

CONCEPTION ET CONTRÔLE D'UN GÉNÉRATEUR PV ACTIF À STOCKAGE INTÉGRÉ

APPLICATION À L'AGRÉGATION DE PRODUCTEURS-CONSOMMATEURS
DANS LE CADRE D'UN MICRO RÉSEAU INTELLIGENT URBAIN

SOUTENANCE - THÈSE DE DOCTORAT
16-12-2010



Di LU

Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille
École Centrale de Lille



Introduction générale

CONTEXTE



Besoins énergétiques et Environnement

Enjeux énergétiques

- Demande mondiale en énergie primaire en augmentation
(La Chine, augmentation de 37%, de 2008 à 2030)

- Diminution prévue des stocks de pétrole
(Cinquantaine de pays ont déjà passé leur pic de production)

Challenge environnemental (Emission de gaz à effet de serre)

- Réchauffement de l'atmosphère dû aux gaz à effet de serre

- Rejet de CO₂ par combustion du carbone fossilisé

CONTEXTE

Intérêt des énergies renouvelables

Buts:

- Réduction des émissions de CO₂
- Réduction de la consommation des combustibles fossiles



Panneaux photovoltaïques



éoliennes



Centrale hydraulique

- **Générateur dispatchable à base d'énergie renouvelable**
Hydraulique, biocarburants, géothermique...
- **Générateur non-dispatchable à base d'énergie renouvelable**
Éolienne, solaire...

Contraintes:

Hydroélectricité: Manque de sites géographiques; **Biomasse :** besoin de lieux de stockage

Panneaux photovoltaïques et éoliennes:

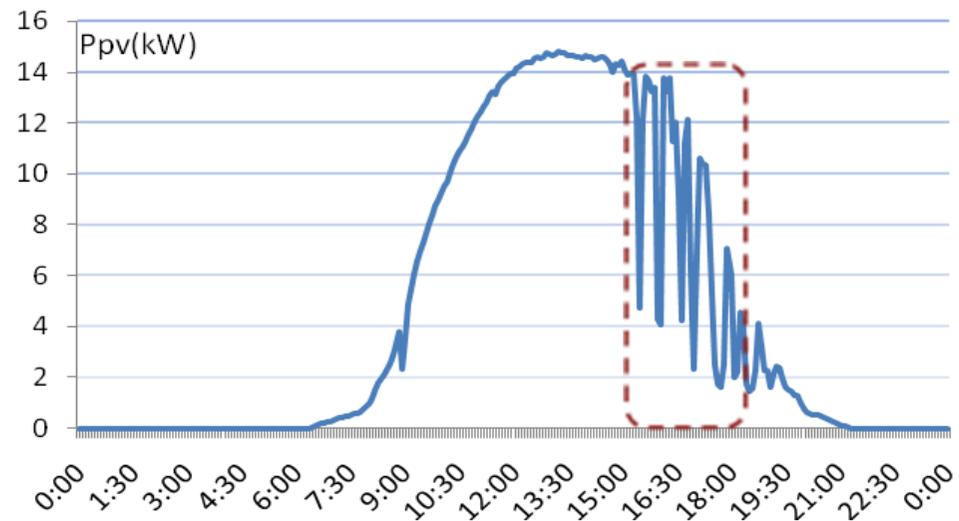
Intermittence de la production

Fluctuation de puissance

CONTEXTE

- **Problèmes**
 - Conditions météorologiques intermittentes et fluctuantes
 - Production aléatoire et difficilement prévisible
 - Impacts sur le réseau électrique
 - Difficulté à réaliser l'adéquation entre la production et la consommation
- **Contraintes:**
 - Production PV intermittente et fluctuante
 - Puissance stable demandée par le réseau sur une fenêtre temporelle

- **Deux acteurs impliqués:**
 - Les producteurs PV
 - Le gestionnaire du réseau



OBJECTIF POUR LE PRODUCTEUR

- **Solution développée dans cette thèse pour le producteur PV**
 - Transformer un générateur PV en un générateur actif pouvant participer à la gestion d'un réseau (dont fonctionnant comme un alternateur classique)

- **Matériel → Systèmes de stockage d'énergie:**
 - Equilibrage temps réel de la puissance (millisecondes → secondes → minutes)
 - Gestion de la disponibilité de l'énergie (minutes → heures)

- **Commande → Fonctions de contrôle additionnelles à imaginer**
 - La coordination locale entre les panneaux PV et les unités de stockage pour éliminer les fluctuations
 - La gestion des niveaux énergétiques des unités de stockage
 - La fourniture de services « système »

OBJECTIF POUR LE GESTIONNAIRE

- **Problèmes pour le gestionnaire du réseau électrique**
 - Très grand nombre de petites production dispersées dans le réseau et à coordonner

- **Objectif : un réseau de distribution plus intelligent**
 - Utilisation d'un réseau de communication
 - Gestion centralisée de ce type de production
 - Amélioration de l'efficacité du réseau, qualité de fourniture

- **Solution développée dans cette thèse pour le gestionnaire**
 - Nouvelle organisation du système électrique par le recours à des agrégateurs
 - Application des concepts issus des micro réseaux pour la conception de la gestion

PRODUCTEUR

**PARTIE I:
GÉNÉRATEUR ACTIF À BASE DE PANNEAUX PV**

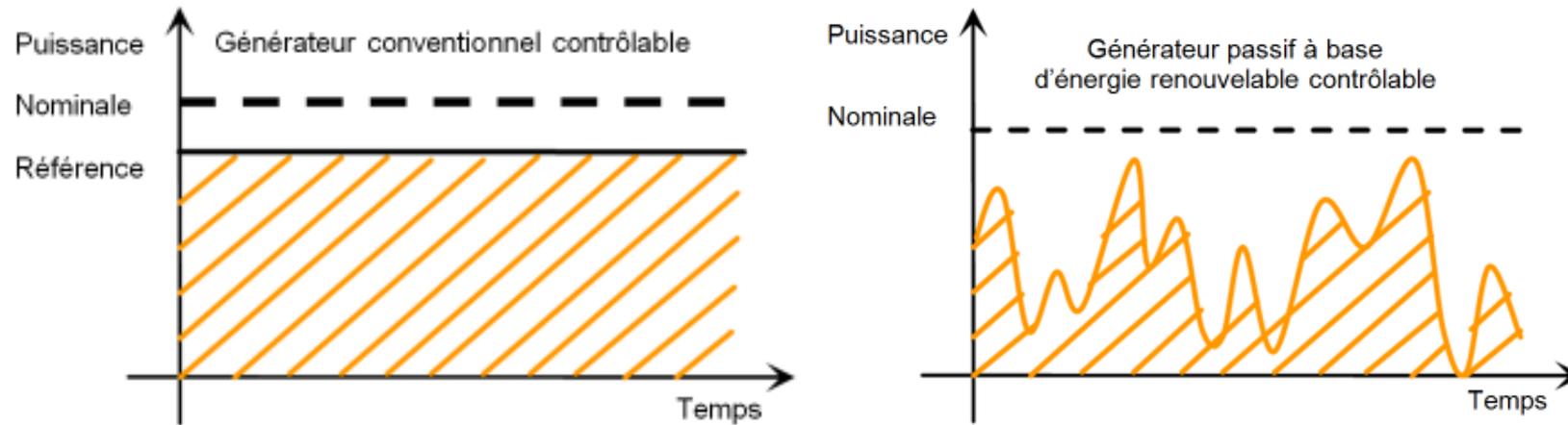
**PARTIE II:
CONTRÔLEUR LOCAL POUR GÉNÉRATEUR ACTIF PV**

GESTIONNAIRE

**PARTIE III:
MICRO RÉSEAU**

**PARTIE IV:
MICRO RÉSEAU INTELLIGENT URBAIN**

INTÉGRATION D'UN STOCKAGE ÉLECTRIQUE



Objectif:

Transformer les générateurs passifs à base d'énergie renouvelable en générateurs actifs

Intérêts:

- Équilibrage de l'intermittence de production
- Lissage de la puissance fluctuante

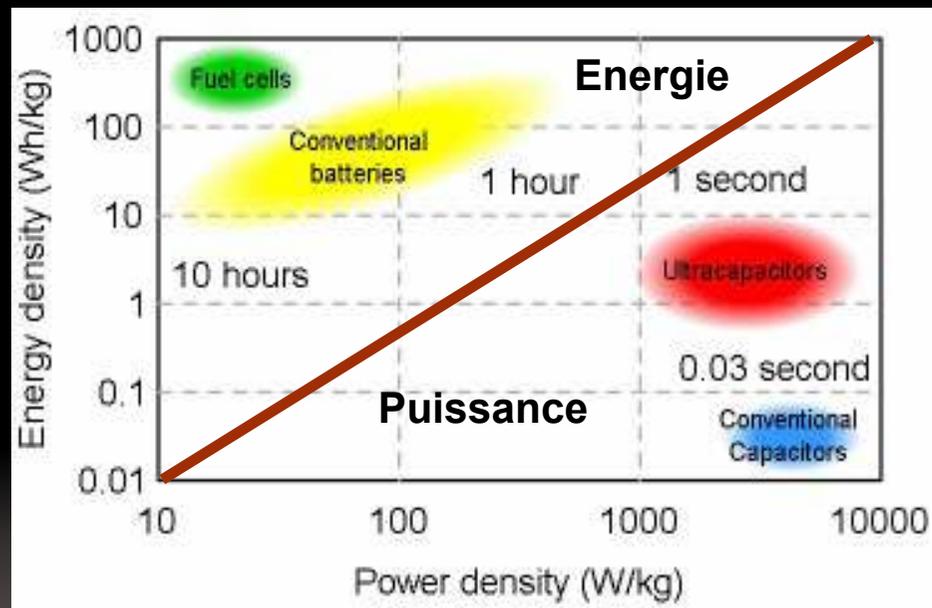
Différents types de stockage électrique

- Stockage énergétique long terme (quelques heures)

Batteries plomb acide

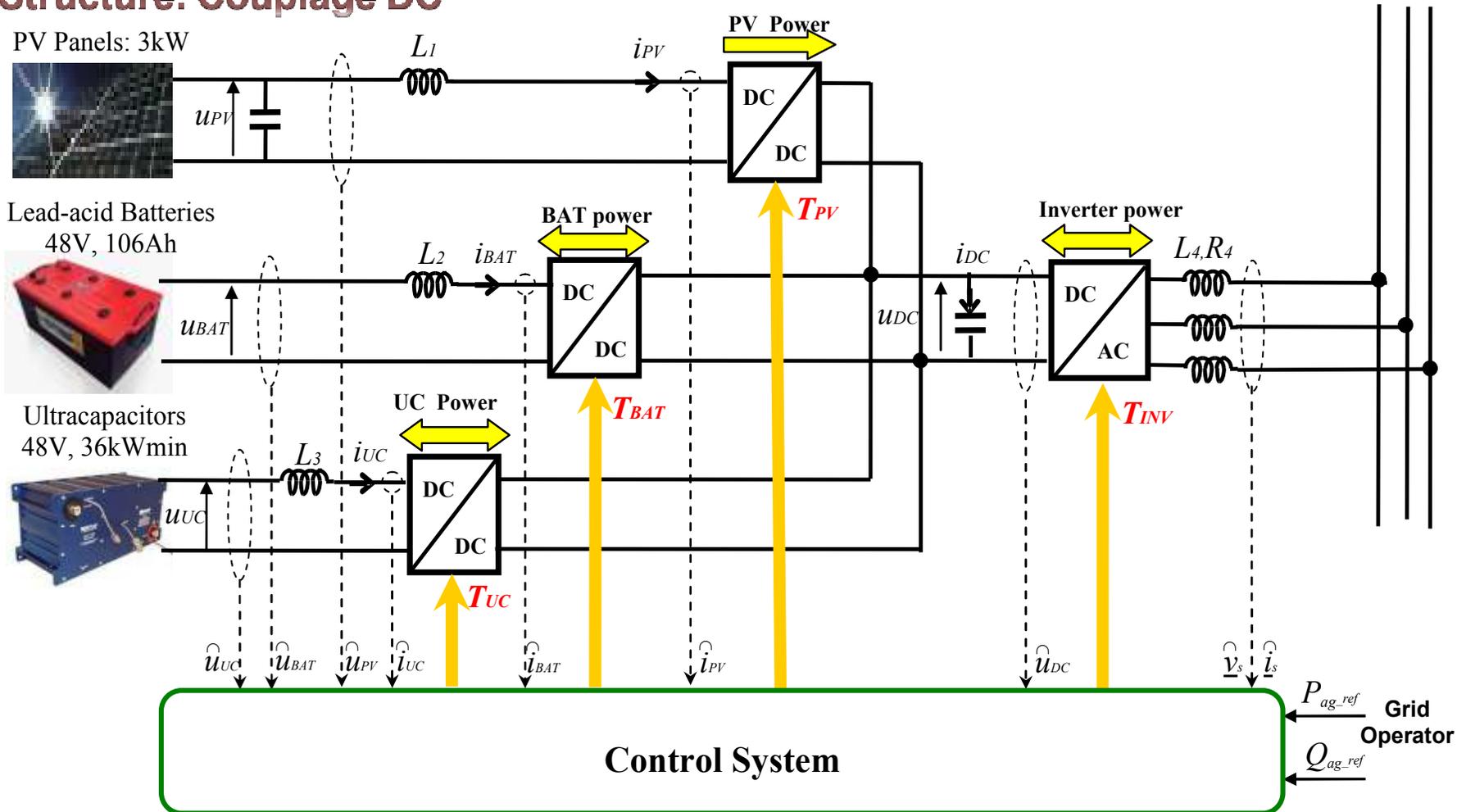
- Stockage de puissance à dynamique rapide (quelques dizaines de minutes)

