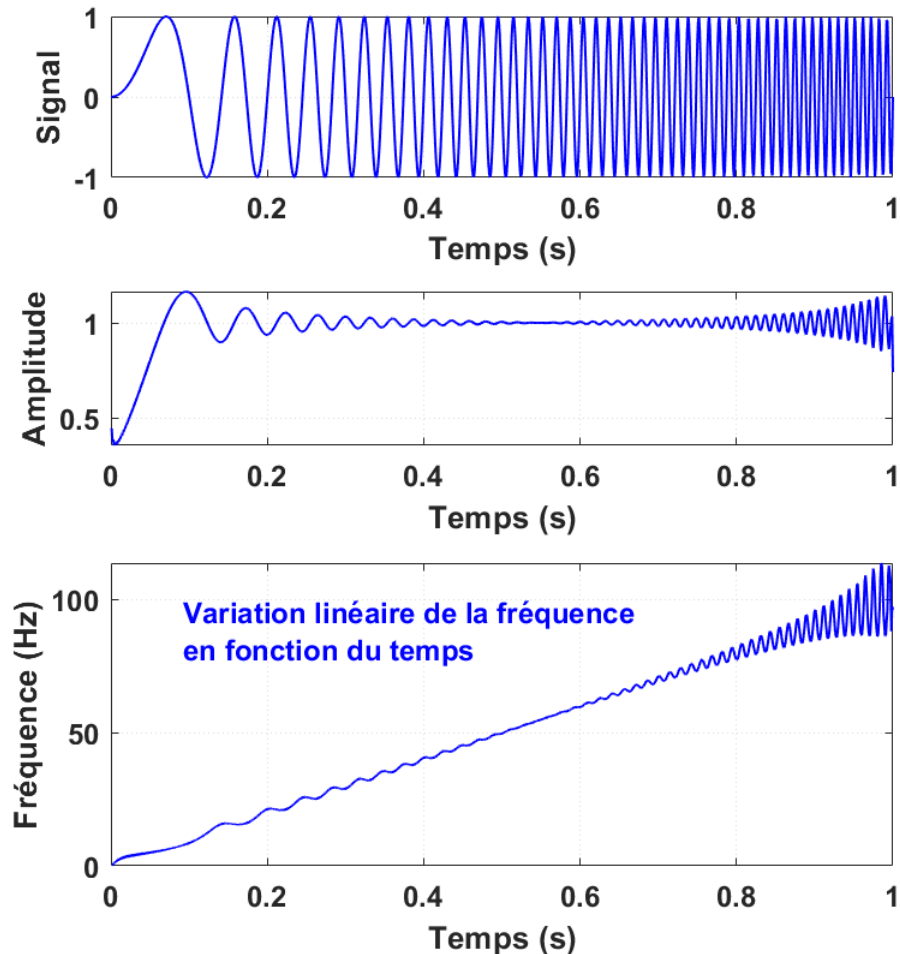
Plus de détails dans :

[https://www.creatis.insa-lyon.fr/~vray/doc\\_cours/temps-frequence\\_expose\\_3\\_Slides.pdf](https://www.creatis.insa-lyon.fr/~vray/doc_cours/temps-frequence_expose_3_Slides.pdf)

