

# Modélisation, contrôle et simulation d'un système pile à combustible destiné à une application stationnaire



L.E.G



**GEVIQ'2002 Marseille**

**D. Candusso, I. Valero, A. Walter,  
E. Rullière, S. Bacha**



**GIE IDEA**

**Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble**

# Contexte (1)

---

- Les verrous technologiques concernant les PAC sont levés petit à petit
- Recherche de l'indépendance et de la diversification énergétique
- Prise en compte croissante de considérations environnementales (réduction des émissions de CO<sub>2</sub>)
- Possibilité de découpler dans le temps consommation et production d'électricité à partir d'énergies renouvelables

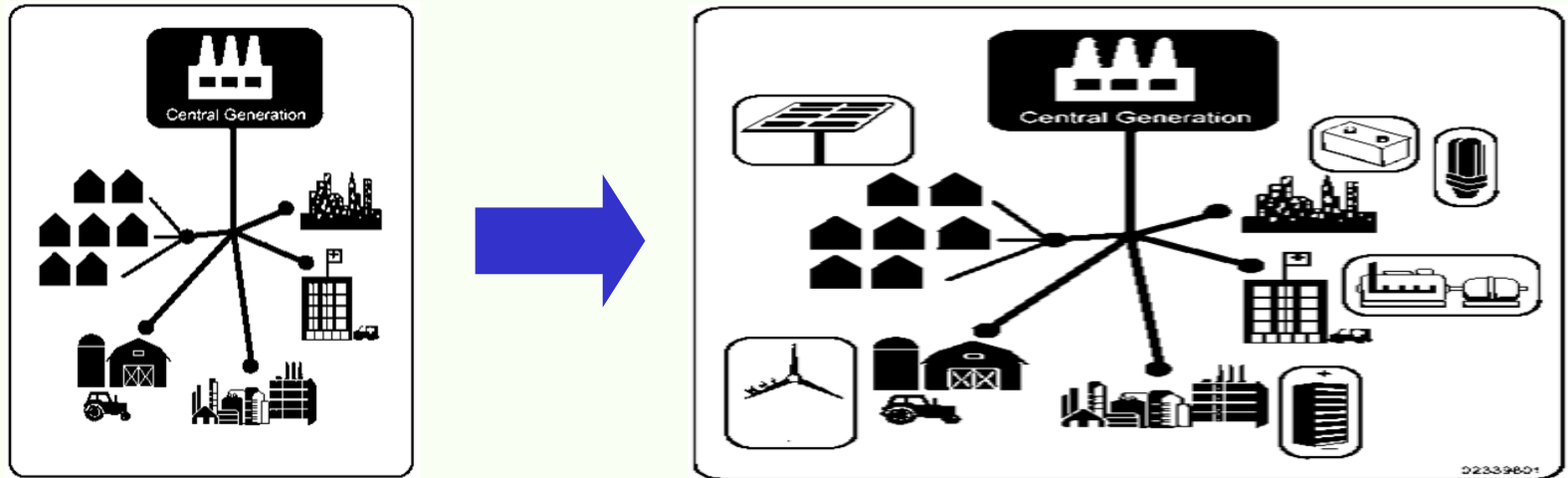
Eolien



Solaire

# Contexte (2)

- Législation nouvelle plus favorable à la production décentralisée de l'énergie



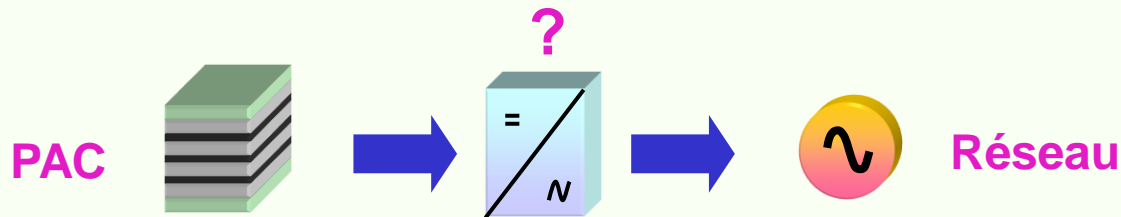
Vers un nouveau concept de réseau : Génération d'Énergie Distribuée

- Intérêt offert par la cogénération

# Objectifs

---

- Etudier le mode de connexion de la PAC au réseau, via une interface électronique de puissance appropriée

