

Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau



Doctorant: Tao ZHOU
Directeur: Bruno FRANCOIS
Equipe Réseaux, L2EP
Ecole Centrale de Lille



30 Juin 2009

Plan

- Introduction
- Générateur éolien
- Eolien associé avec des super-condensateurs
- Stockage sur le long terme (Pile à combustible et Electrolyseur)
- Générateur actif éolien
- Conclusion et perspectives

Plan

- Introduction
 - Contexte; Sujet; Solutions; Méthodes
- Générateur éolien
- Eolien associé avec des super-condensateurs
- Stockage sur le long terme (Pile à combustible et Electrolyseur)
- Générateur actif éolien
- Conclusion et perspectives

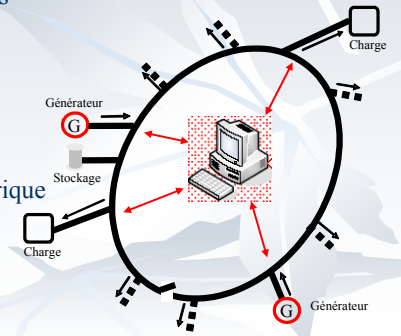
3

Contexte

- Contexte: Micro réseau - intégration des générateurs décentralisés

- Infrastructure
 - Regrouper les producteurs dispersés et les consommateurs locaux
 - Minimisation des pertes dues au transport de l'électricité
 - Possibilité de cogénération
 - Augmentation du rendement de la génération des énergies
 - Facilité d'utilisation d'un bus de communication
 - Possibilité d'échange d'informations

- Gestion
 - Supervision centrale
 - Réception des informations
 - Consignes de production
 - Gestion techno-économique
 - Optimisation de la production électrique
 - Renforcement de la qualité et la fiabilité du system électrique



4

Contexte

- Contexte: Intégration des énergies renouvelables dans le micro réseau

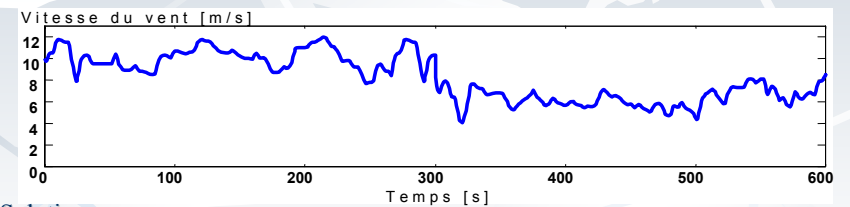


- Buts:
 - Réduction de l'émission de CO₂
 - Réduction de la consommation des combustibles fossiles
- Problèmes
 - Condition climatique intermittente et fluctuante
 - Production aléatoire et difficilement prévisible
 - Impacts sur le réseau électrique
 - Difficulté à réaliser l'adéquation entre la production et la consommation
- Solution développée dans cette thèse
 - **Générateur actif** à base d'énergie renouvelable (qui fonctionne comme un alternateur classique)

5

Sujet

- Objectif:
 - Transformer un générateur à base d'énergie éolienne en un générateur actif pouvant participer à la gestion du micro réseau
- Contraintes:
 - Production éolienne intermittente et fluctuante
 - Puissance stable demandée par le micro réseau sur une fenêtre temporelle



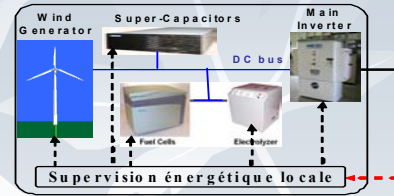
- Solution:
 - Matérielle → Systèmes de stockage d'énergie:
 - Equilibrage temps réel de la puissance (millisecondes → secondes → minutes)
 - Gestion de la disponibilité de l'énergie (minutes → heures → jours)
 - Commande → Supervision énergétique
 - Fonctions de contrôle additionnelles à imaginer

6

Cas d'application

■ Système hybride multi sources

- Source d'énergie renouvelable
 - Générateur éolien
- Systèmes de stockage
 - Stockage à dynamique rapide par super condensateurs pour l'équilibrage temps réel des puissances
 - Stockage sur le long-terme par Hydrogène (pile à combustible et électrolyseur) pour garantir la disponibilité énergétique



■ Supervision énergétique locale

- Répartition interne des flux de puissances
- Fourniture externe de services « système »: puissance active et réactive; courbe de statisme puissance/fréquence

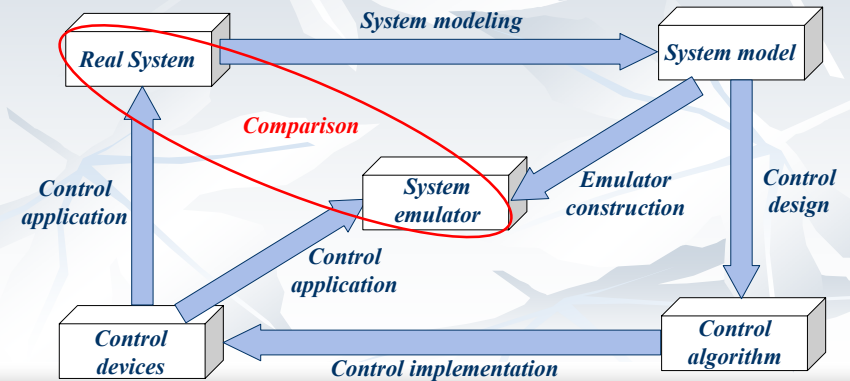
7

Méthodes

■ Outils

- Modèle moyen
- Graphe Informationnel Causal (GIC)
- Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [Bou 00]
- Représentation Multi-Niveau (RMN) [Li 08]

■ Démarche



8

Plan

■ Introduction

■ Générateur éolien

- Modélisation; Commande hiérarchique; Asservissement des grandeurs physiques; Contrôle des puissances

■ Eolien associé avec des super-condensateurs

■ Stockage sur le long terme (Pile à combustible et Electrolyseur)

■ Générateur actif éolien

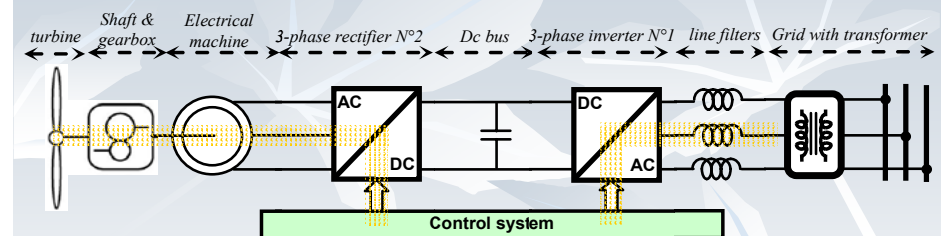
■ Conclusion et perspectives

9

Générateur Eolien: Modélisation

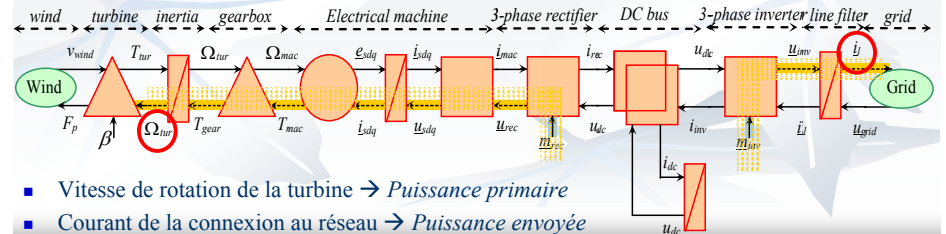
■ Système étudié

- Générateur éolien à vitesse variable connecté au réseau



■ Modélisation (par REM)

- objectif: faire apparaître les chaînes d'actions et les grandeurs contrôlables

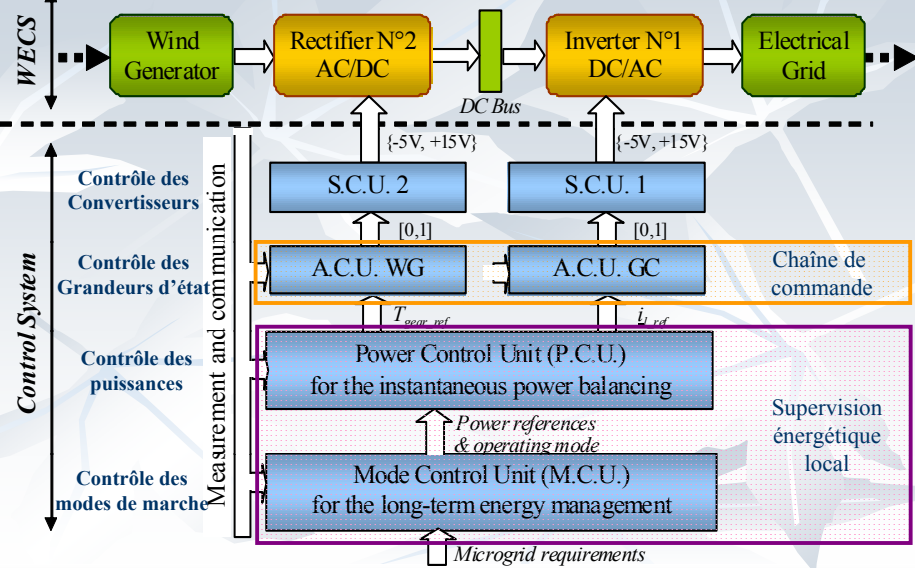


- Vitesse de rotation de la turbine → Puissance primaire
- Courant de la connexion au réseau → Puissance envoyée

10

Commande hiérarchique

- Organisation hiérarchique de la commande [Hau 99]



11

Commande hiérarchique

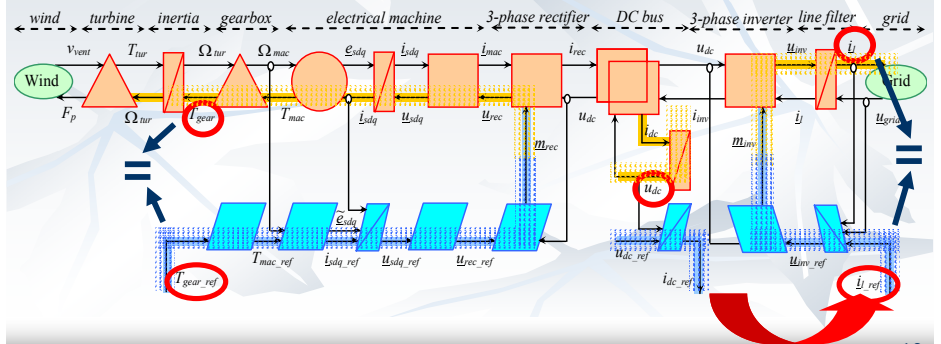
- Contrôle et asservissement des grandeurs physiques (par REM)