Supercondensateurs



CONFIGURATION DU GÉNÉRATEUR ACTIF PV

Structure: Couplage DC

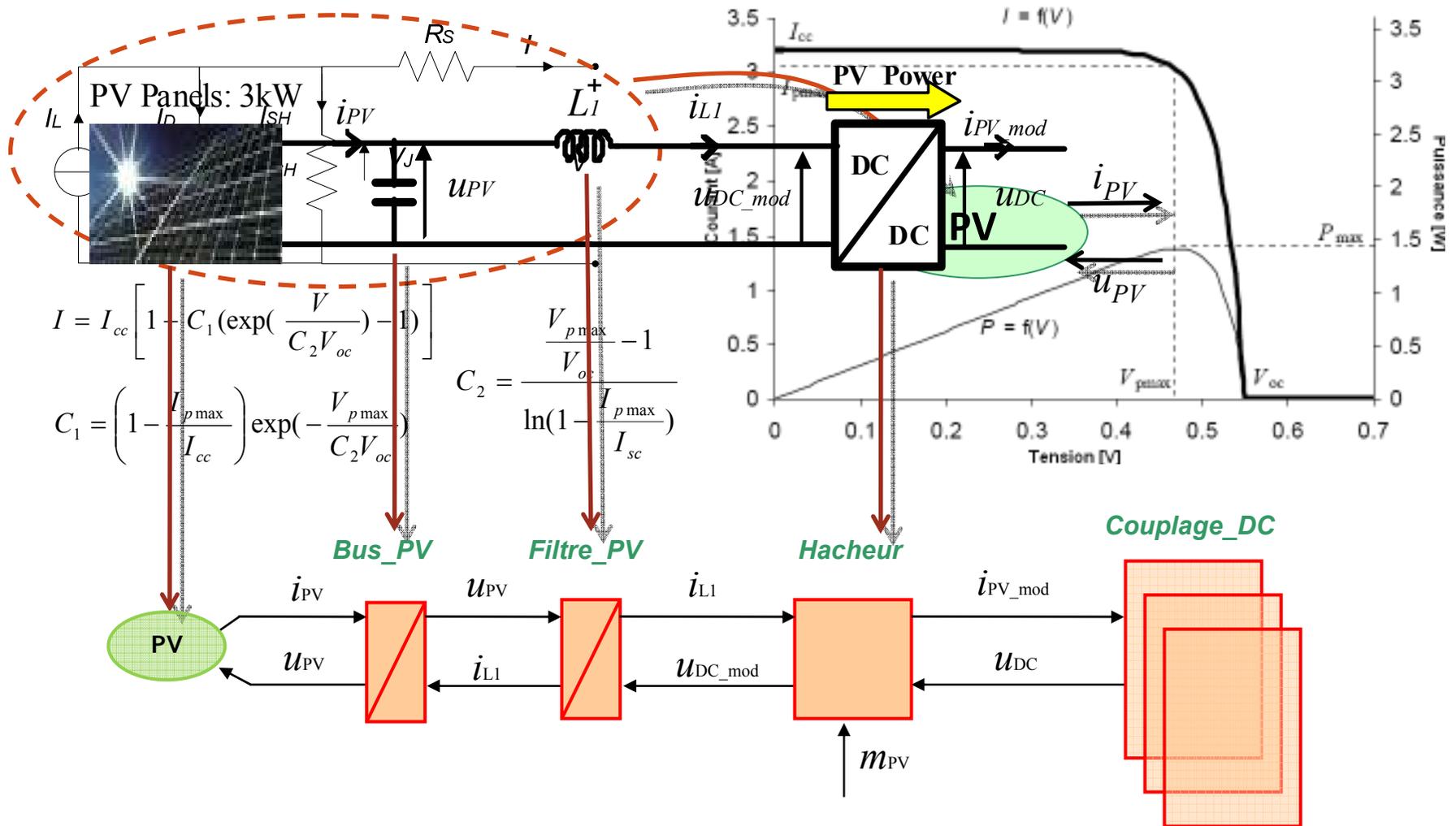


Objectif: Contrôler les puissances générées

Méthode: Développement d'un modèle pour concevoir la commande

Utilisation de la REM: Représentation Energétique Macroscopique

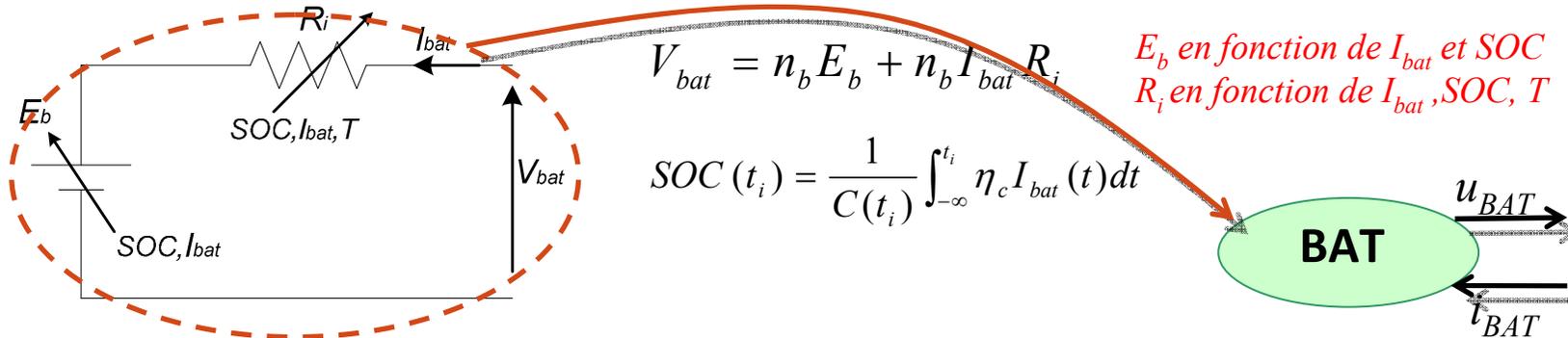
MODÈLE DE UNE CHAÎNE DE BONVERSTAND DE PUISSANCE PV



REM: Représentation Energétique Macroscopique