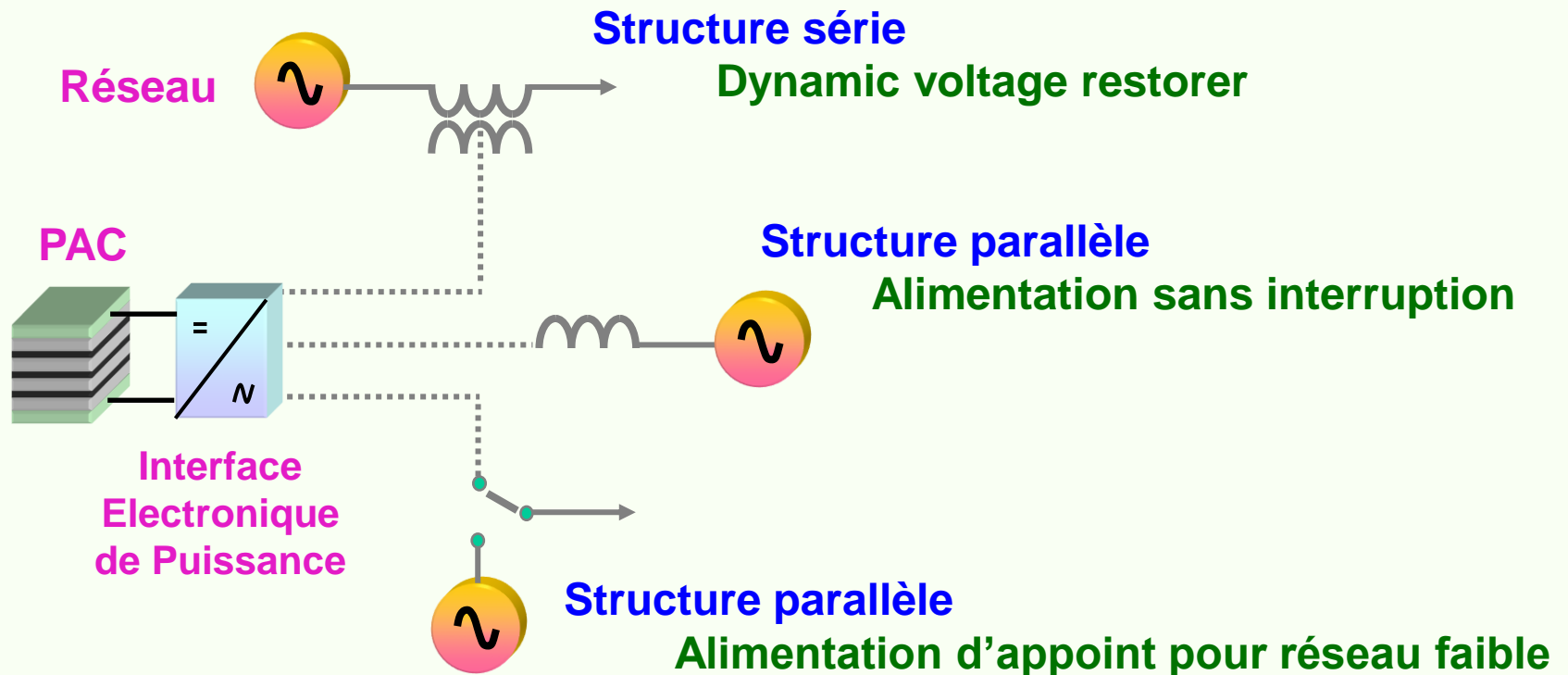


- Proposer une structure de commande des convertisseurs
- Envisager une ou des stratégies de commande de la PAC (commande extrême)
- Gérer la quantité et la qualité de l'énergie produite et injectée sur le réseau

# Applications envisageables

## Types de fonctionnement

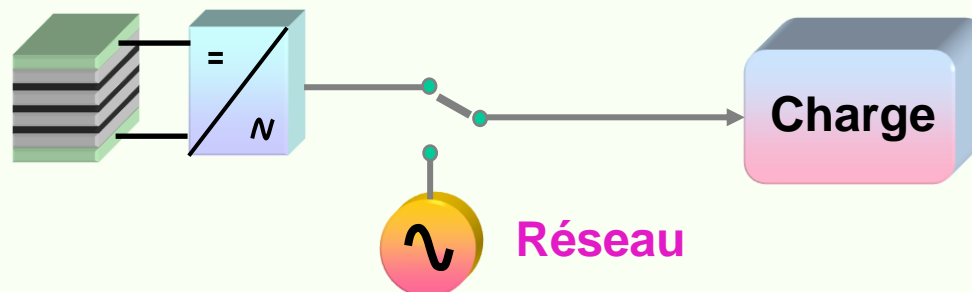
- Autonome (îlot)
- PAC connectée au réseau