- Objectifs

- Couple de la turbine (T_{gear_ref})
- Courant de la connexion au réseau (I_l)
- Tension du bus continu (U_{dc})

- Méthode de conception des trois fonctions de commande

- Par inversion des chaînes d'action visualisées sur la REM

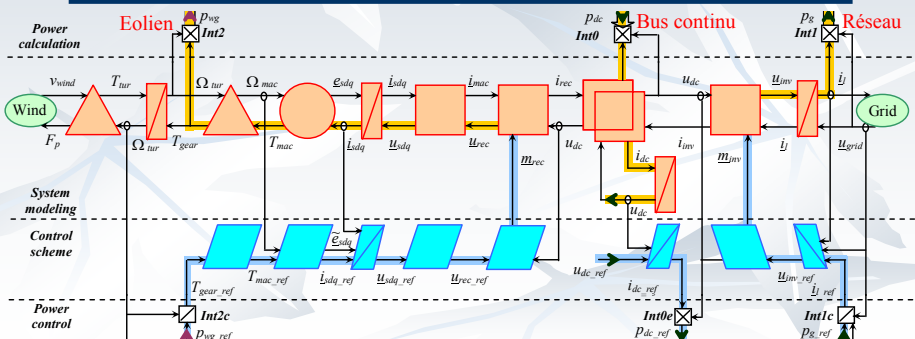


12

Contrôle des puissances

- Objectif → établir les liens entre les grandeurs physiques et les puissances
- Méthodes → par calcul direct ou inverse des puissances

Energy source	Wind generator	DC-bus capacitor	Grid connection
Power calculation	Int2: $p_{wg} = \Omega_{tur} T_{gear}$	Int0: $p_{dc} = u_{dc} i_{dc}$	Int1: $\begin{cases} p_g = u_{l1} i_1 + u_{l2} i_2 \\ q_g = \sqrt{3}(u_{l1} i_2 - u_{l2} i_1) \end{cases}$
Power control	Int2c: $T_{gear_ref} = \frac{1}{\Omega_{tur}} p_{wg_ref}$	Int0e: $p_{dc_ref} = \bar{u}_{dc} i_{dc_ref}$	Int1c: $\begin{cases} i_{l1_ref} = \frac{(2\bar{u}_{l1} - \bar{u}_{l2})p_{g_ref} + \sqrt{3}\bar{u}_{l2}q_{g_ref}}{2\bar{u}_{l1}^2 - 2\bar{u}_{l1}\bar{u}_{l2} + 2\bar{u}_{l2}^2} \\ i_{l2_ref} = \frac{(2\bar{u}_{l2} - \bar{u}_{l1})p_{g_ref} - \sqrt{3}\bar{u}_{l1}q_{g_ref}}{2\bar{u}_{l1}^2 - 2\bar{u}_{l1}\bar{u}_{l2} + 2\bar{u}_{l2}^2} \end{cases}$

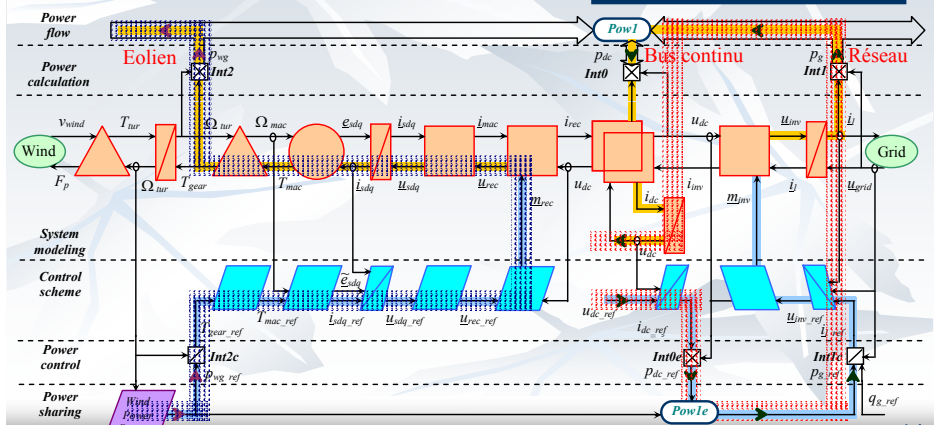
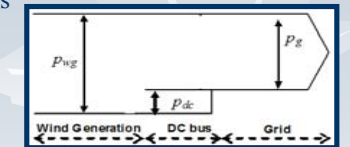


13

Répartition des puissances

- Objectif → maximiser la puissance éolienne extraite
→ équilibrer en temps réel les puissances
- Méthodes → par bilan de puissance

Power flow	Pow1: $p_g = p_{wg} - p_{dc}$
Power sharing	Pow1e: $p_{g_ref} = \bar{p}_{wg} - p_{dc_ref}$

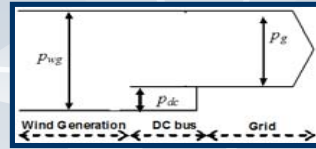


14

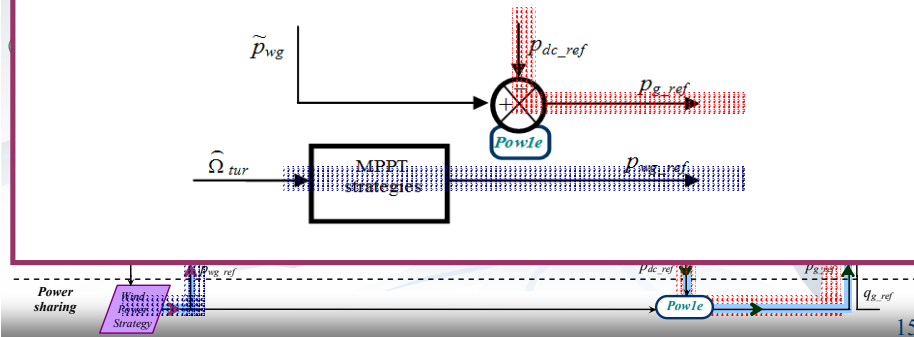
Répartition des puissances

- Objectif → maximiser la puissance éolienne extraite
→ équilibrer en temps réel les puissances
- Méthodes → par bilan de puissance

Power flow	Power: $P_g = P_{wg} - P_{dc}$
Power sharing	Power: $P_{g_ref} = \tilde{P}_{wg} - P_{dc_ref}$

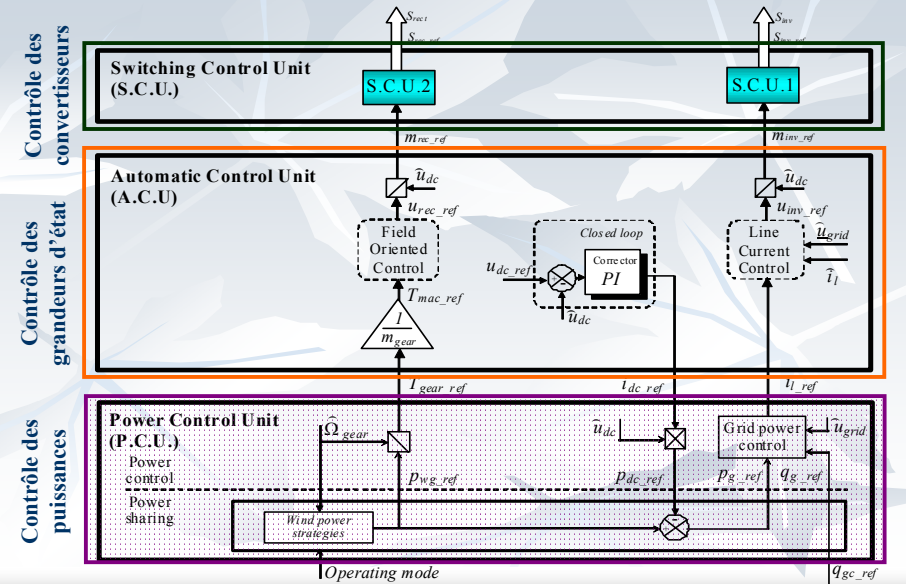


Représentation équivalente par schéma bloc



15

Organisation de la commande hiérarchique



16

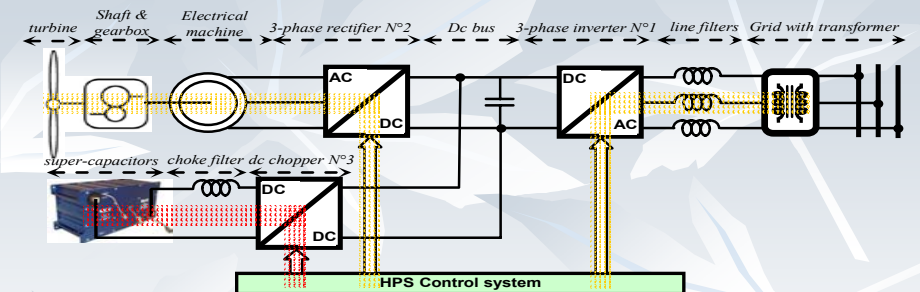
Plan

- Introduction
- Générateur éolien
- Eolien + Super-condensateurs
 - Modélisation; Commande hiérarchique; Contrôle et asservissement des grandeurs physiques; Supervision de la répartition des puissances
- Stockage sur le long terme (Pile à combustible et Electrolyseur)
- Générateur actif éolien
- Conclusion et perspectives

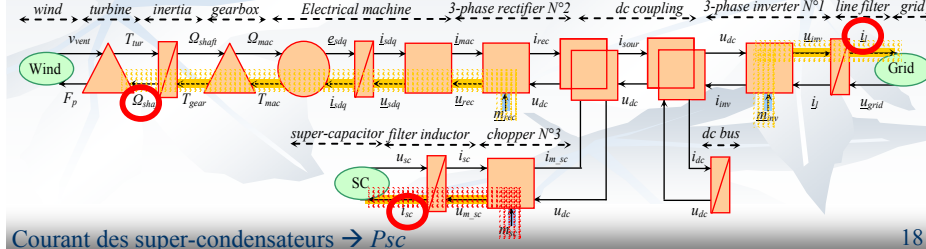
17

Générateur éolien associé avec des super-condensateurs

- Objectif → Lisser la puissance éolienne transitée au réseau



- Modélisation → faire apparaître les chaînes d'actions et les grandeurs contrôlables