MODÉLISATION DE COMPOSANT DE STOCKAGE ÉNERGÉTIQUE

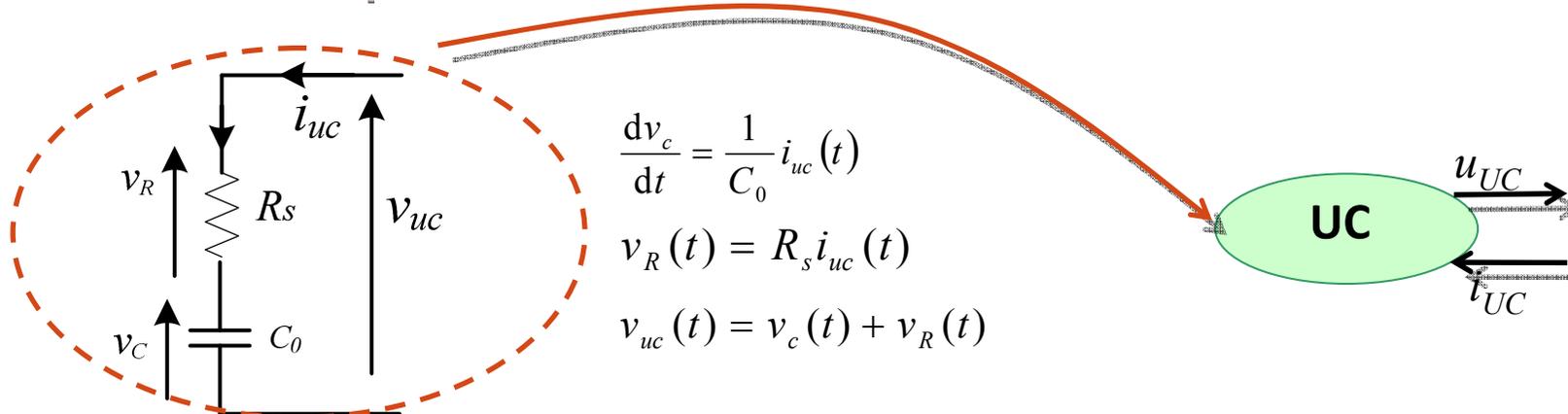
▪ Modèle d'une batterie



Critère de choix du modèle:

Modèle simplifié pour représenter le comportement énergétique de la batterie

▪ Modèle d'un supercondensateur

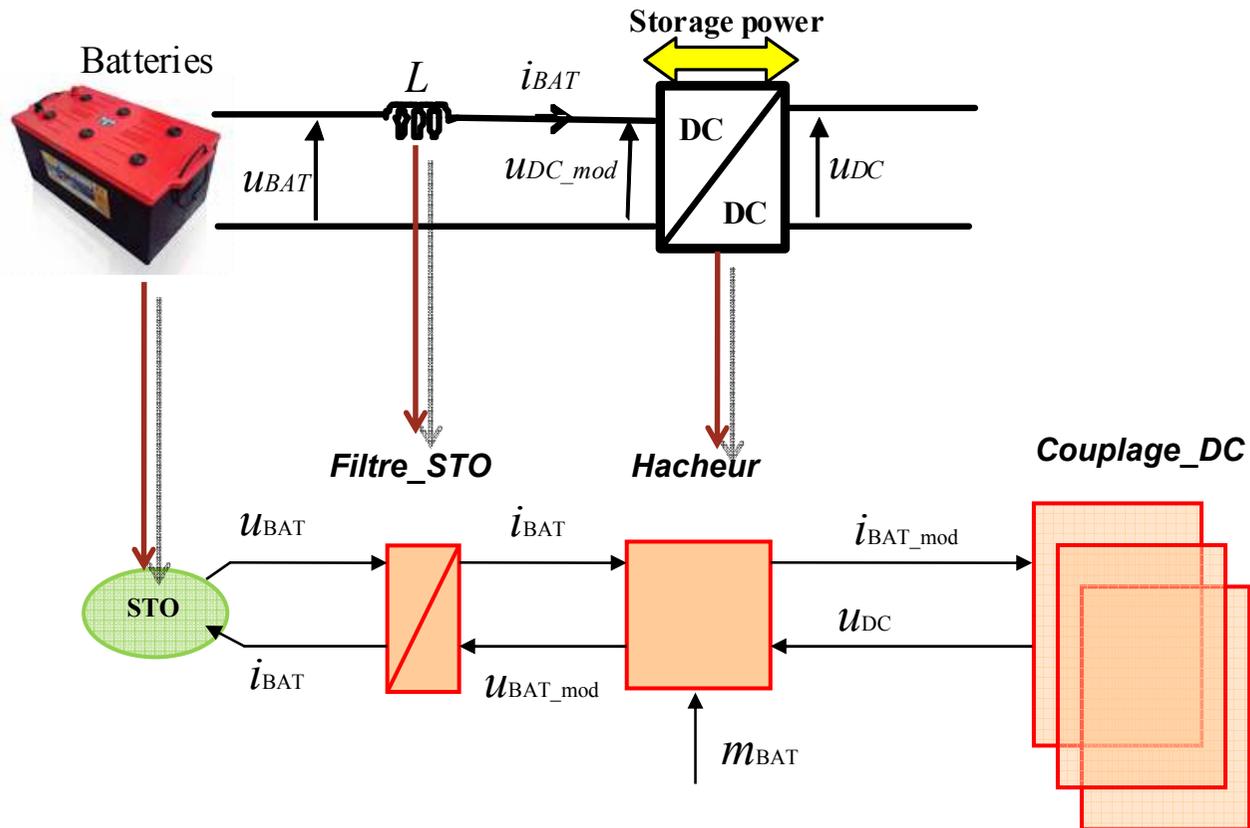


Critère de choix du modèle:

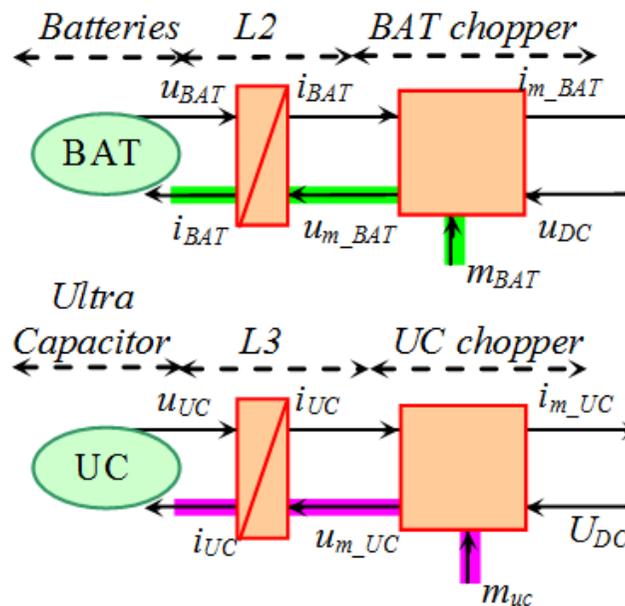
Modèle simplifié pour représenter le comportement transitoire des supercondensateurs