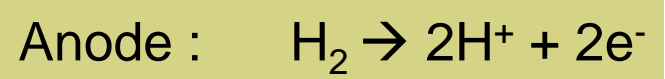
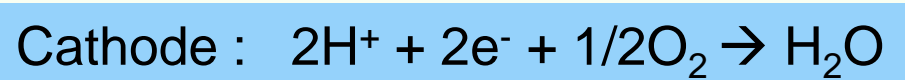
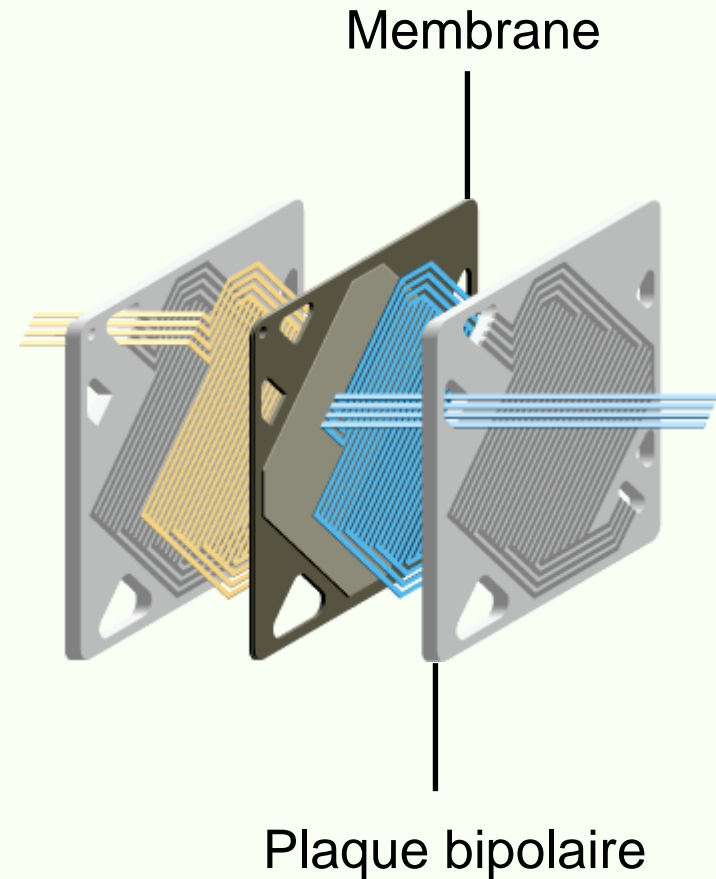
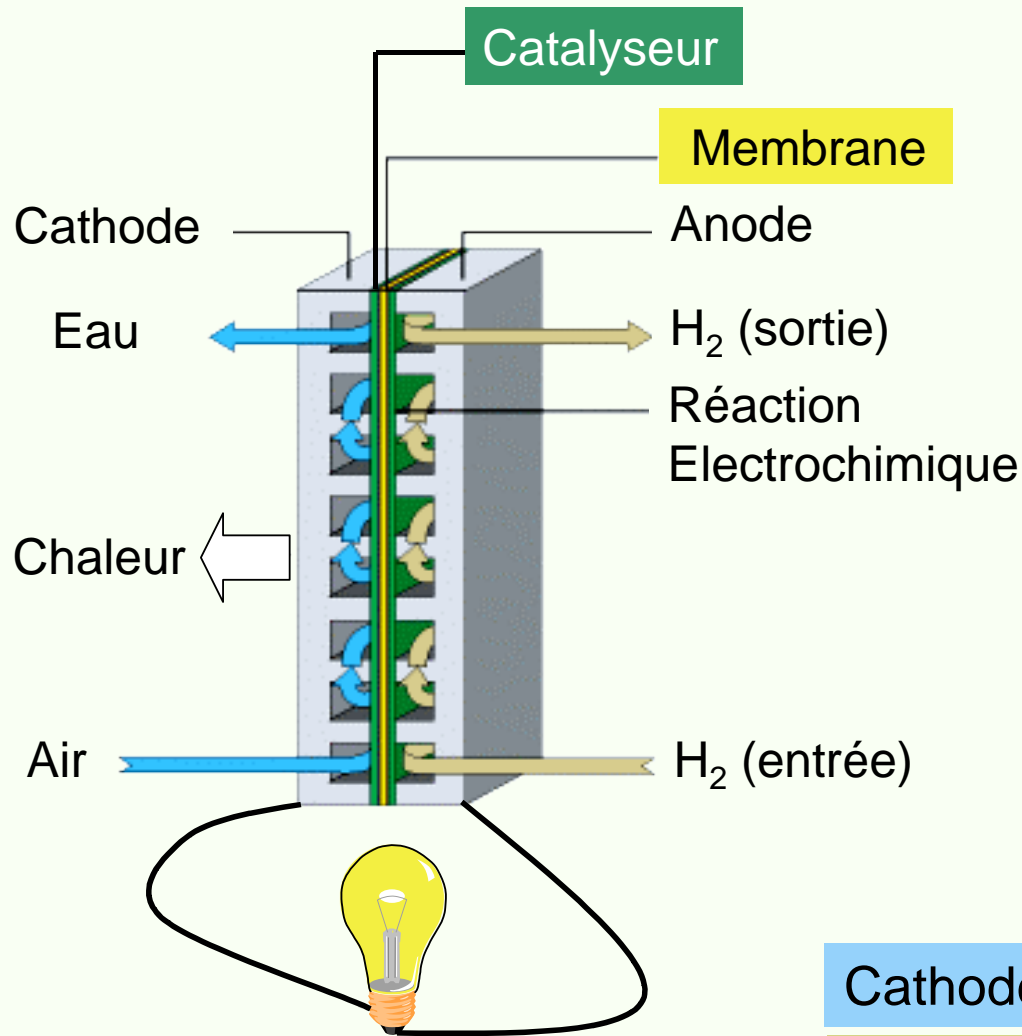
# Application choisie