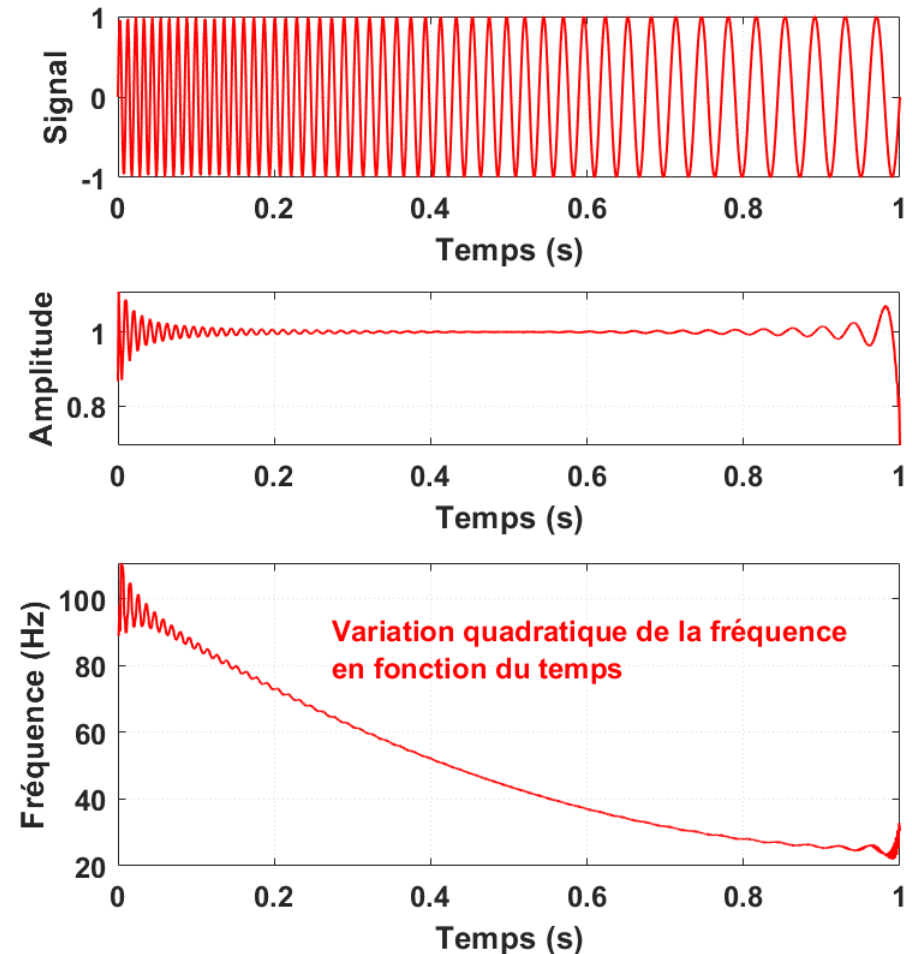
## APPROCHE RETENUE

### Enveloppes et fréquences instantanées – Éléments de méthode (3/3)

2 ex. simples pour comprendre. Signaux « Chirp » modulés en fréquence  $f$  ( $Chirp(t) = a(t) \exp\{j\varphi(t)\}$ )



Ex. 1 : modulation linéaire de  $f$ ,  
de  $f_0 = 1$  Hz à  $f_{end} = 100$  Hz



Ex. 2 : modulation quadratique concave de  $f$ ,  
de  $f_0 = 100$  Hz à  $f_{end} = 25$  Hz