MODÈLE DE LA CHAÎNE DE CONVERSION DE PUISSANCE AVEC DES UNITÉ DE STOCKAGE

Batteries et supercondensateurs



MODÉLISATION DU GÉNÉRATEUR ACTIF PV



Représentation Energétique Macroscopique
du modèle complet du générateur actif

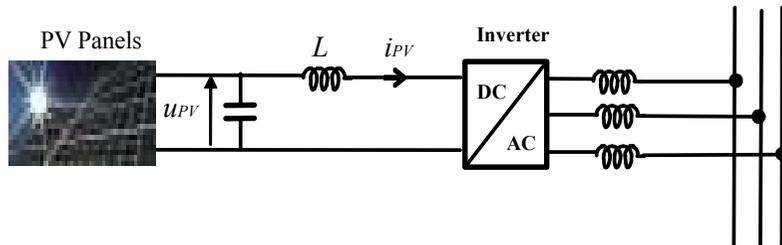


PARTIE II: CONTRÔLEUR LOCAL POUR GÉNÉRATEUR ACTIF PV

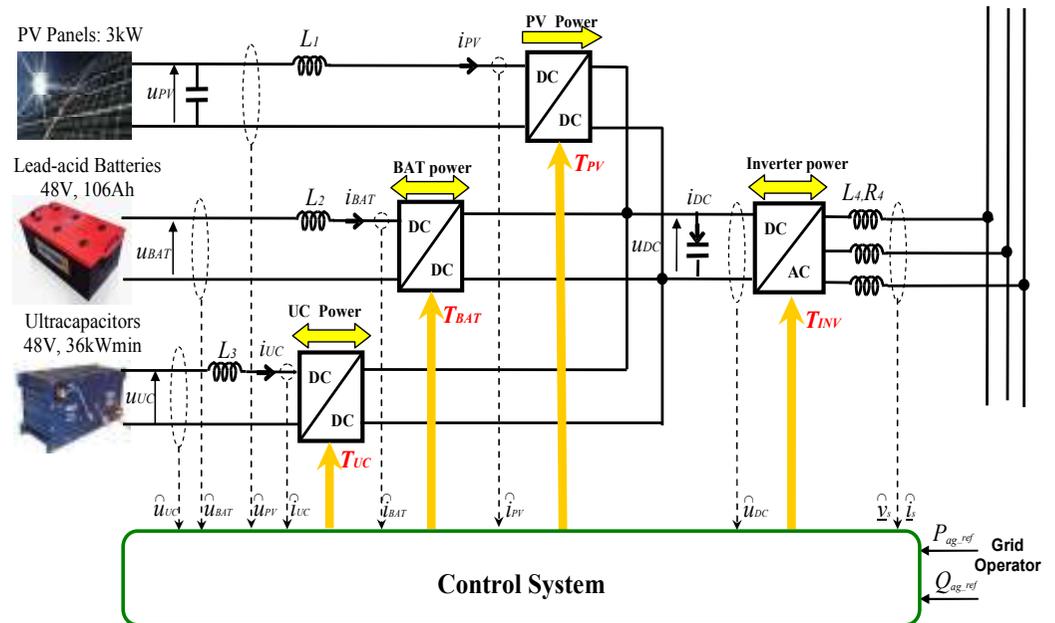
Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV

NOUVEAUX OBJECTIFS POUR LA COMMANDE

Générateur conventionnel de Panneaux PV



Générateur PV actif

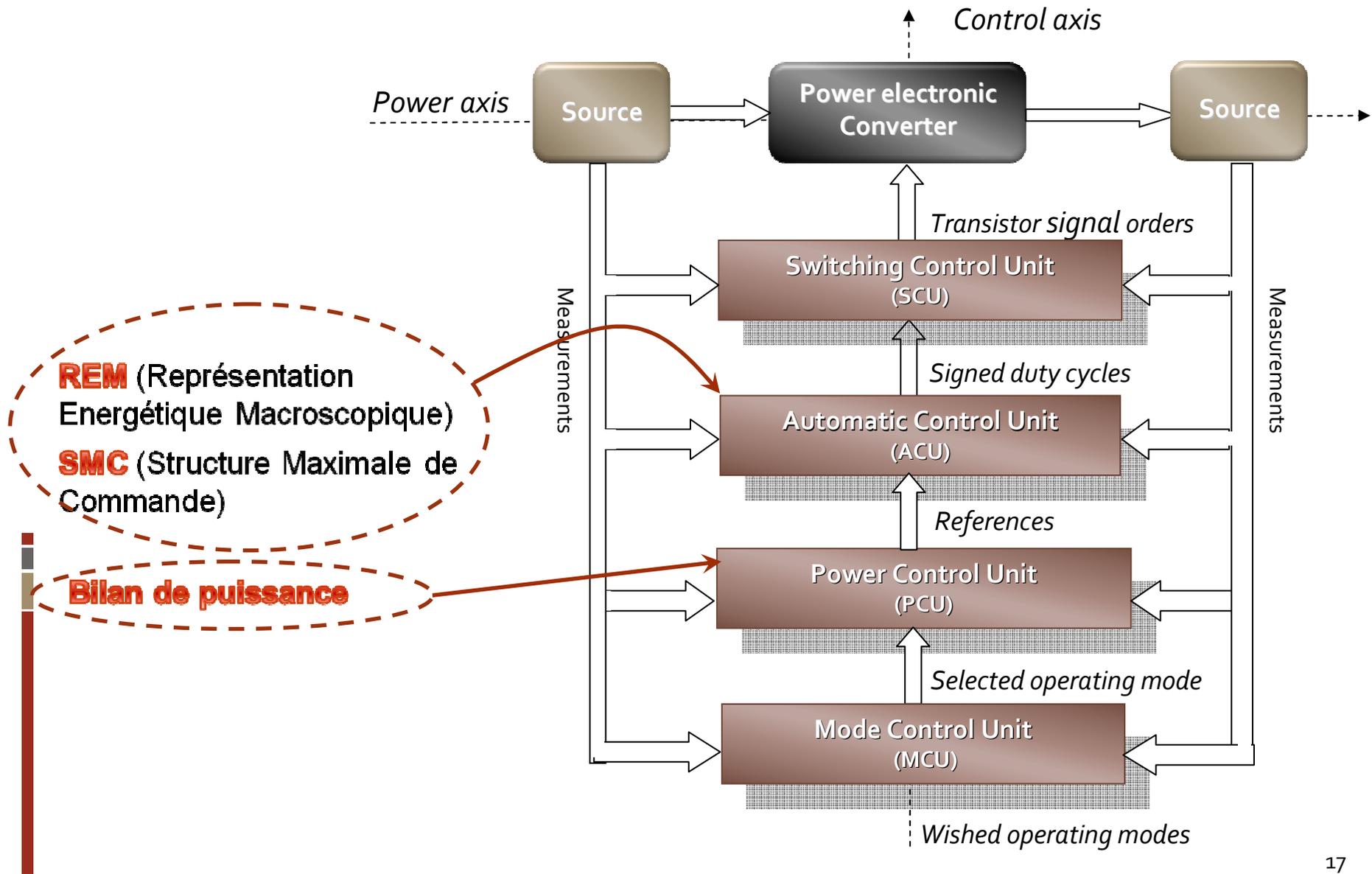


Objectif de la commande des panneaux PV conventionnels:
Extraire la puissance maximale des panneaux PV

Objectif de la commande d'un générateur PV actif :