---

- **Application :** Production décentralisée d'énergie électrique  
Soutien au réseau
- **Pile utilisée :** Pile à Membrane Echangeuse de Protons (PEM) de 300 kW
- **Réseau concerné :** Réseau triphasé de distribution BT (230/400 V)
- **Utilisations prévues :** Fourniture de puissance active et réactive  
Compensation des harmoniques  
Compensation des creux de tension
- **Type de connexion au réseau :** Parallèle, sans transformateur d'isolation



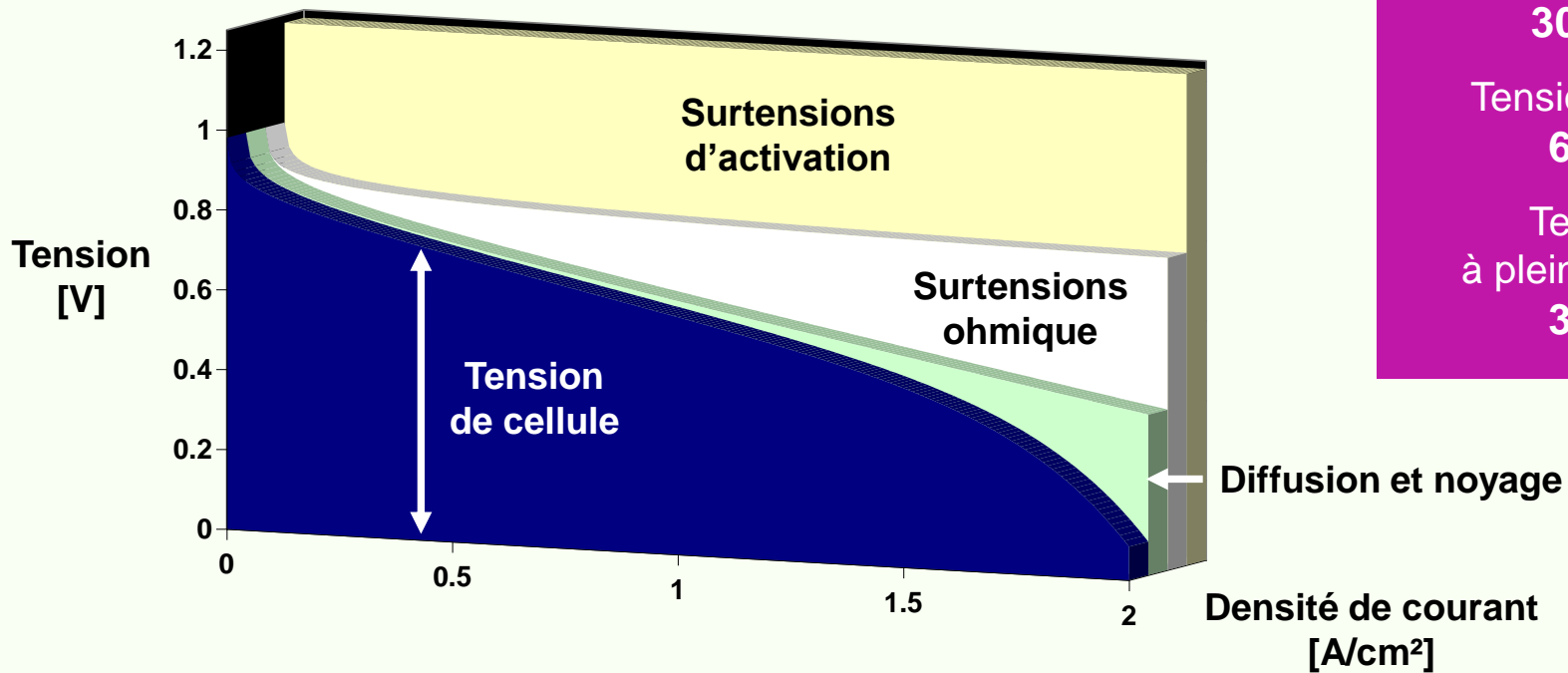
# Principe de la pile PEM



# Modèle de PAC : adapté à l'application «contrôle commande»

## ■ Modèle statique = source de tension + résistance série

La courbe de polarisation est calculée à partir d'une relation semi-empirique liant densité de courant, pressions et température



Puissance maximale

**300kW**

Tension à vide

**600V**

Tension

à pleine charge

**300V**

## ■ Consommation des auxiliaires calculée en fonction de la puissance délivrée par le stack



# Modèles des convertisseurs

---

## ■ 3 niveaux de modélisation

- **Le modèle statique** → dimensionnement
- **Le modèle moyen** → transitoires et régime permanent  
→ réglages
- **Le modèle instantané** → perturbations hautes fréquences  
→ validation du modèle moyen