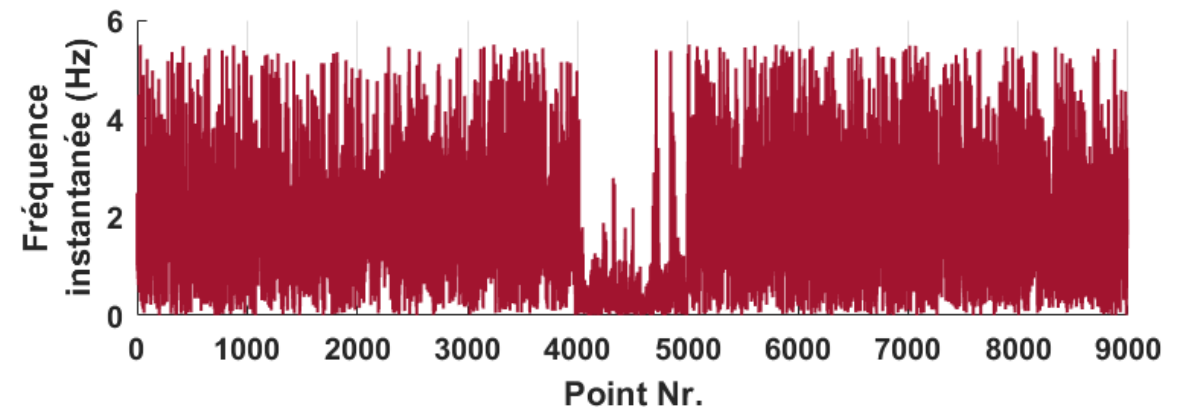
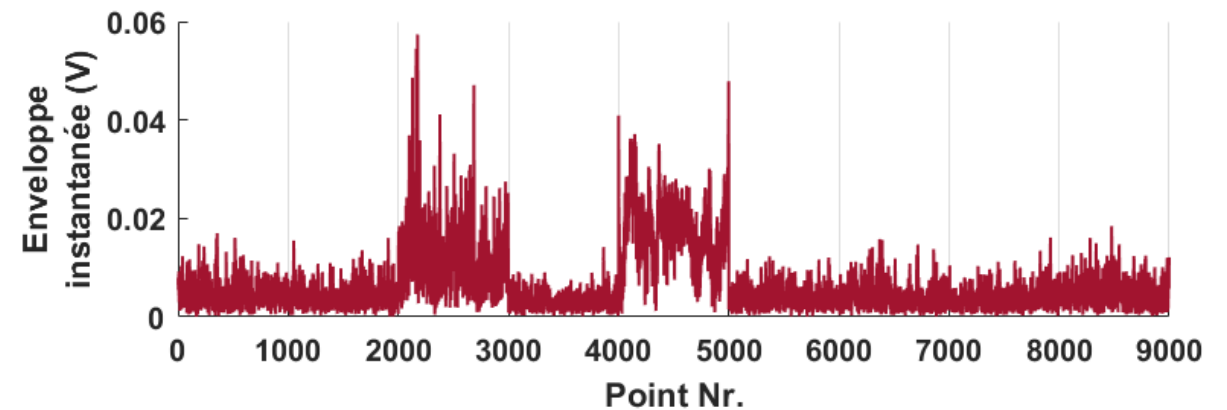
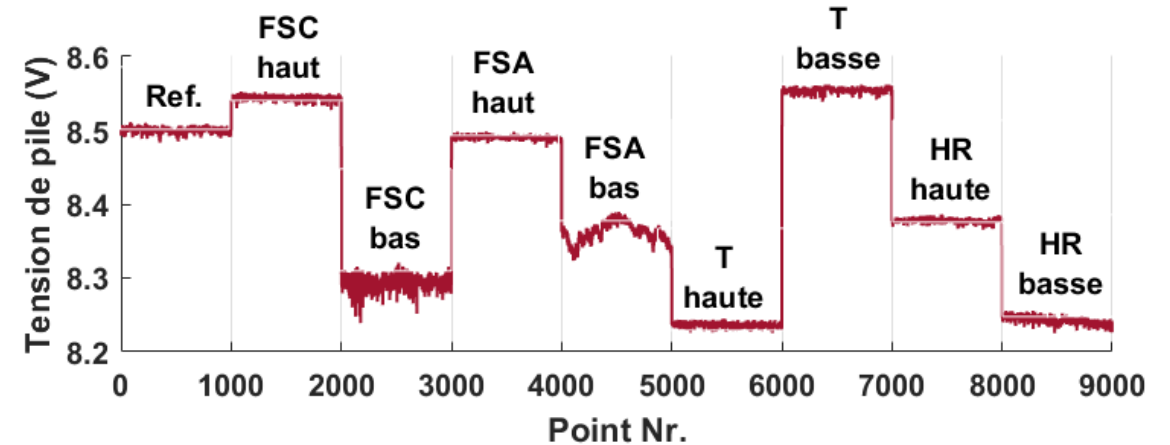
# APPROCHE RETENUE

## Enveloppes et fréquences instantanées

### Application à la tension de pile

- Exemples de signaux de tension obtenus pour la PAC destinée à une application stationnaire et placée dans différents régimes de fonctionnement (en haut),
- Courbes des amplitudes des enveloppes instantanées / régime (au milieu),
- Courbes des fréquences instantanées / régime (en bas).

Les 9 extraits présentés, pour chacune des 9 conditions opératoires considérées, comportent 1000 points correspondant à une durée proche de 1.5 min (fréquence de 11 Hz).