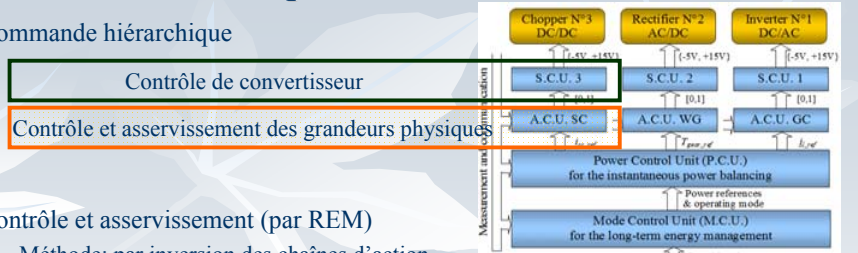


Courant des super-condensateurs → P_{sc}

18

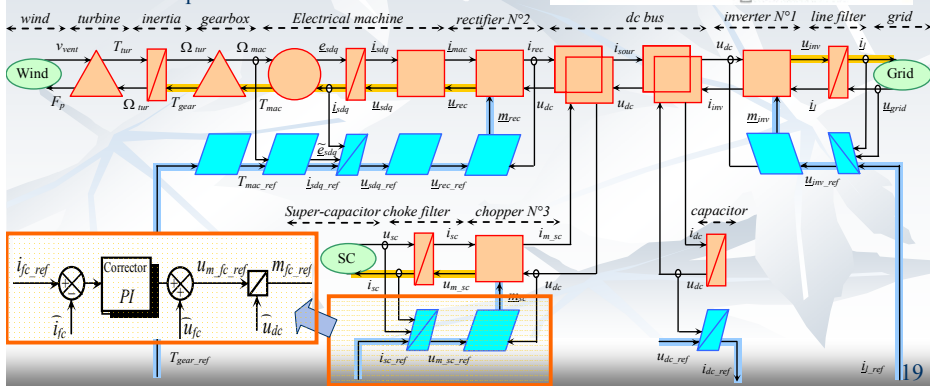
Commande hiérarchique

- Commande hiérarchique



- Contrôle et asservissement (par REM)

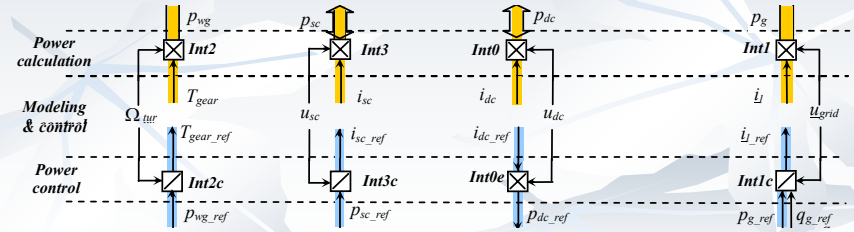
- Méthode: par inversion des chaînes d'action



Contrôle des puissances

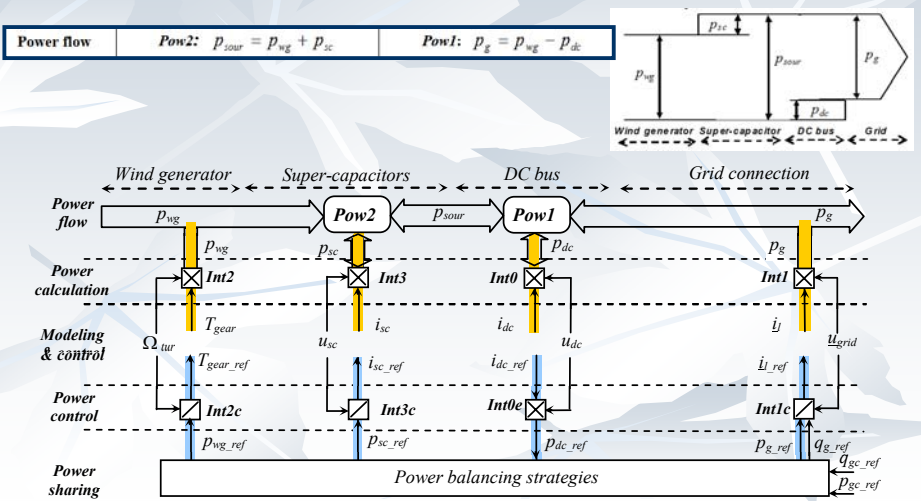
- Calcul des 3 références pour le contrôle des puissances (par RMN)
 - Objectif → établir les liens entre les grandeurs physiques et les puissances
 - Méthodes → par calcul direct ou inverse des puissances

	Wind generator	Super-capacitors	DC-bus capacitor	Grid connection
Power calculation	$Int2: p_{wg} = \Omega_{gear} T_{gear}$	$Int3: p_{sc} = u_{sc} i_{sc}$	$Int0: p_{dc} = u_{dc} i_{dc}$	$Int1: \begin{cases} p_g = u_{g1} i_1 + u_{g2} i_2 \\ q_g = \sqrt{3}(u_{g1} i_1 - u_{g2} i_2) \end{cases}$
Power control	$Int2c: T_{gear_ref} = \frac{1}{\Omega_{gear}} p_{wg_ref}$	$Int3c: i_{sc_ref} = \frac{1}{u_{sc}} p_{sc_ref}$	$Int0c: p_{dc_ref} = \hat{u}_{dc} i_{dc_ref}$	$Int1c: \begin{cases} i_{1_ref} = \frac{(2\hat{u}_{g1} - \hat{u}_{g2}) p_{g_ref} + \sqrt{3}\hat{u}_{g2} q_{g_ref}}{2\hat{u}_{g1}^2 - 2\hat{u}_{g1}\hat{u}_{g2} + 2\hat{u}_{g2}^2} \\ i_{2_ref} = \frac{(2\hat{u}_{g2} - \hat{u}_{g1}) p_{g_ref} - \sqrt{3}\hat{u}_{g1} q_{g_ref}}{2\hat{u}_{g1}^2 - 2\hat{u}_{g1}\hat{u}_{g2} + 2\hat{u}_{g2}^2} \end{cases}$



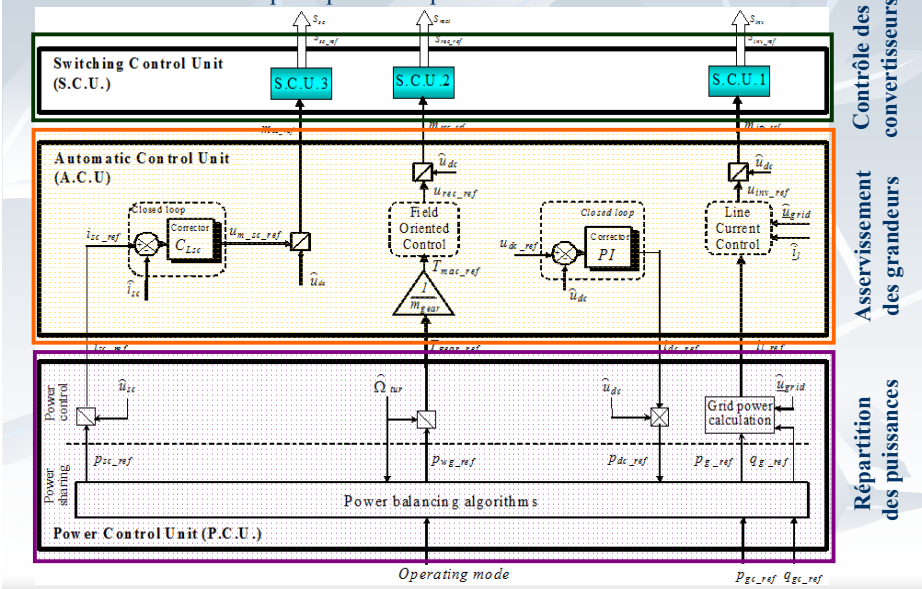
Modélisation des flux de puissances

- Méthodes → par bilan de puissance (par RMN)



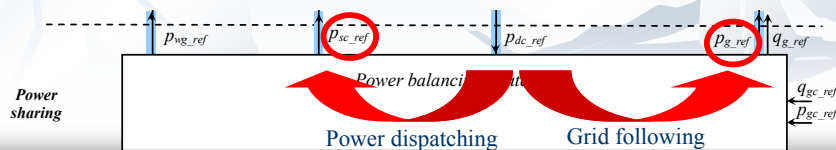
Commande hiérarchique

- Commande hiérarchique représentée par schéma bloc



Répartition des puissances

- Objectifs de la répartition des puissances
 - Comment calculer la **puissance à échanger avec les SC** (p_{sc_ref}) et la **puissance envoyée au réseau** (p_{g_ref}) à partir de la **puissance pour le réglage du bus continu** (p_{dc_ref}) et la **puissance demandée par le microréseau** (p_{gc_ref}) ?
- Deux stratégies pour le contrôle du bus continu
 - En utilisant le micro réseau électrique
 - Stratégie s'appuyant sur le réseau (grid following)
 - p_{g_ref} est calculée avec p_{dc_ref} , p_{sc_ref} peut être utilisée pour p_{gc_ref}
 - En utilisant le stockage
 - Stratégie de répartition des puissances (power dispatching)
 - p_{sc_ref} est calculée avec p_{dc_ref} , p_{g_ref} peut être utilisée pour p_{gc_ref}

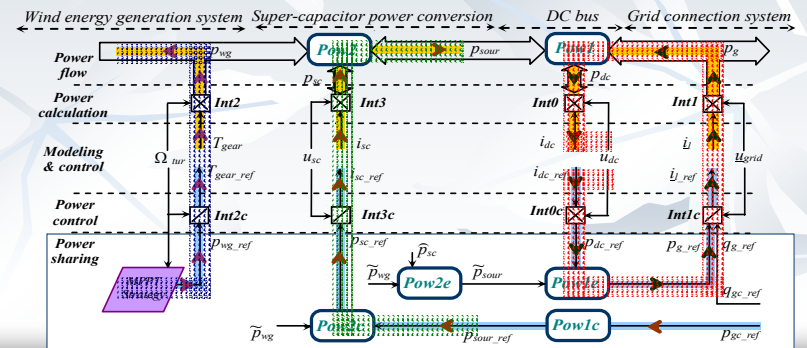


23

1^{ère} stratégie: s'appuyant sur le réseau (grid following)

- Principe : Utiliser le bilan de puissance pour calculer les puissances de référence
- Concept
 - Bus continu → Puissance réseau
 - Consigne externe → Puissance source

Power flow	Pow2: $p_{sour} = p_{wg} + p_{sc}$	Pow1: $p_g = p_{wg} - p_{dc}$
Power sharing	Pow2e: $\tilde{p}_{sour} = \tilde{p}_{wg} + \tilde{p}_{sc}$	Pow1e: $p_{g_ref} = \tilde{p}_{wg} - p_{dc_ref}$
	Pow2c: $p_{sc_ref} = p_{sour_ref} - \tilde{p}_{wg}$	Pow1c: $p_{sour_ref} = p_{g_ref}$