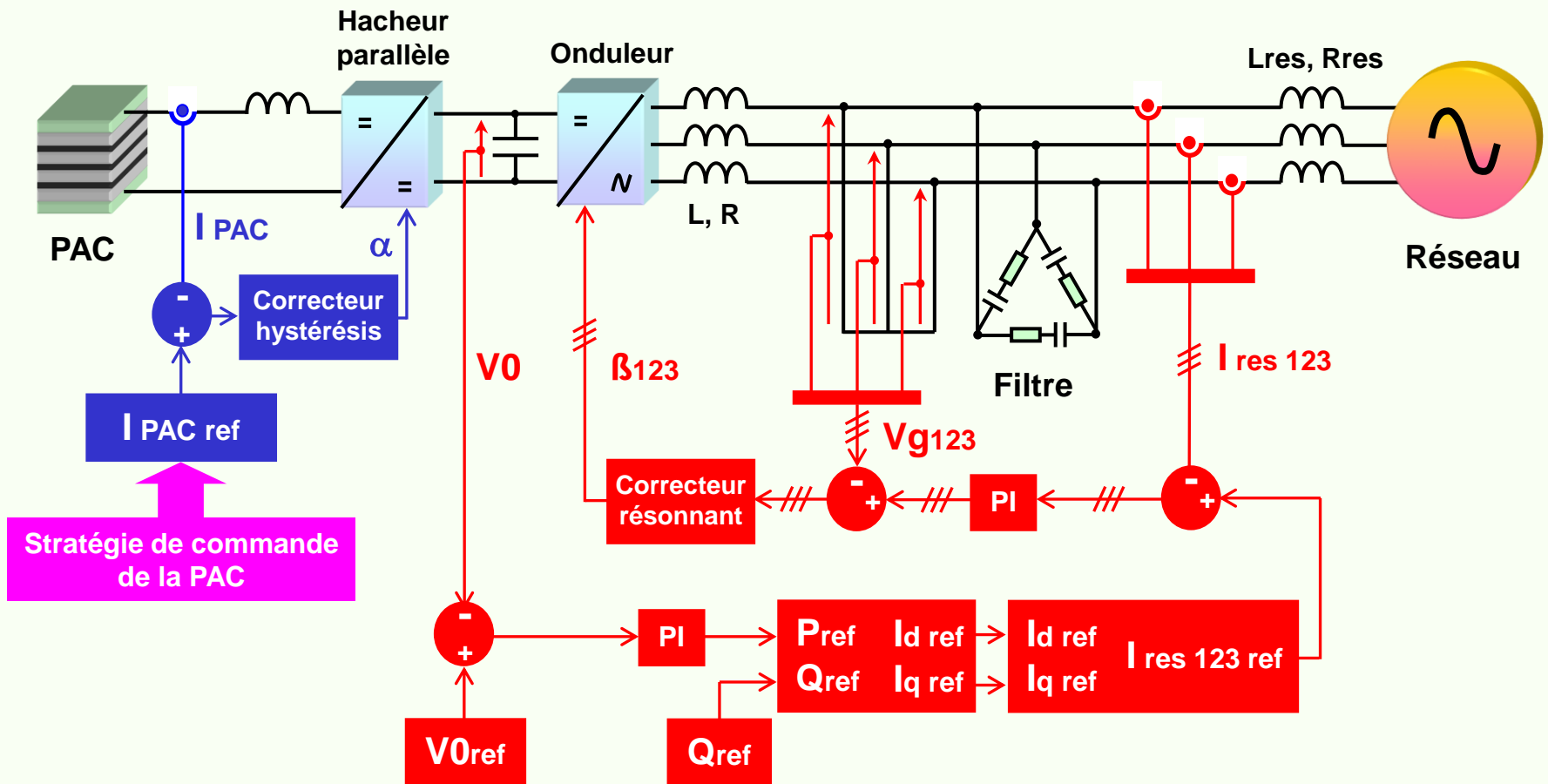
## ■ 3 hypothèses de départ

- **Interrupteurs parfaits** → résistance nulle à l'état fermé  
→ résistance infinie à l'état ouvert  
→ commutations instantanées
- **Sources parfaites**
- **Éléments passifs invariants et linéaires**

**Solveur Matlab/Simulink**

# Topologie et commande

- Topologie basée sur l'association hacheur parallèle - onduleur de tension MLI



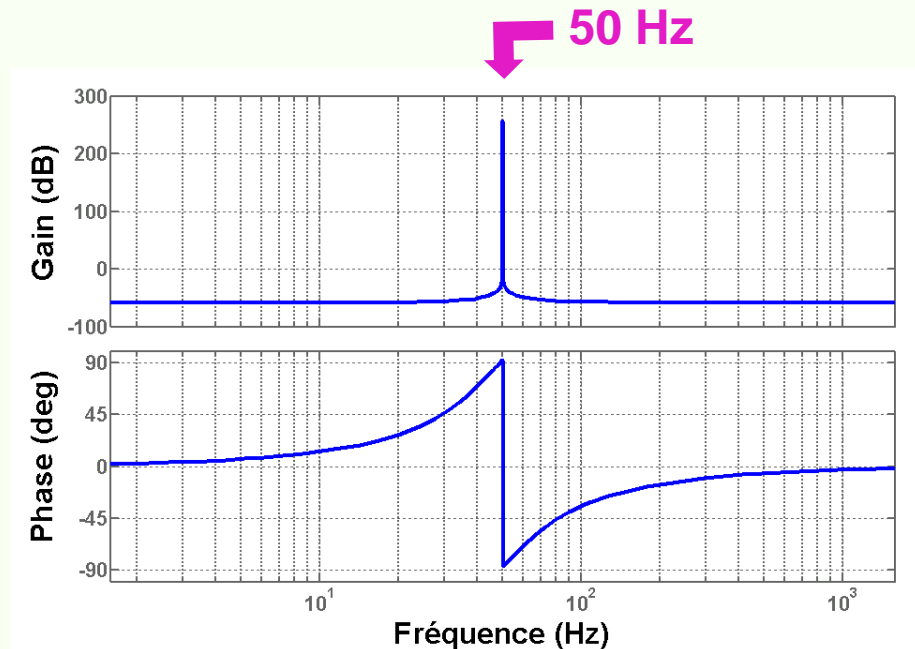