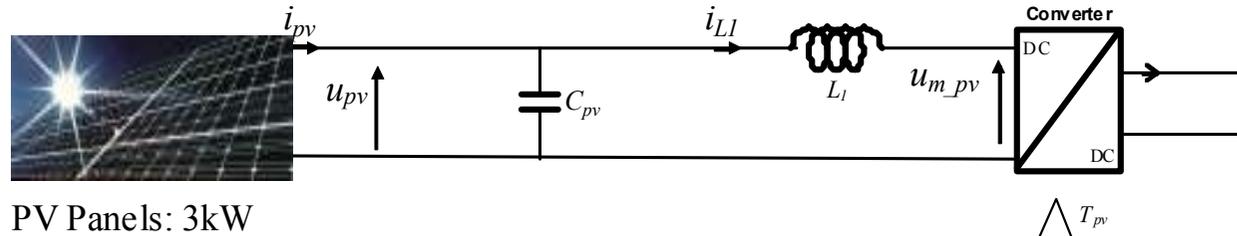
- Fournir P_{ag_ref} et Q_{ag_ref}
- Maximiser l'utilisation de la puissance PV
- Filtrer les fluctuations de puissance
- Coordonner les 3 sources

COMMANDE HIÉRARCHIQUE [Hau 99]



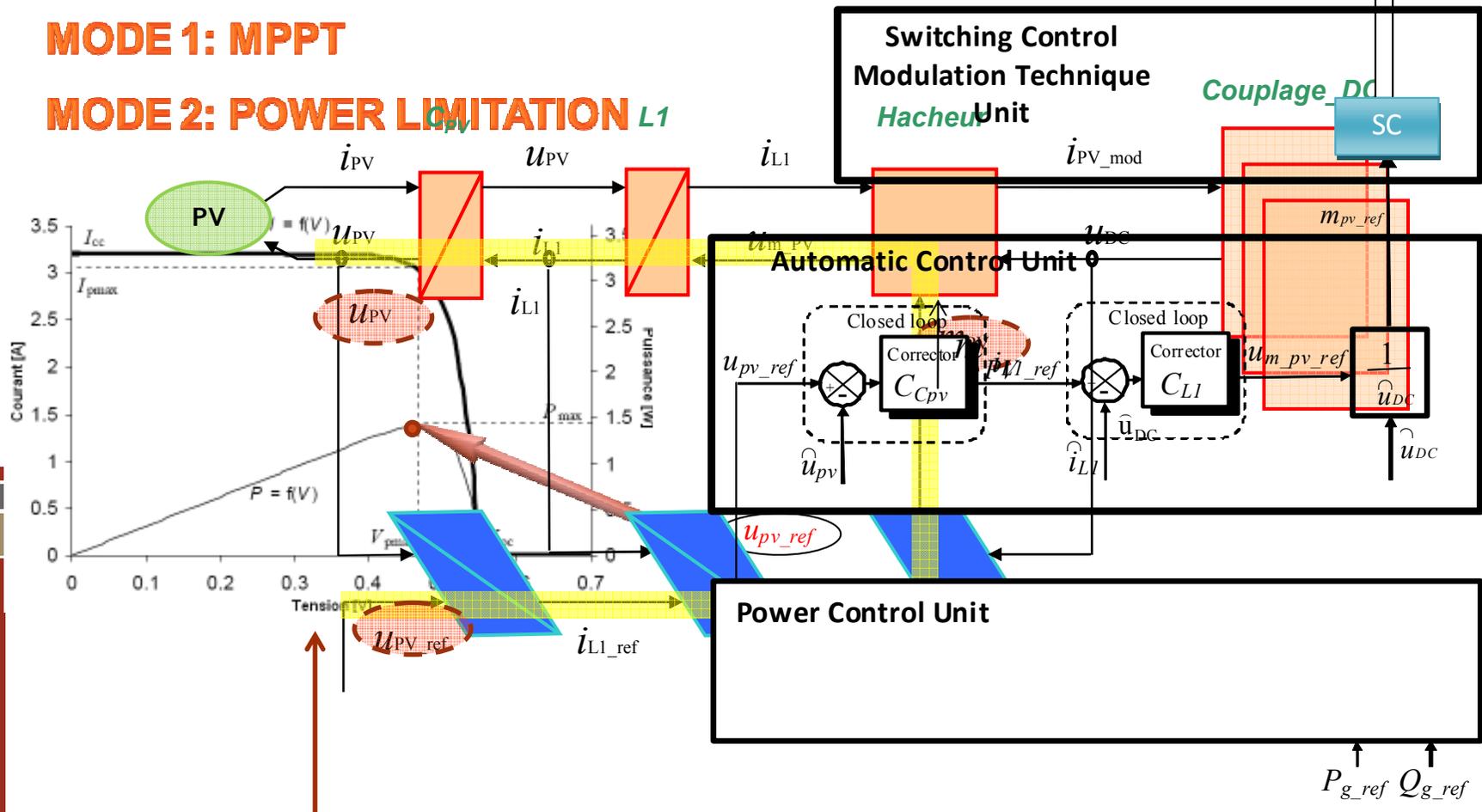
Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Commande rapprochée