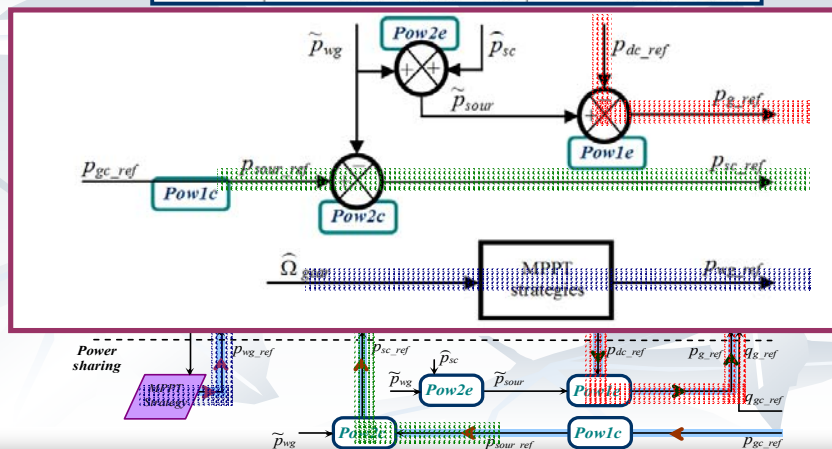


24

1^{ère} stratégie: s'appuyant sur le réseau (grid following)

- Représentation par schéma-bloc

Power flow	Pow2: $p_{sour} = p_{wg} + p_{sc}$	Pow1: $p_g = p_{wg} - p_{dc}$
Power sharing	Pow2e: $\tilde{p}_{sour} = \tilde{p}_{wg} + \tilde{p}_{sc}$	Pow1e: $p_{g_ref} = \tilde{p}_{wg} - p_{dc_ref}$
	Pow2c: $p_{sc_ref} = p_{sour_ref} - \tilde{p}_{wg}$	Pow1c: $p_{sour_ref} = p_{g_ref}$

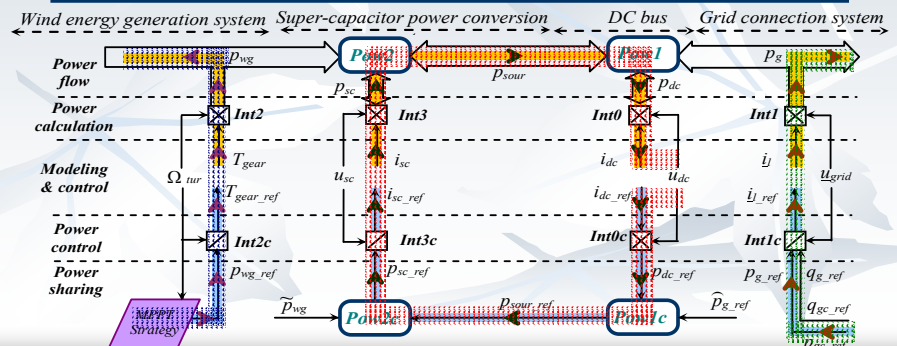


25

2^{ème} stratégie: répartition de puissance (power dispatching)

- Principe : Utiliser le bilan de puissance pour calculer les puissances de référence
- Concept
 - Bus continu → Puissance source
 - Consigne externe → Puissance réseau

Power flow	Pow1: $p_g = p_{sour} - p_{dc}$	Pow2: $p_{sour} = p_{wg} + p_{sc}$
Power sharing	Pow1c: $p_{sour_ref} = p_{dc_ref} + \tilde{p}_g$	Pow2c: $p_{sc_ref} = p_{sour_ref} + \tilde{p}_{wg}$

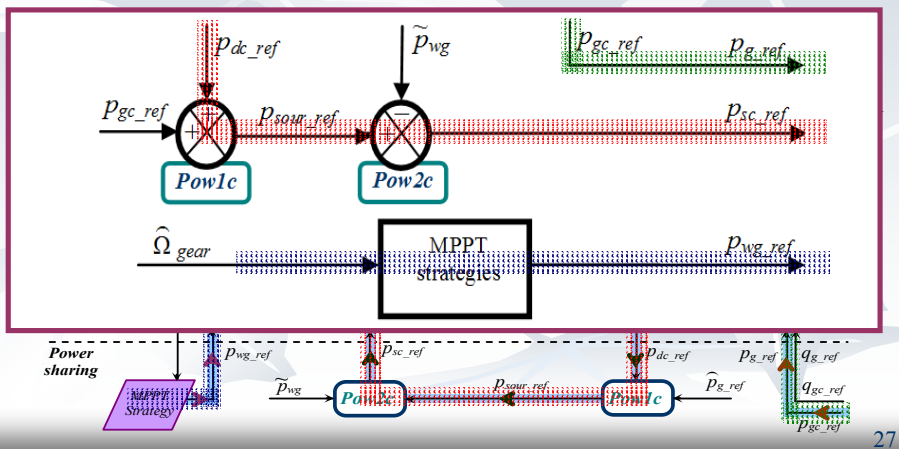


26

2^{ème} stratégie: répartition de puissance (power dispatching)

- Représentation par schéma-bloc

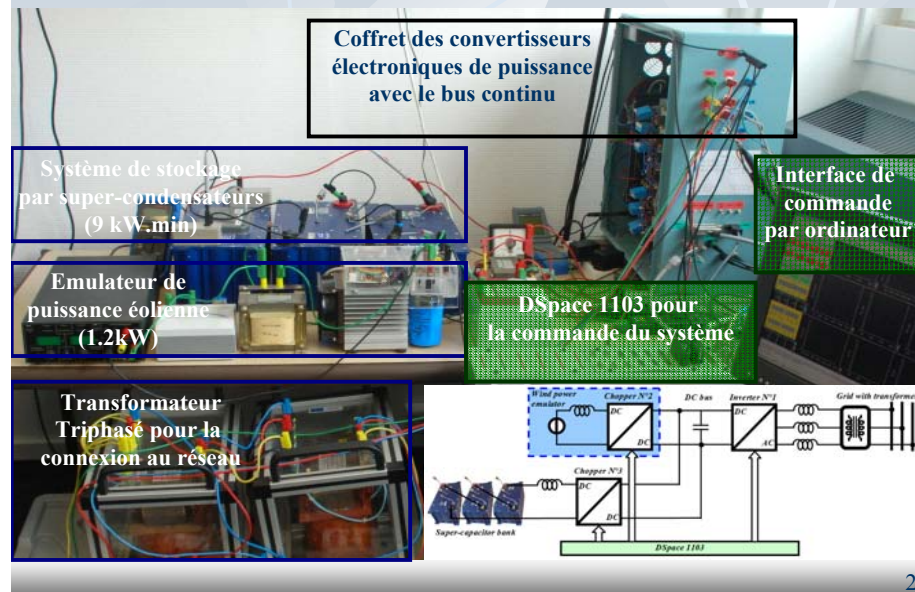
Power flow	Pow1: $p_g = p_{sour} - p_{dc}$	Pow2: $p_{sour} = p_{wg} + p_{sc}$
Power sharing	Pow1c: $p_{sour_ref} = p_{dc_ref} + \tilde{p}_g$	Pow2c: $p_{sc_ref} = p_{sour_ref} + \tilde{p}_{wg}$



27

Tests Expérimentaux

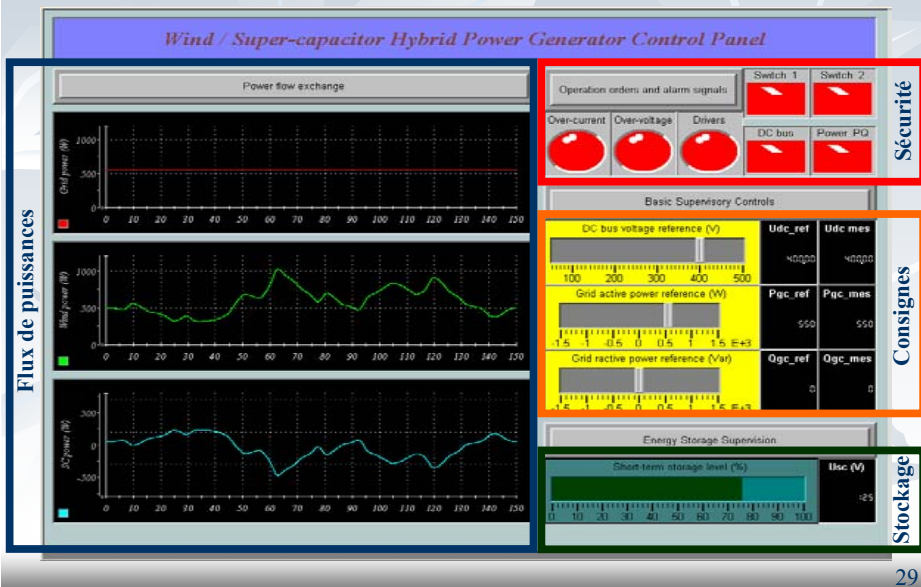
- Implémentation expérimentale



28

Tests Expérimentaux

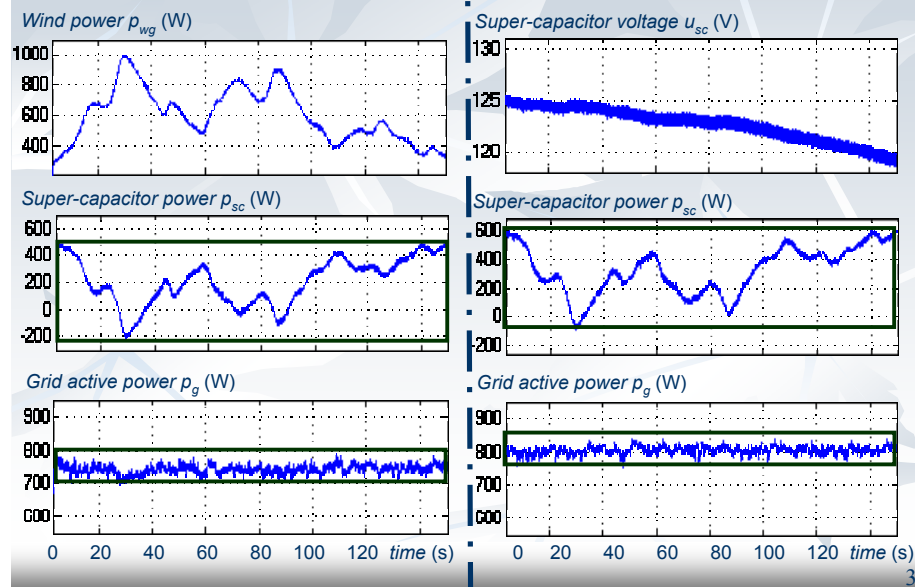
- Interface de commande via l'écran d'ordinateur