# Utilisation de correcteurs de type résonnant

Il est particulièrement intéressant d'utiliser des correcteurs de type résonnant pour asservir les grandeurs sinusoïdales.

Ce type de correcteur possède en effet un très bon comportement à la fois en asservissement et en régulation.

Fonction de transfert  $C(s) = \frac{c_0 + c_1 s + c_2 s^2}{\omega_p^2 + s^2}$  avec  $\omega_p = 100\pi \text{ rad/s}$

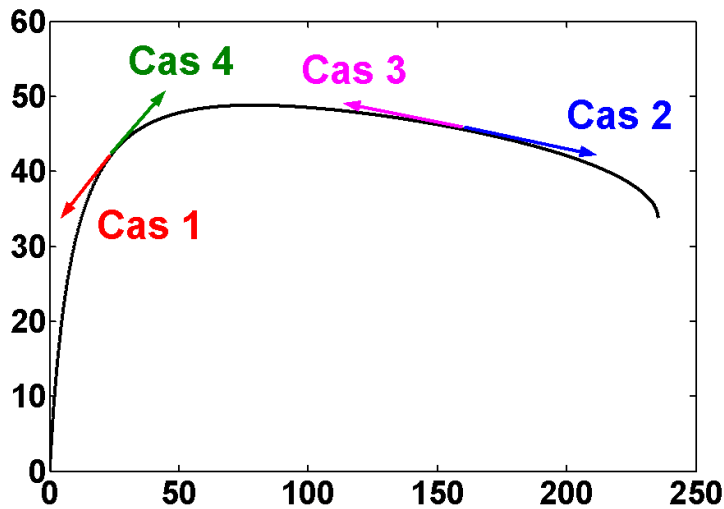
Coefficients  $c_0$ ,  $c_1$  et  $c_2$   
calculés  
par la méthode  
de Naslin