# APPROCHE RETENUE

## Algorithme

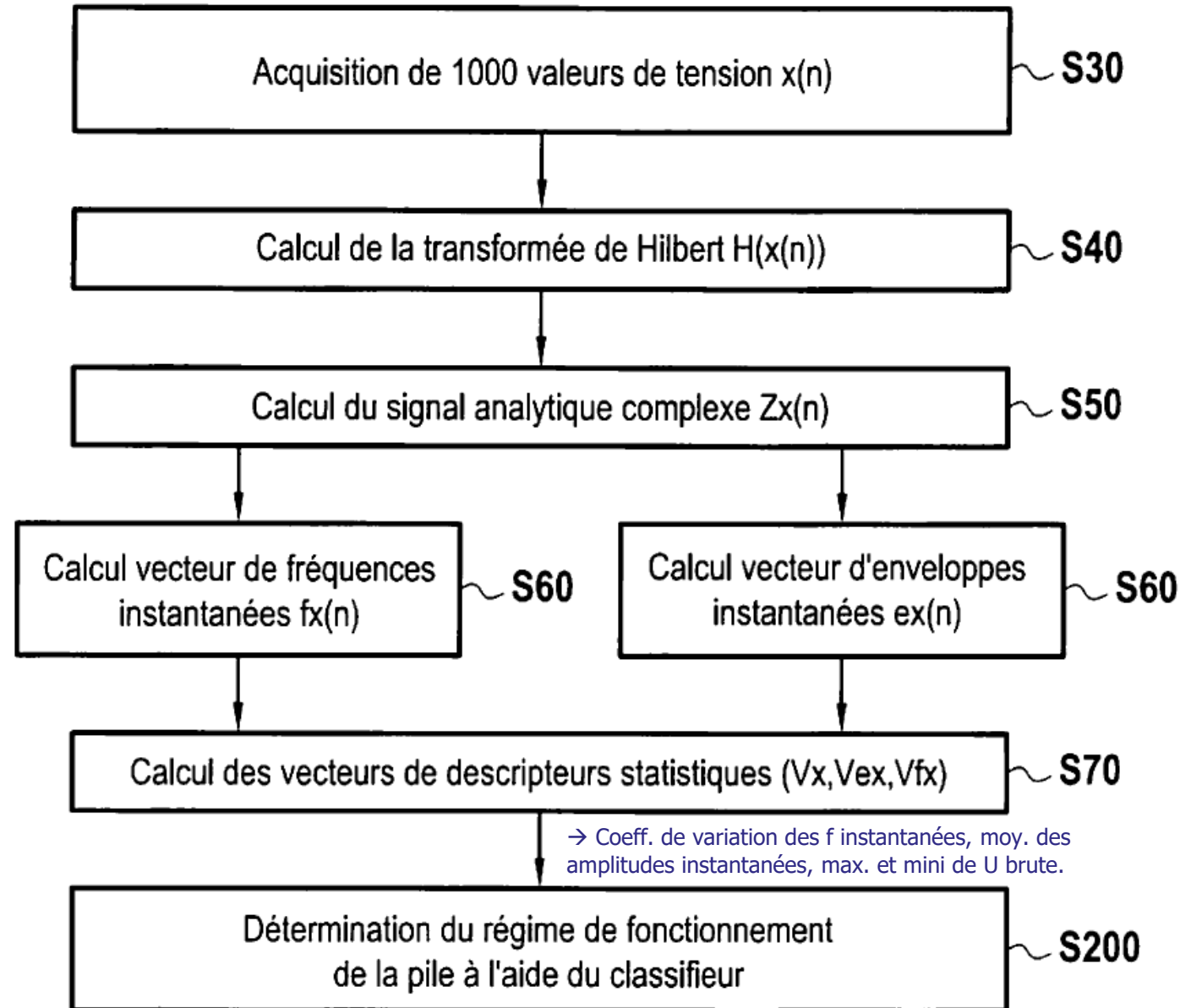
**Cf. brevet :**  
**FR3071084 (A1) — 2019-03-15**

**Détails sur l'algo. du classifieur  
et de sa configuration :**

<https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=FR&NR=3071084A1&KC=A1&FT=D&ND=&date=20190315&DB=EPODOC&locale=#>

Partie analyse du signal

Partie traitement de l'info.





# RESULTATS

## Détails sur le processus de diagnostic

Liés aux calculs des signatures, à la reconnaissance de formes appliqués aux deux PACs.

	<b>Pile « Auto »</b>	<b>Pile « <math>\mu</math>CHP »</b>
<b>Nombre de classes considérées (régimes de fonctionnement)</b>	8	9
<b>Nombre d'individus (1 individu = 1000 points) pour l'apprentissage</b>	8×20	166
<b>Nombre d'individus pour la phase de test</b>	80 (= 8×10)	85 (= 8×10 + 5)
<b>Nombre de descripteurs (paramètres statistiques pertinents)</b>	5	4
<b>Temps de calcul des signaux d'enveloppes et de fréquences instantanées</b>	0.3 ms / individu	0.4 ms / individu
<b>Temps de calcul des paramètres statistiques</b>	0.2 ms / individu	0.3 ms / individu
<b>Temps de calcul lié à la phase d'apprentissage (construire les SVMs)</b>	0.2 s	0.2 s
<b>Temps de calcul lié à la phase de test (classer les individus)</b>	0.8 ms pour les 80 individus	1 ms pour les 85 individus
<b>Taux de bonne classification</b>	97.5 % (2 / 80 individus mal classés)	98.8 % (1 / 85 individu mal classé)

Rque : En général : Durée d'essai / condition ou classe  $\approx$  45 min.

Durée du signal / spectre de fréquences instantanées  $\approx$  1,5 min (1000 points).