COMMANDE RAPPROCHÉE POUR LES PANNEAUX PV



MODE 1: MPPT

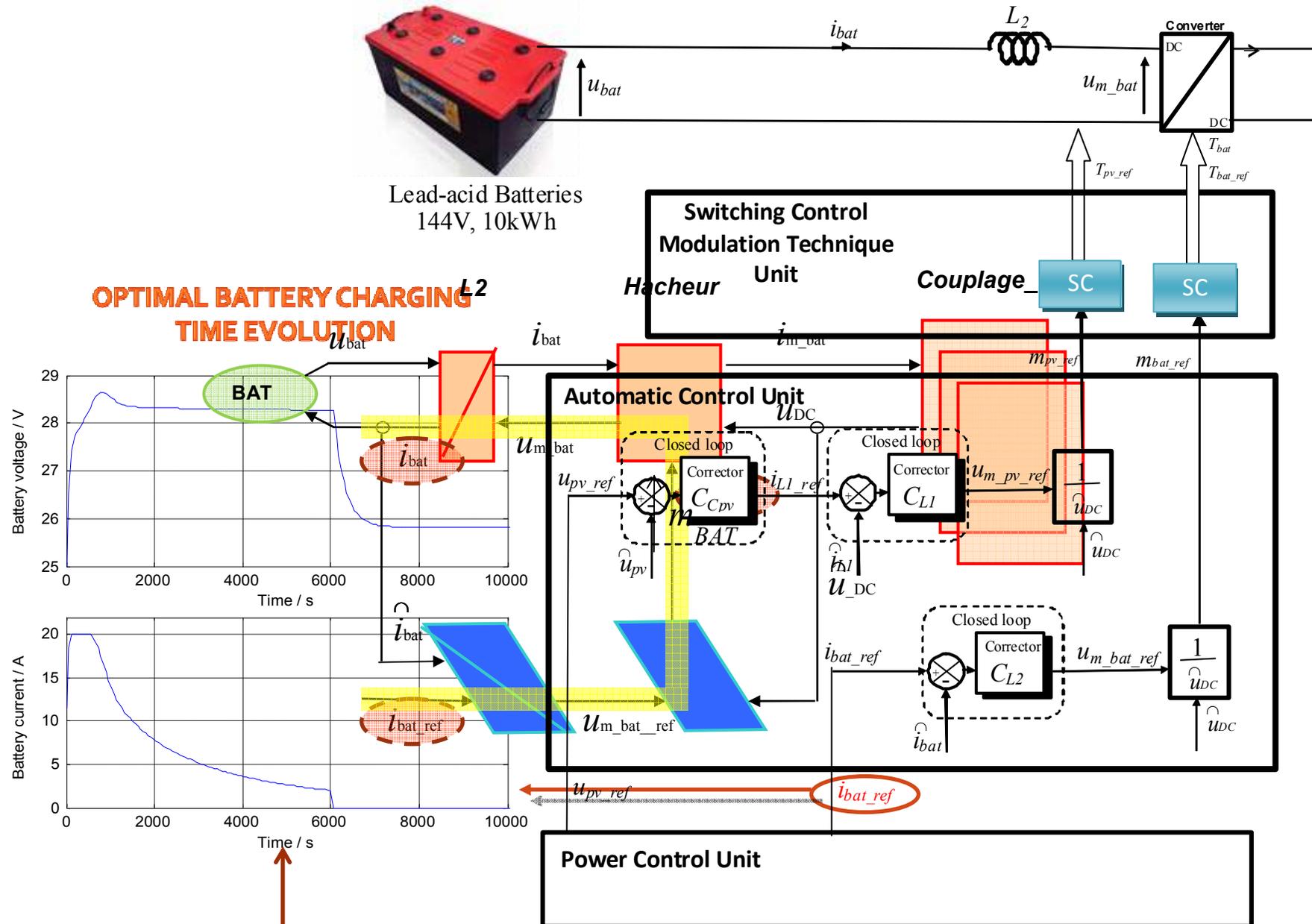
MODE 2: POWER LIMITATION



Objectif de la commande: Contrôler la tension

Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Commande rapprochée

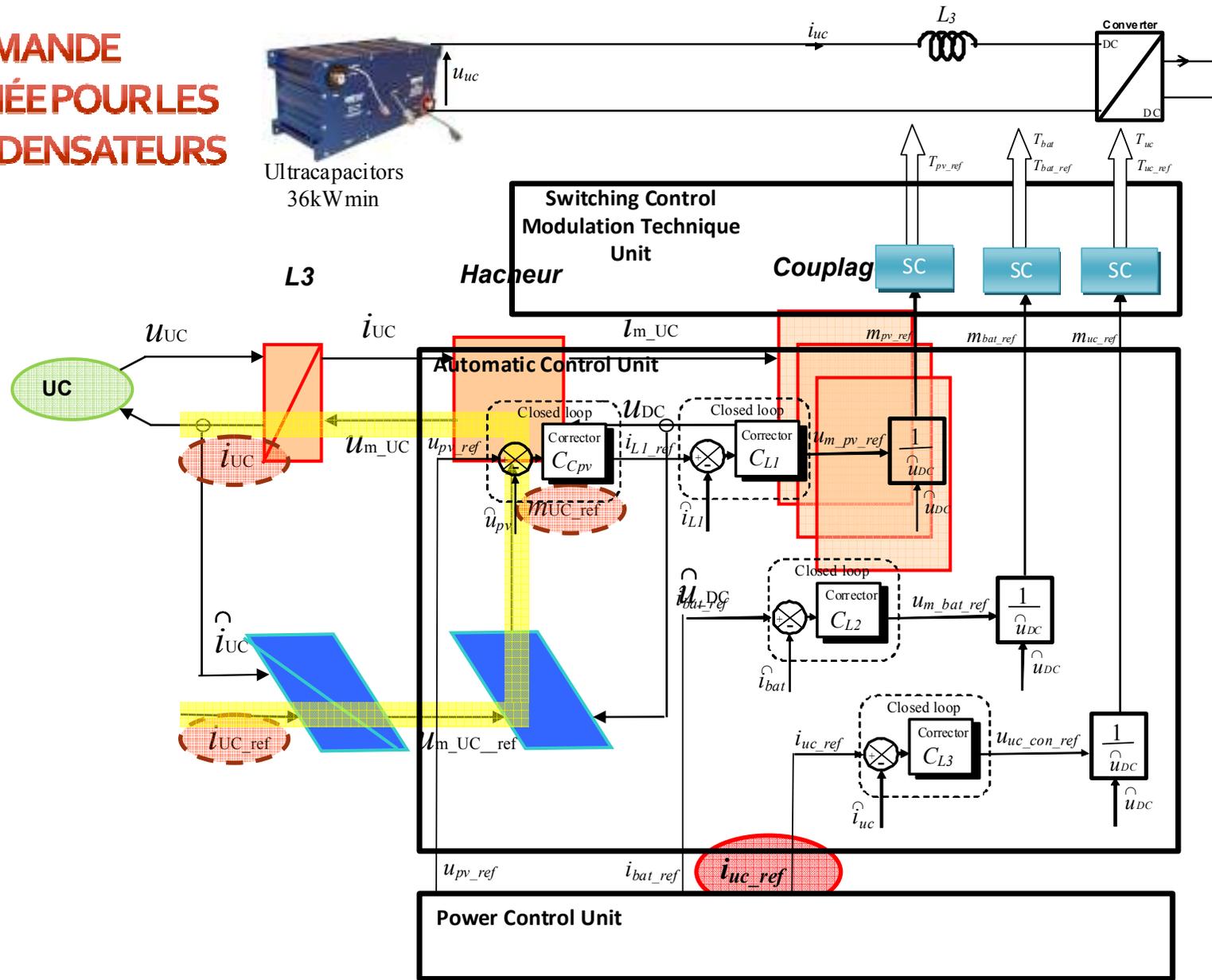
COMMANDE RAPPROCHÉE POUR LES BATTERIES



Objectif de la commande: Contrôler le courant

Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Commande rapprochée

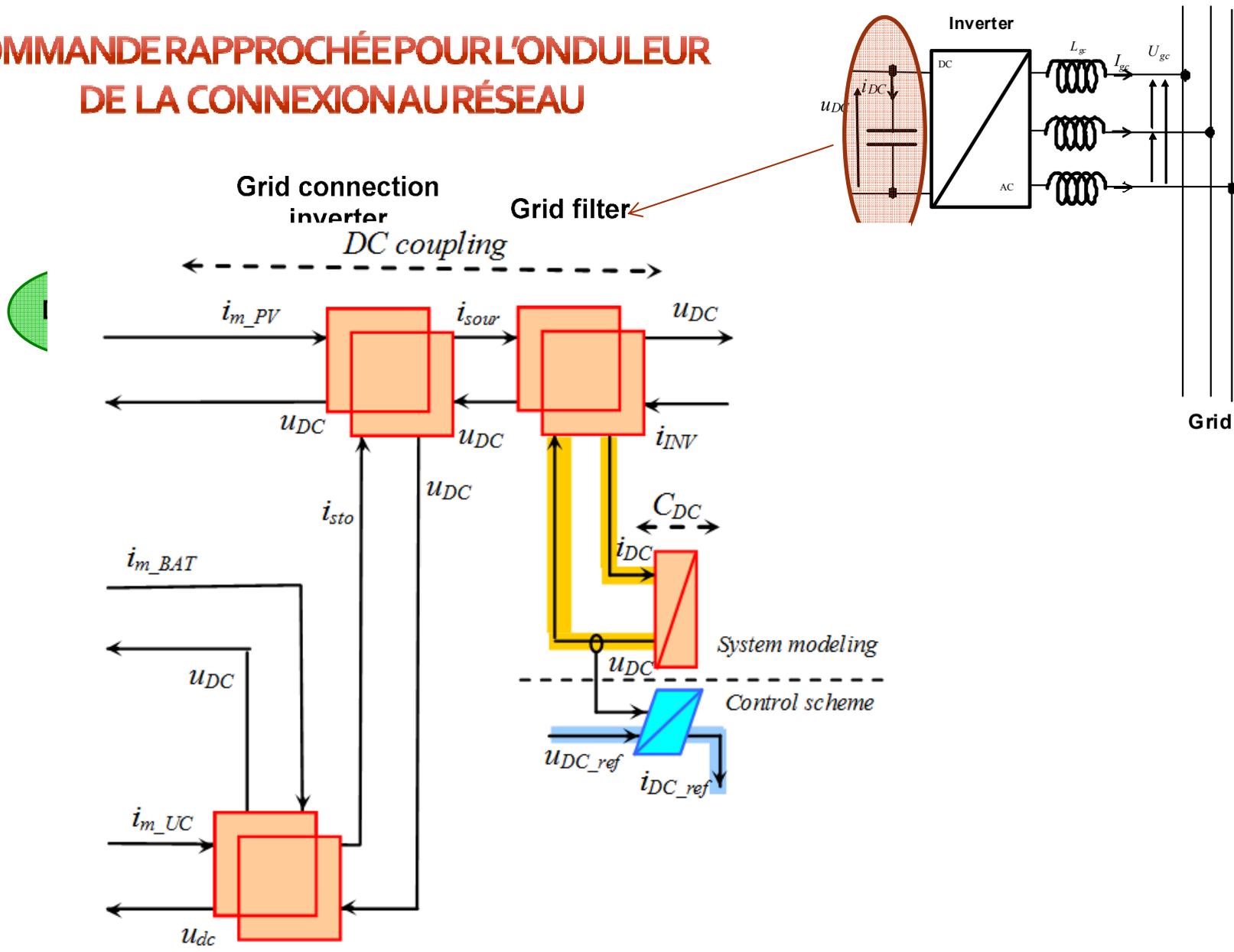