# Stratégie de commande de la PAC

Un algorithme type **commande extrême** permet de déterminer le courant de consigne de la PAC

- tel que le groupe électrogène délivre un maximum de puissance ou bien
- tel qu'il fonctionne à son point de meilleur rendement



Rendement du GE à PAC [%]  
en fonction  
de la puissance nette délivrée [kW]

$\frac{dP_{GE \rightarrow PAC}}{dt}$	< 0	> 0
$\frac{d\eta_{GE \rightarrow PAC}}{dt}$	Augmenter i PAC (cas 1)	Diminuer i PAC (cas 2)
	Diminuer i PAC (cas 3)	Augmenter i PAC (cas 4)

Loi combinatoire

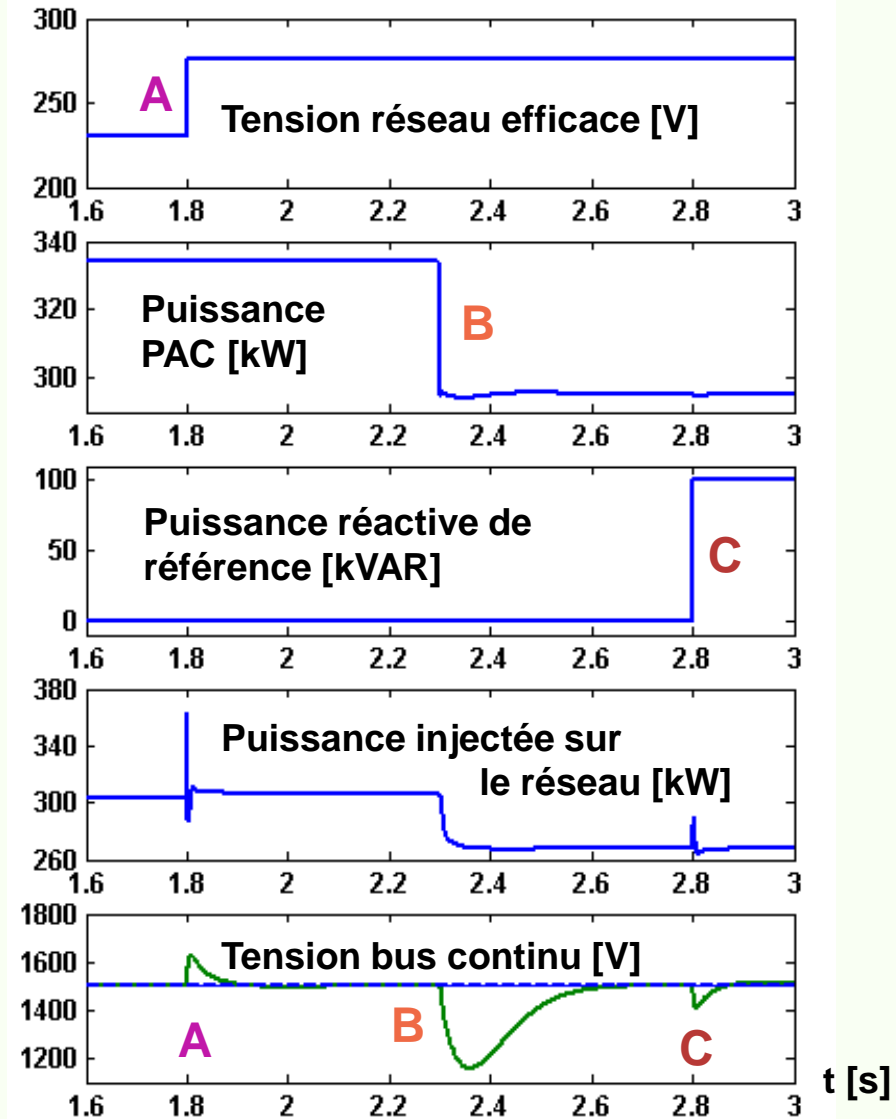
# Régulation de la tension de bus

Un profil de fonctionnement test est défini afin de tester la topologie définie et la commande des différents convertisseurs :