29

Comparaison expérimentale des deux stratégies

- Stratégie s'appuyant sur le réseau (grid following)
- Stratégie de répartition de puissance (power dispatching)



30

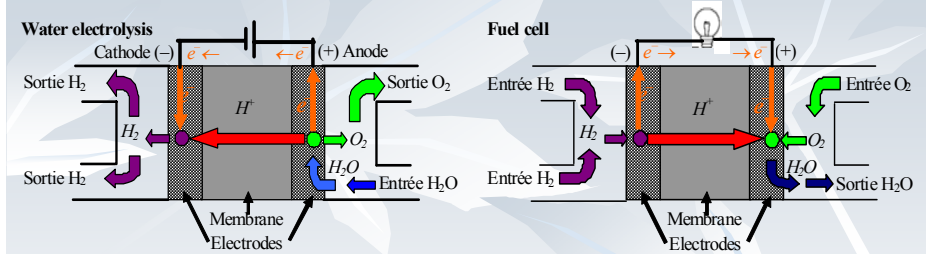
Plan

- Introduction
- Générateur éolien
- Eolien associé avec des super-condensateurs
- Stockage sur le long terme (Pile à combustible et Electrolyseur)
 - Principe de fonctionnement; Modélisation; Validation expérimentale des modèles; Emulateurs temps réel
- Générateur actif éolien
- Conclusion et perspectives

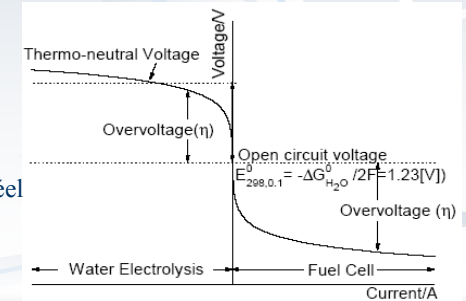
31

Principe de fonctionnement

- Principe de fonctionnement (technologies PEM) [Lar 00]



- Caractéristique électrique d'une cellule
 - Composant à faible tension
 - Très non-linéaire
 - Besoin d'identifier les modèles pour concevoir l'émulateur temps réel



32

Modélisation simplifiée

- Modélisation (technologies PEM) [Lar 00]

$$R_{el_3} : \Delta V_{el} = V_{cell_el} - E_{el}$$

$$R_{fc_3} : V_{cell_fc} = E_{fc} - \Delta V_{fc}$$

$$R_{el_4} : \Delta V_{el} = A_{el} \ln \left(\frac{j_{el}}{j_{0_el}} \right) + r_{el_el} + B_{el} \ln \left(1 - \frac{j_{el}}{j_{lim_el}} \right)$$

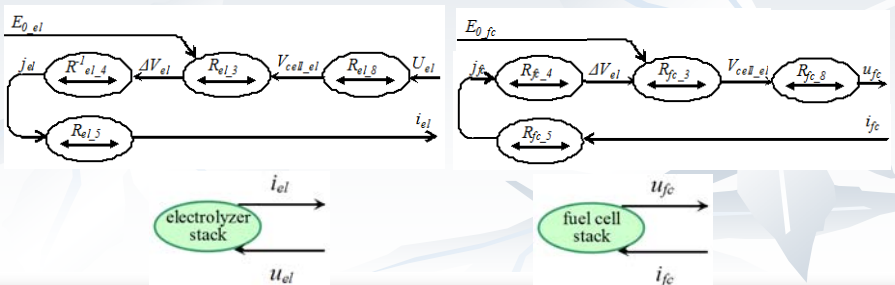
$$R_{fc_4} : \Delta V_{fc} = A_{fc} \ln \left(\frac{j_{fc}}{j_{0_fc}} \right) + r_{fc_fc} + B_{fc} \ln \left(1 - \frac{j_{fc}}{j_{lim_fc}} \right)$$

$$R_{el_5} : i_{el} = S_{el} j_{el}$$

$$R_{fc_5} : j_{fc} = \frac{i_{fc}}{S_{fc}}$$

$$R_{el_8} : V_{cell_el} = \frac{1}{n_{el}} u_{el}$$

$$R_{fc_8} : u_{fc} = n_{fc} V_{cell}$$



33

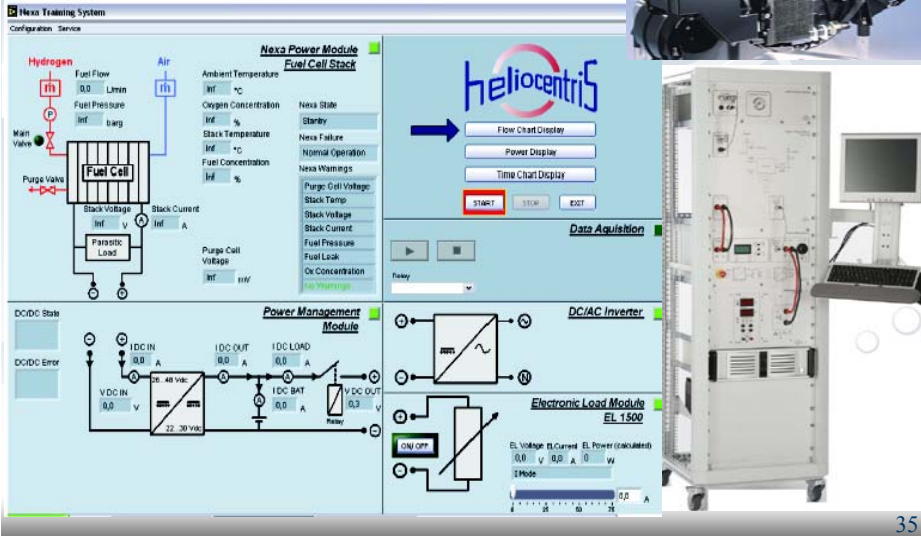
Validation des modèles

- Matériels étudiés
 - Système Electrolyseur (CETH Genhy 500W)

34

Validation des modèles

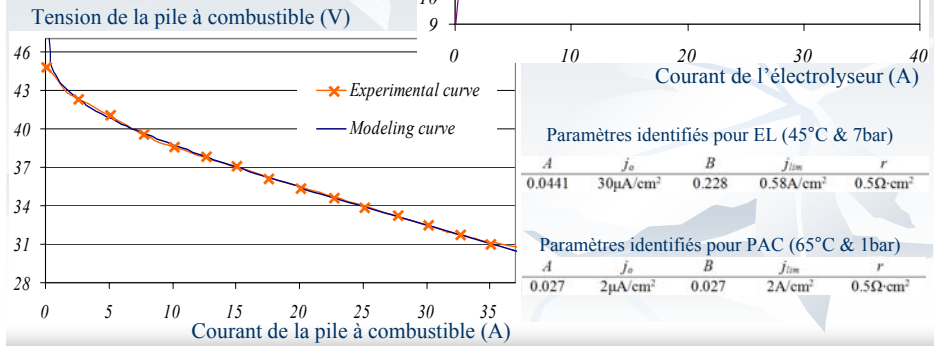
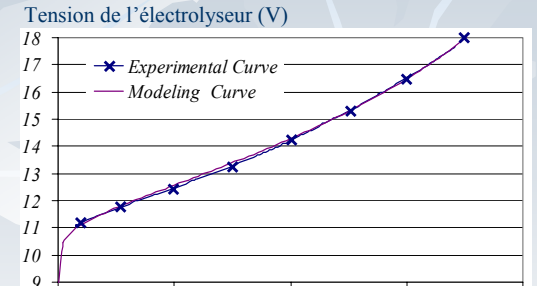
- Matériels étudiés
 - Système Pile à Combustible (Ballard Nexa 1200W)



Validation des modèles

- Comparaison entre les résultats mesurés et des modèles proposés

- Electrolyseur (EL)
- Pile à combustible (PAC)



Paramètres identifiés pour EL (45°C & 7bar)

A	j_0	B	j_{lim}	r
0.0441	30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.228	0.58 A/cm^2	0.5 $\Omega\text{-cm}^2$

Paramètres identifiés pour PAC (65°C & 1bar)

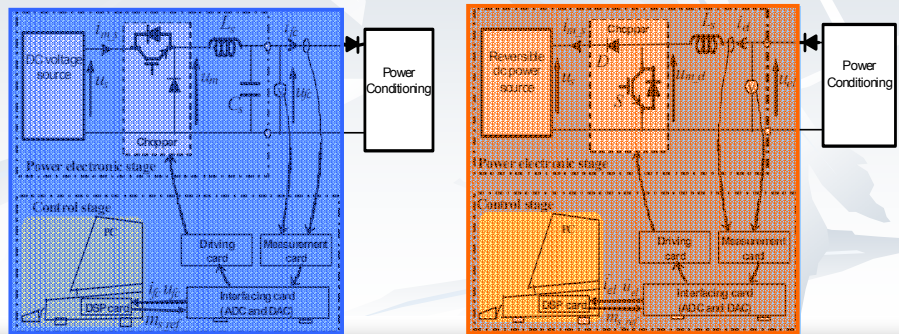
A	j_0	B	j_{lim}	r
0.027	2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.027	2 A/cm^2	0.5 $\Omega\text{-cm}^2$

Emulateurs temps réel

- Construction des émulateurs
 - Sources équivalentes

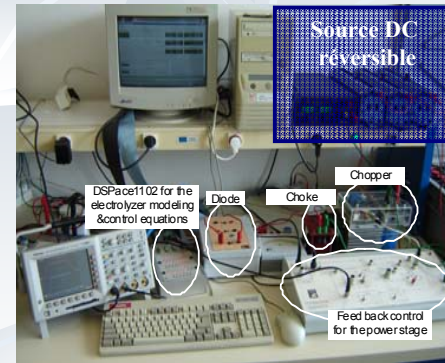


- Conceptions



Emulateurs temps réel

- Construction des émulateurs
 - Implémentations



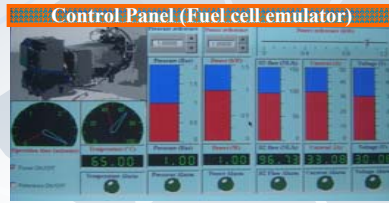
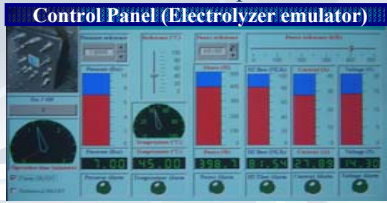
Emulateur de l'électrolyseur