Nbre de spectres de fréquences instantanées / condition ou classe = 30 (dans le texte du brevet 100).

# RESULTATS

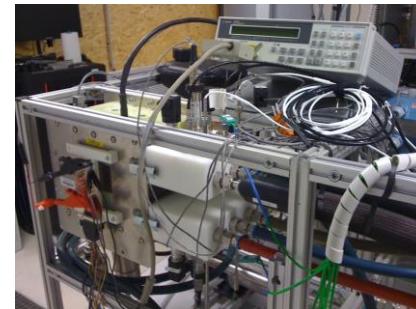
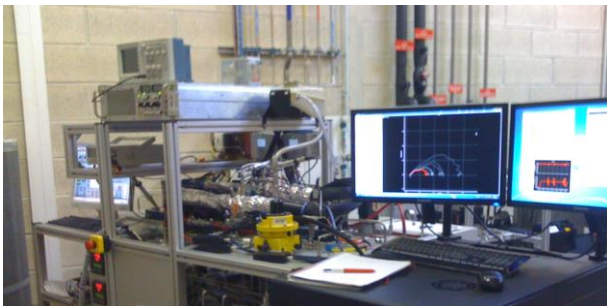
## Classification - Matrices de confusion (en %)

« Auto »	Classe Référence	Classe $\Delta$ FSC	Classe $\Delta$ FSA	Classe $\Delta$ P	Classe $\Delta$ (FSA + P)	Classe $\Delta$ (FSC + P)	Classe $\Delta$ (FSC + FSA)	Classe $\Delta$ (FSC + FSA + P)
Référence	90	0	0	0	10	0	0	0
$\Delta$ FSC	0	100	0	0	0	0	0	0
$\Delta$ FSA	0	0	100	0	0	0	0	0
$\Delta$ P	0	0	0	100	0	0	0	0
$\Delta$ (FSA + P)	0	0	0	0	100	0	0	0
$\Delta$ (FSC + P)	0	0	0	0	0	100	0	0
$\Delta$ (FSC + FSA)	0	0	0	0	10	0	90	0
$\Delta$ (FSC + FSA + P)	0	0	0	0	0	0	0	100

« $\mu$ CHP »	Classe Référence	Classe $\Delta$ FSC haut	Classe $\Delta$ FSC bas	Classe $\Delta$ FSA haut	Classe $\Delta$ FSA bas	Classe $\Delta$ T haute	Classe $\Delta$ T basse	Classe $\Delta$ HR haute	Classe $\Delta$ HR basse
Référence	100	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta$ FSC haut	0	100	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta$ FSC bas	0	0	100	0	0	0	0	0	0
$\Delta$ FSA haut	0	0	0	100	0	0	0	0	0
$\Delta$ FSA bas	0	0	0	0	100	0	0	0	0
$\Delta$ T haute	0	0	0	0	0	100	0	0	0
$\Delta$ T basse	0	0	0	0	0	0	100	0	0
$\Delta$ HR haute	0	0	0	0	0	0	0	100	0
$\Delta$ HR basse	0	0	20	0	0	0	0	0	80

## PRINCIPALES CONCLUSIONS

- Diag. de PEMFCs avec instrumentation très limitée. Méthode non-intrusive sans excitation / perturbation externe spécifique. Basée sur la seule mesure de la tension du stack. → Méthode « peu coûteuse ».
- La méthode repose sur des techniques d'analyse du signal (calculs d'enveloppes et de fréquences instantanées) et de traitement de l'information (réduction de la dimensionalité : mRMR ou autres : « Wrapper » + reconnaissances de formes : SVM ou autres : kppv, ...).
- Temps de calcul réduits (simplicité des calculs - Transformée de Hilbert). → Outil implantable dans une technologie embarquée.
- Un large panel de défauts peut être identifié ( $\Delta$  de débits, P, T, ppm CO + combinaisons de défauts simultanés), y compris lorsqu'ils correspondent à de faibles déviations / au fonctionnement nominal. → Caractère « préventif » du diag.
- Portabilité de la méthode étudiée sur 2 stacks, conçus pour des applications  $\neq$  : transport et stationnaire.



**Denis Candusso**

denis.candusso@univ-eiffel.fr

 **Université  
Gustave Eiffel**

**SATIÈ**

**COSYS  
COMPOSANTS  
ET SYSTÈMES**

**LABORATOIRE ECO7  
ÉCO-GESTION DES  
SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES  
POUR LES TRANSPORTS**

 **FC LAB**

**efficity** 