A) La tension du réseau augmente de 20%

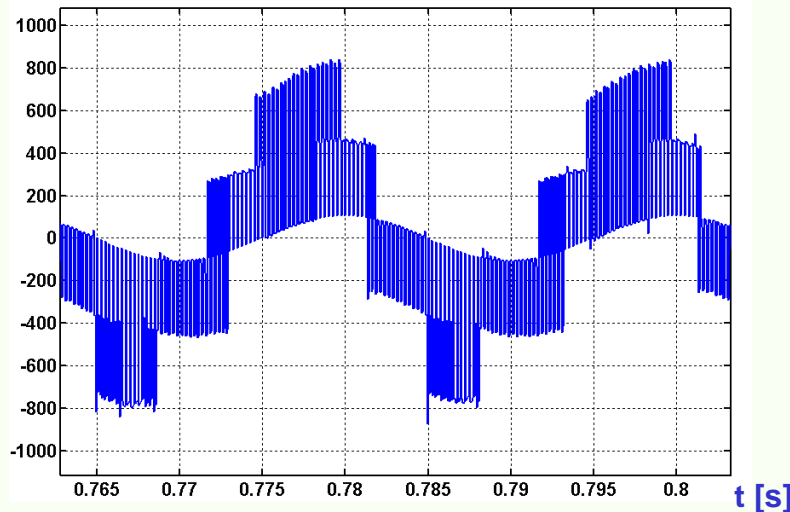
B) Les pressions d'hydrogène et d'oxygène décroissent

C) La consigne de puissance réactive donnée à l'onduleur augmente de 0 à 100kVAR

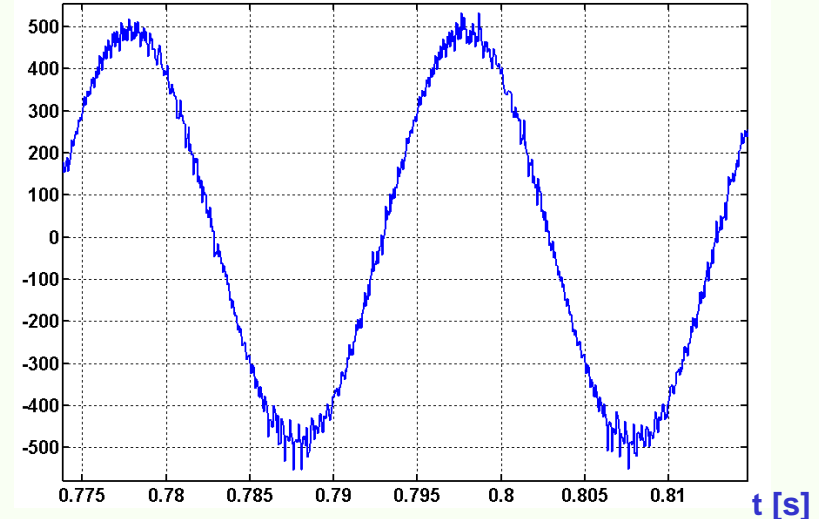


# Nécessité d'insérer un filtre

## Forme de la tension $V_g$ , en sortie de l'onduleur



Allure de la tension  $V_g$  [V]  
Connexion directe au réseau



Allure de la tension  $V_g$  [V]  
Connexion au réseau via un filtre

Calcul du Taux  
de Distorsion Harmonique  
(THD)

	THD Courant réseau	THD Tension $V_g$
Sans filtre	6 %	80 %
Avec filtre	1 %	5 %

# Conclusion

---

- **Nécessité d'insérer un filtre passif et d'utiliser des correcteurs adaptés pour respecter les normes relatives à la pollution harmonique**
- **L'outil de simulation et la méthodologie développés permettent d'étudier, d'un point de vue commande, la structure d'interfaçage de la PAC avec le réseau.  
Nous disposons d'un outil de test et de développement d'algorithmes (commandes rapprochée et éloignée)**

# Perspectives

---

- **Donner d'autres fonctionnalités à la structure**  
Ex : filtre actif
- **L'outil développé sert de base au développement et à la commande d'autres topologies d'électronique de puissance**
- **Développement de systèmes hybrides avec stockage tampon (condensateurs)**
- **Thèse de Ianko Valero (projet européen FEBUSS)**



**Merci !**

---



**[Candusso@leg.ensieg.inpg.fr](mailto:Candusso@leg.ensieg.inpg.fr)**