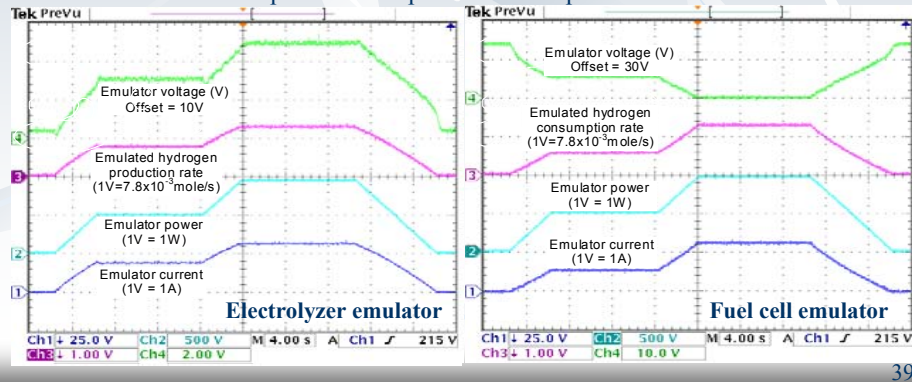
Emulateur de la pile à combustible

Emulateurs temps réel

- Interface de commande par l'écran d'ordinateur



- Relevé des courbes expérimentales par l'oscilloscope



39

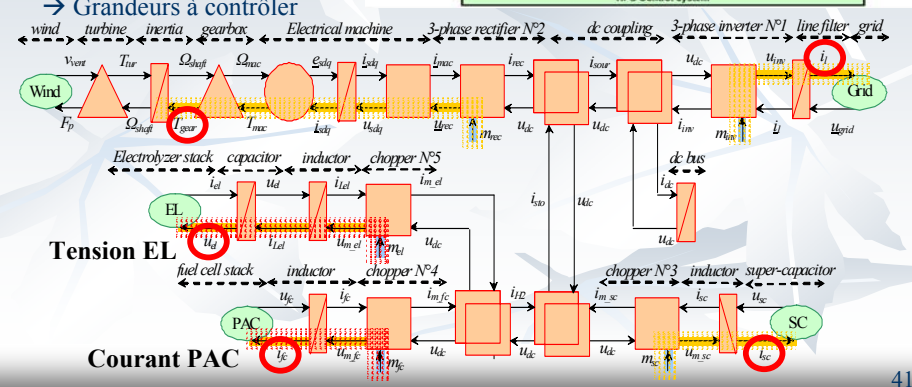
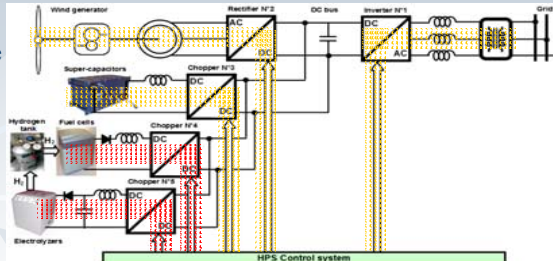
Plan

- Introduction
- Générateur éolien
- Eolien associé avec des super-condensateurs
- Stockage sur le long terme (Pile à combustible et Electrolyseur)
- Générateur actif éolien
 - Modélisation; Commande hiérarchique; Contrôle et asservissement des grandeurs physiques; Supervision de la répartition des puissances; Contrôle des modes de marche; Rendement du système
- Conclusion et perspectives

40

Générateur actif éolien: Modélisation

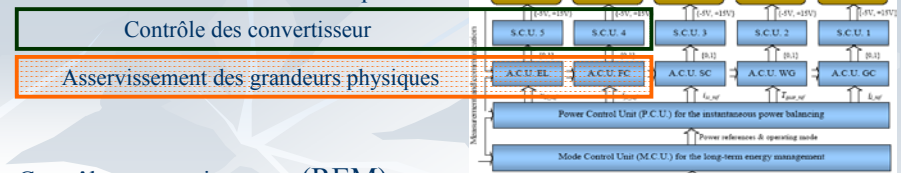
- Super-condensateurs
 - Lisser la puissance éolienne transitée au réseau
- Hydrogène (PAC et EL)
 - Garantir la disponibilité énergétique du système
- Modélisation (par REM)
 - Chaines d'action
 - Grandeurs à contrôler



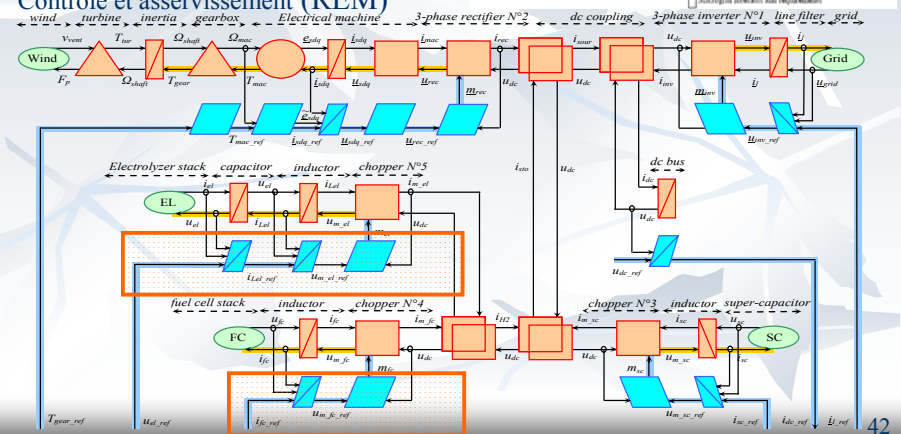
41

Commande hiérarchique

- Structure de commande hiérarchique



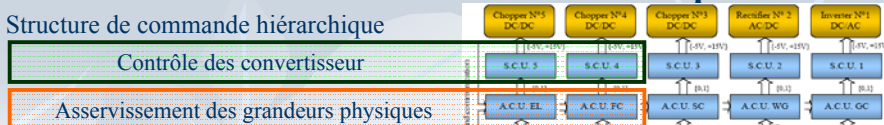
- Contrôle et asservissement (REM)



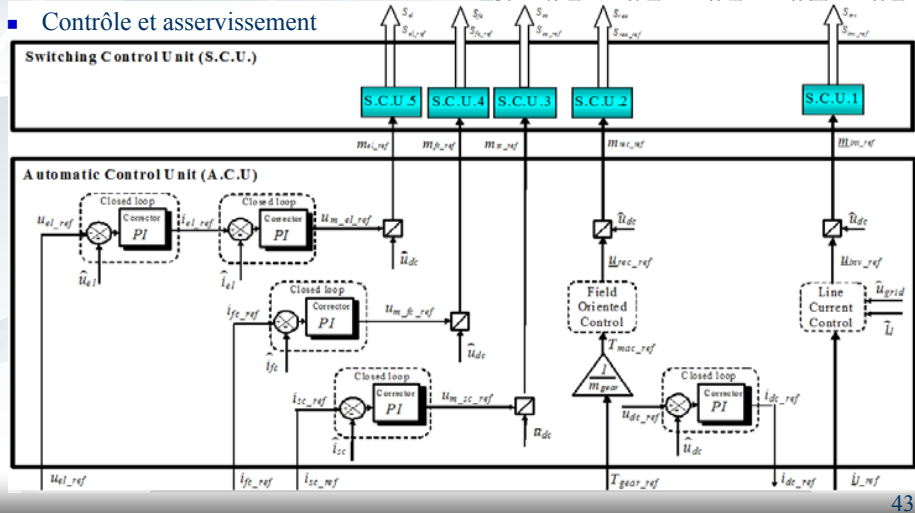
42

Générateur actif éolien: Commande hiérarchique

Structure de commande hiérarchique



Contrôle et asservissement



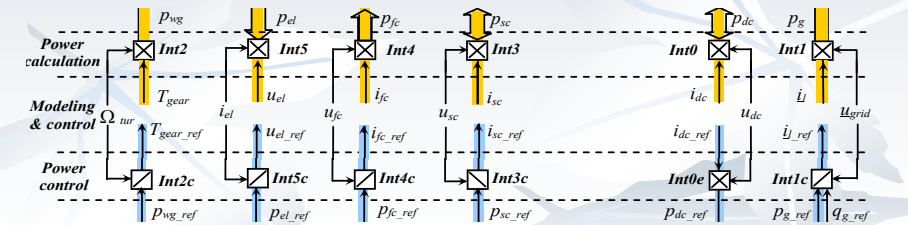
Contrôle des puissances

Calcul des 5 références pour le contrôle des puissances (par RMN)

Méthode:

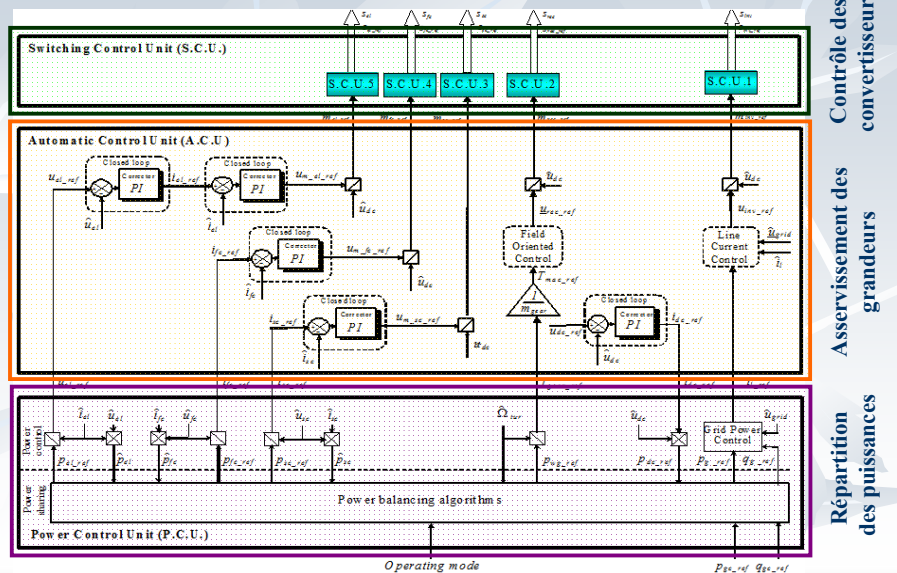
- Calcul des puissances, établir les liens entre les grandeurs physiques et les puissances
- Détermination des références par calcul direct ou inversion des équations

	Wind generator	Super-capacitors	Electrolyzers	Fuel cells	DC-bus capacitor	Grid connection
Power flow calculation	Int2: $p_{wg} = \Omega_{nr} T_{gear}$	Int3: $p_{sc} = u_{sc} i_{sc}$	Int5: $p_{el} = i_{el} u_{el}$	Int4: $p_{fc} = i_{fc} u_{fc}$	Int0: $p_{dc} = u_{dc} i_{dc}$	Int1: $\begin{cases} p_g = u_{gk} + u_{gk}^2 \\ q_g = \sqrt{3}(u_{g1} - u_{g2})i_g \end{cases}$
Controllable variable calculation	Int2c: $T_{gear_ref} = \frac{1}{\Omega_{nr}} p_{wg_ref}$	Int3c: $i_{sc_ref} = \frac{1}{u_{sc}} p_{sc_ref}$	Int5c: $u_{el_ref} = \frac{1}{i_{el}} p_{el_ref}$	Int4c: $i_{fc_ref} = \frac{1}{u_{fc}} p_{fc_ref}$	Int0c: $i_{dc_ref} = \frac{1}{u_{dc}} p_{dc_ref}$	Int1c: $\begin{cases} i_{g1_ref} = \frac{(2\hat{u}_1 - \hat{u}_2)p_{g1_ref} + \sqrt{3}\hat{u}_2 q_{g1_ref}}{2\hat{u}_1^2 - 2\hat{u}_1\hat{u}_2 + 2\hat{u}_2^2} \\ i_{g2_ref} = \frac{(2\hat{u}_2 - \hat{u}_1)p_{g2_ref} - \sqrt{3}\hat{u}_1 q_{g2_ref}}{2\hat{u}_1^2 - 2\hat{u}_1\hat{u}_2 + 2\hat{u}_2^2} \end{cases}$



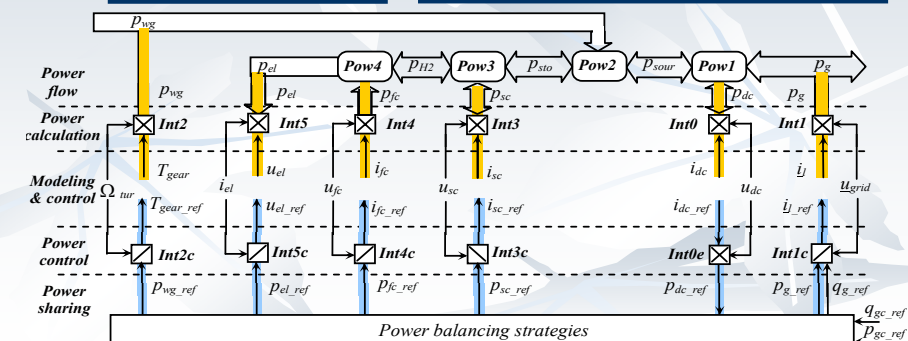
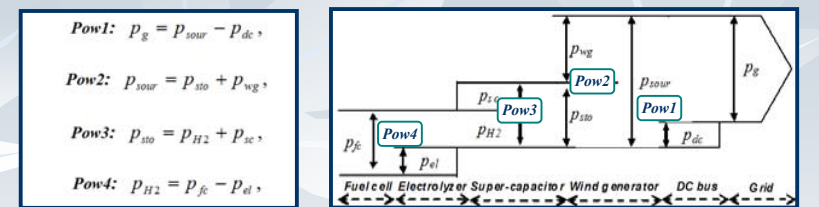
Répartition des puissances

Commande hiérarchique représentée par schéma bloc



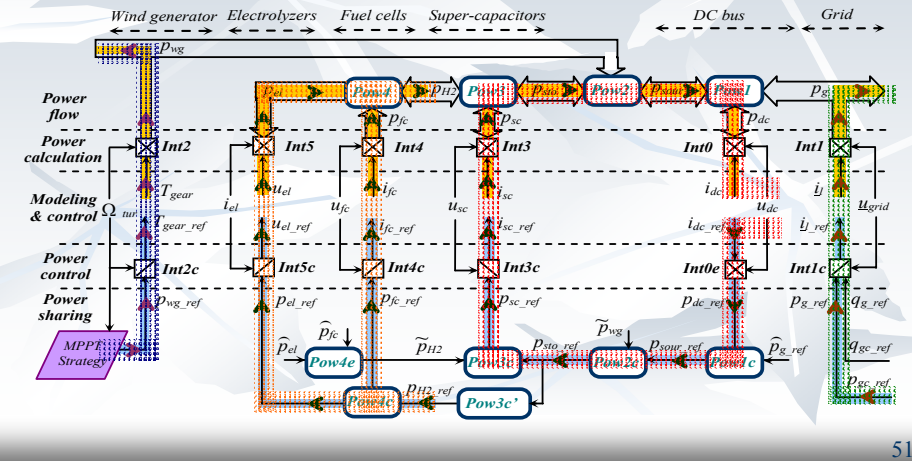
Modélisation des flux de puissances

Méthodes → par bilan de puissance (par RMN)



2^{ème} stratégie: répartition de puissance (power dispatching)

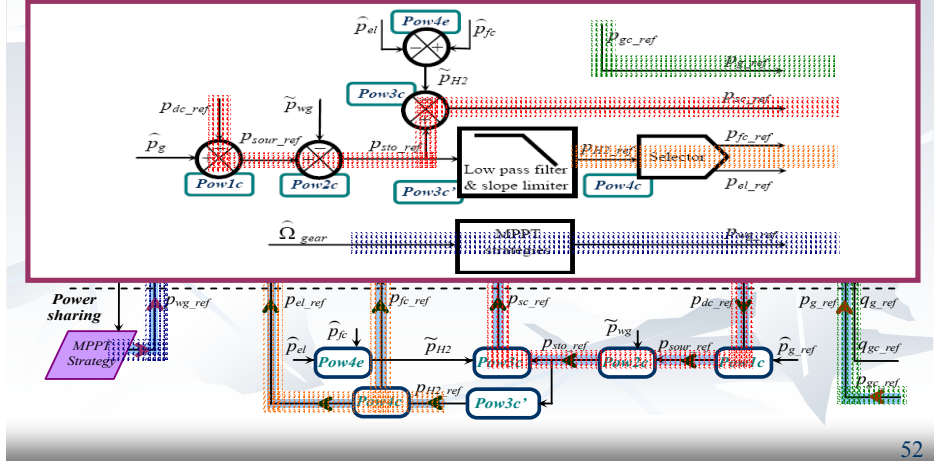
- Concept
 - Bus continu → Puissance source
 - Consigne externe → Puissance réseau



51

2^{ème} stratégie: répartition de puissance (power dispatching)

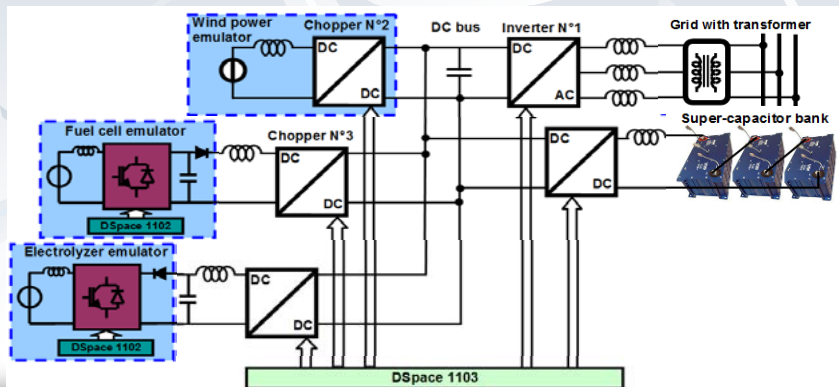
- Concept
 - Bus continu → Puissance source
 - Consigne externe → Puissance réseau



52

Tests expérimentaux

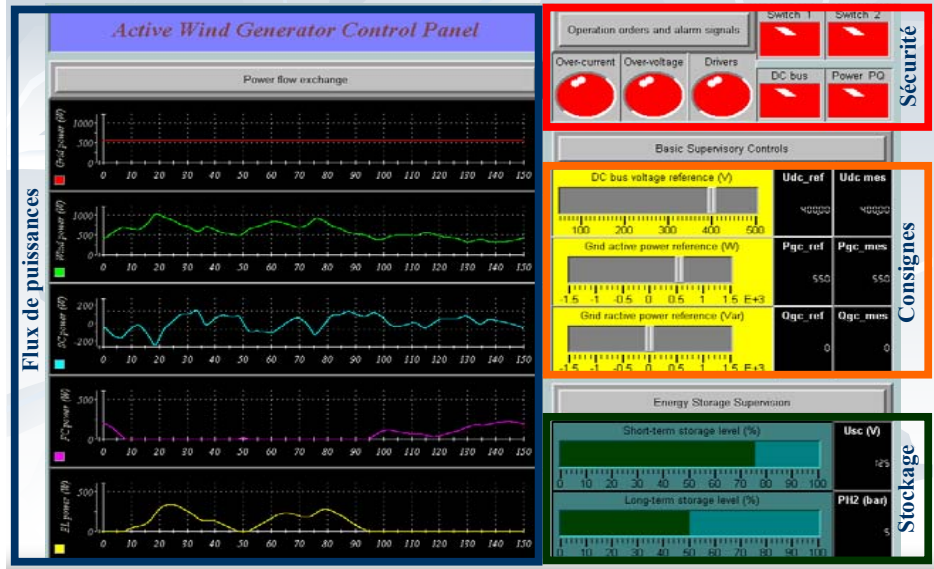
- Implémentation expérimentale
 - Composants émülés:
 - Générateur de puissance éolienne
 - Pile à combustible
 - Electrolyseur
 - Composant réels:
 - Convertisseurs électroniques de puissance
 - Bus continu
 - Connexion au réseau
 - Super-condensateurs
 - Carte de commande numérique



53

Tests expérimentaux

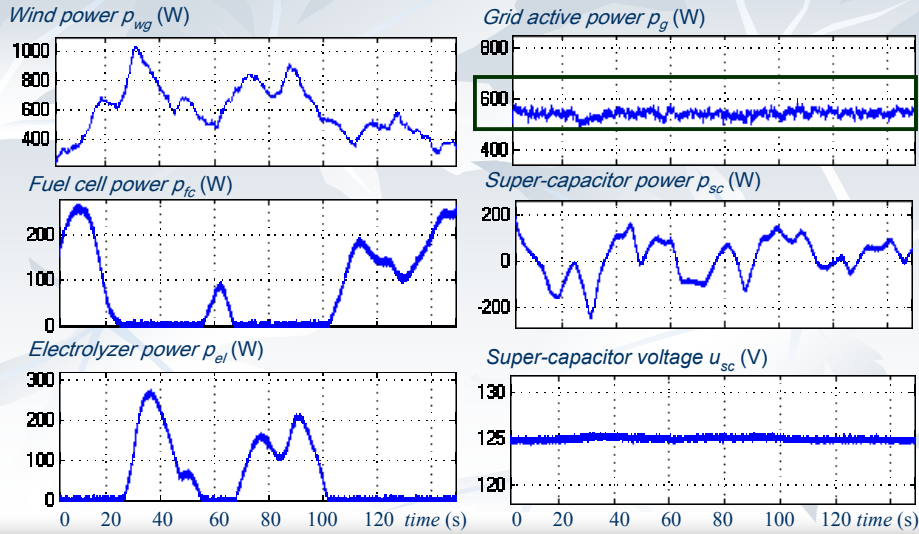
- Interface de commande par écran d'ordinateur



54

Tests expérimentaux

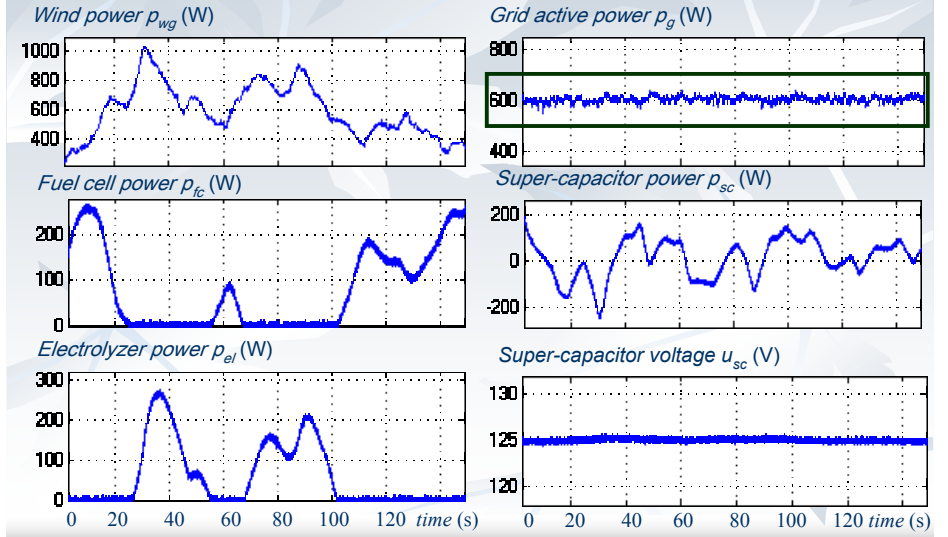
- Résultats expérimentaux
 - Stratégie s'appuyant sur le réseau (grid following)



55

Tests expérimentaux

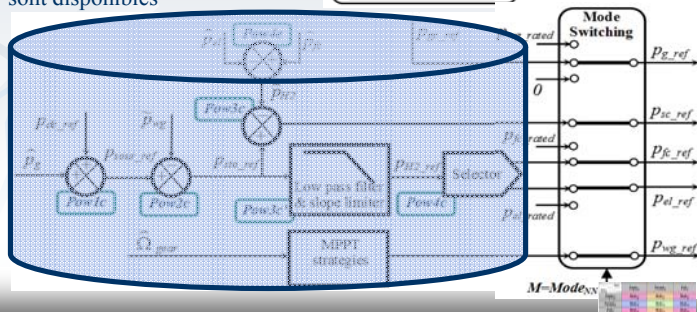
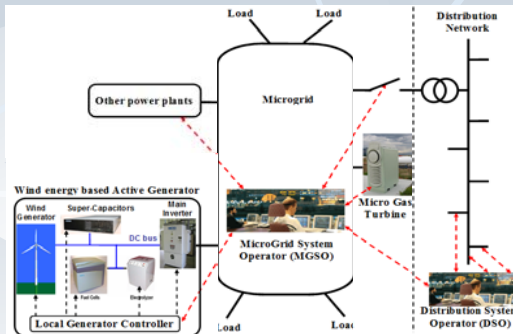
- Résultats expérimentaux
 - Stratégie de répartition de puissance (power dispatching)



56

Contrôle des modes de marche

- Micro réseau supposé
 - Consigne de puissance imposée à chaque unité de production pour chaque période de 30 minutes
- Générateur actif éolien
 - Différents modes de marche suivant l'état de stockage
- Mode normal
 - Tous les systèmes de stockage sont disponibles



57

Contrôle des modes de marche

- Définition des niveaux de stockage

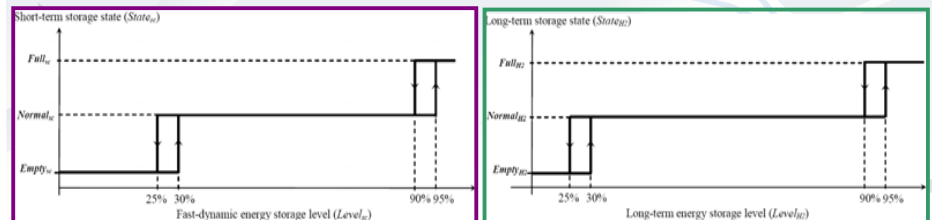
$$Level_{sc} = \frac{E_{sc}}{E_{sc_max}} = \frac{u_{sc}^2}{u_{sc_max}^2}$$

$$Level_{H2} = \frac{E_{H2}}{E_{H2_max}} = \frac{P_{H2}}{P_{H2_max}}$$

Fast-dynamic storage level ($Level_{sc}$):	0%	25%	30%	50%	90%	95%	100%
Super-capacitor voltage (u_{sc}):	0V	72V	78.9V	101.8V	136.6V	140.4V	144V

Long-term storage level ($Level_{H2}$):	0%	10%	15%	50%	90%	95%	100%
Hydrogen pressure in the tank (P_{H2}):	0bar	2bar	3bar	10.8bar	18bar	19bar	20bar

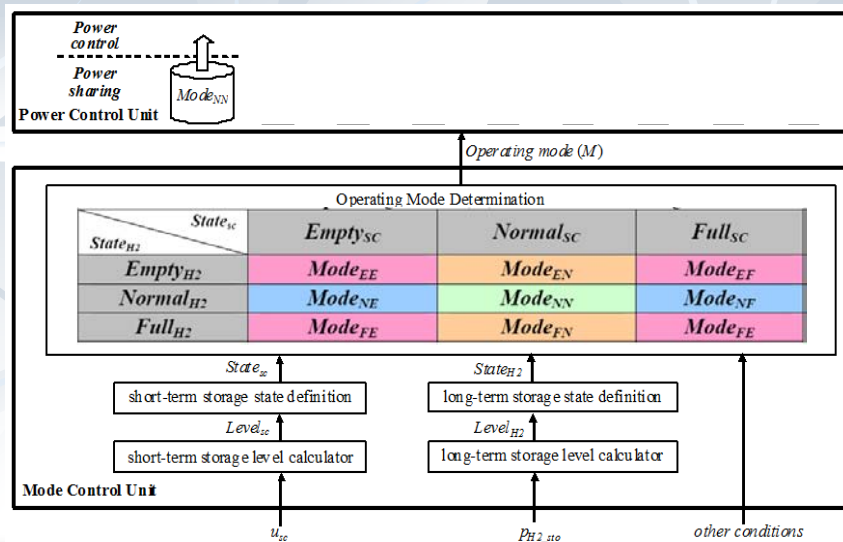
- Définition des états de stockage



58

Contrôle des modes de marche

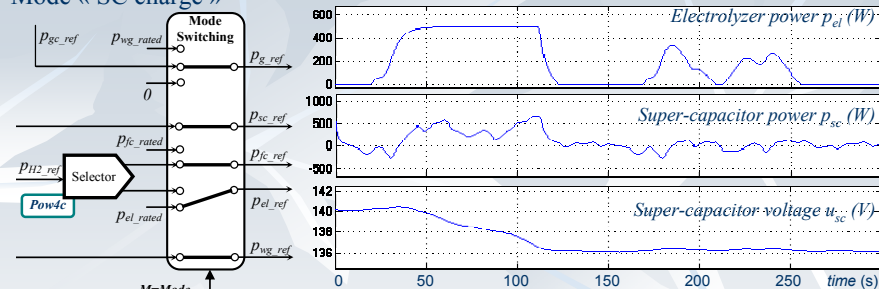
- Définition des modes de marche



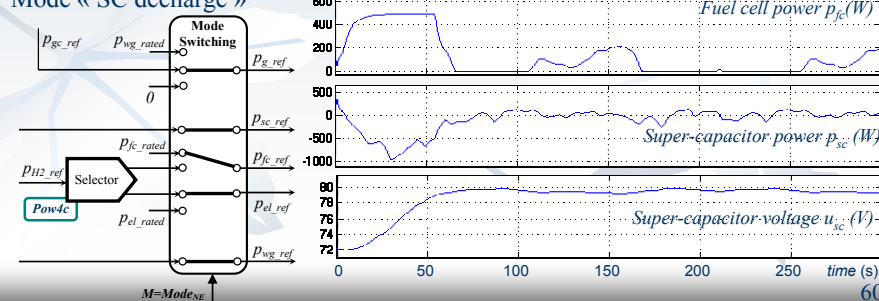
59

Mode de marche dégradé des super-condensateurs

- Mode « SC chargé »



- Mode « SC déchargé »



60

Plan

- Introduction
- Générateur éolien
- Eolien associé avec des super-condensateurs
- Stockage sur le long terme (Pile à combustible et Electrolyseur)
- Générateur actif éolien
- Conclusion et perspectives

61

Conclusion et perspectives

- Objectif général
 - Développer un générateur actif éolien pouvant participer à la gestion d'un micro réseau (P_{ref} , Q_{ref})
- Conclusion
 - Système hybride multi source
 - Eolien → Source primaire à base d'énergie renouvelable
 - Super-condensateurs → stockage à dynamique rapide pour équilibrer en temps réels les flux de puissance
 - Pile à combustible + Electrolyseur → Stockage sur le long terme pour garantir une disponibilité énergétique
 - Travaux de recherche effectués
 - Modélisation et Conception de commande
 - Conception des stratégies de répartition des puissances
 - Proposition des stratégies de gestion énergétique
 - Implémentation expérimentale d'un banc d'essai

62

Conclusion et perspectives

■ Contributions

- l'utilisation et l'adaptation des formalismes pour la modélisation des systèmes complexes et pour la conception de leur commande;
- la conception et la réalisation expérimentale des émulateurs pour réduire le temps et le coût du développement du prototype expérimental;
- la proposition et la validation de deux stratégies de répartition des puissances pour le control du bus continu et le contrôle des puissances transitées au réseau;
- la proposition de stratégies de supervision énergétique avec la définition des modes de fonctionnement pour assurer la disponibilité énergétique du générateur actif éolien.

63

Conclusion et perspectives

■ Perspectives

- Implémentation à grand puissance
 - Sous hautes tensions et forts courants
 - Nouvelles contraintes de dimensionnement et de sécurité
- Implémentation avec les vrais systèmes de pile à combustible et d'électrolyseur
 - Contraintes réelles non-électriques
 - Passage du prototype laboratoire au produit industriel
- Evaluation techno-économique
 - Avec le dimensionnement optimisé du système
 - Avec la prise en compte de l'impact environnemental
 - Permettant la comparaison des différentes solutions.

64

Merci pour votre attention

65