COMMANDE RAPPROCHÉE POUR LES SUPERCONDENSATEURS



Objectif de la commande: Contrôler le courant

Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Commande rapprochée

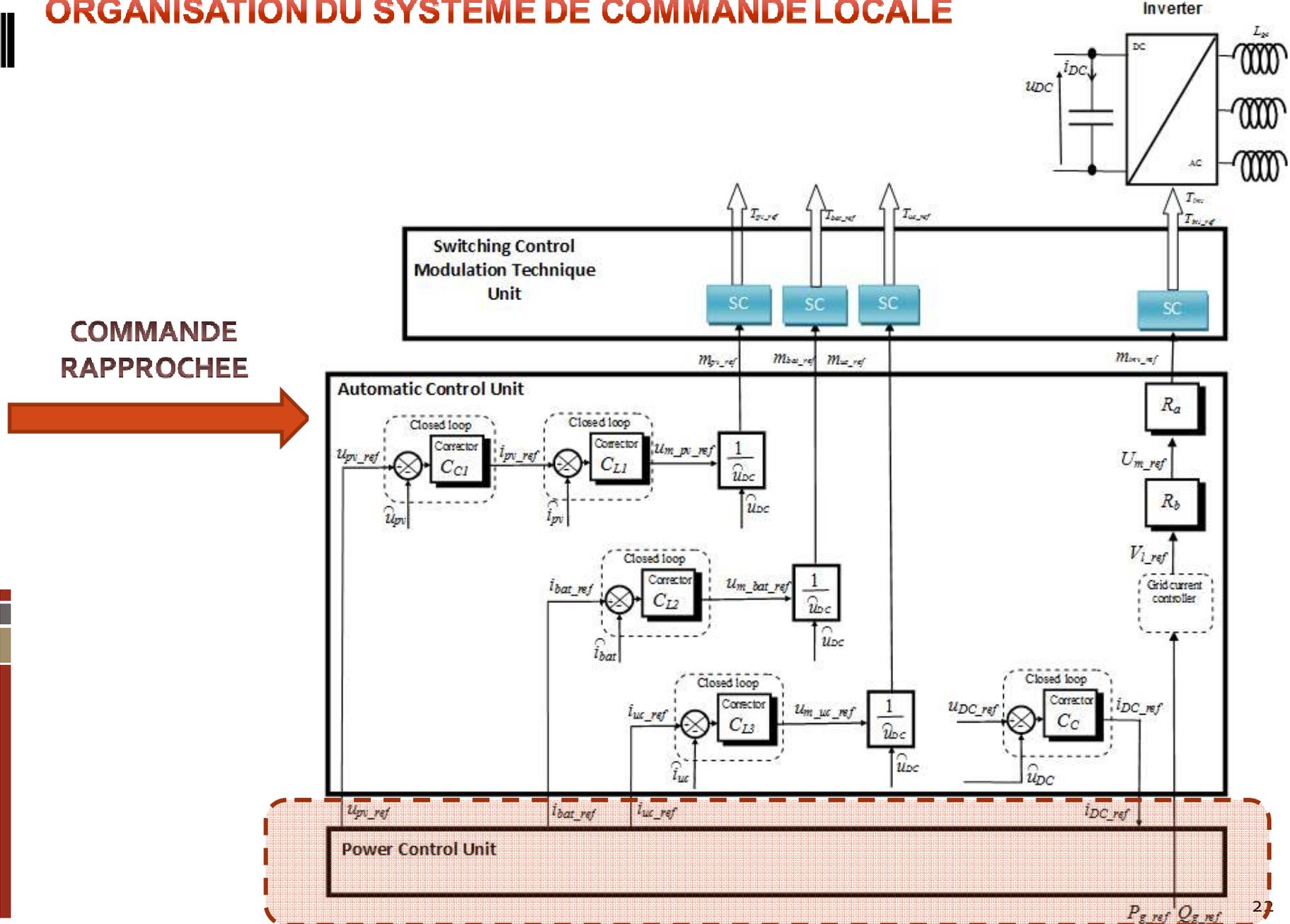
COMMANDE RAPPROCHÉE POUR L'ONDULEUR DE LA CONNEXION AU RÉSEAU



Objectif de la commande: Contrôler les courants générés au réseau

Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Commande rapprochée

ORGANISATION DU SYSTÈME DE COMMANDE LOCALE



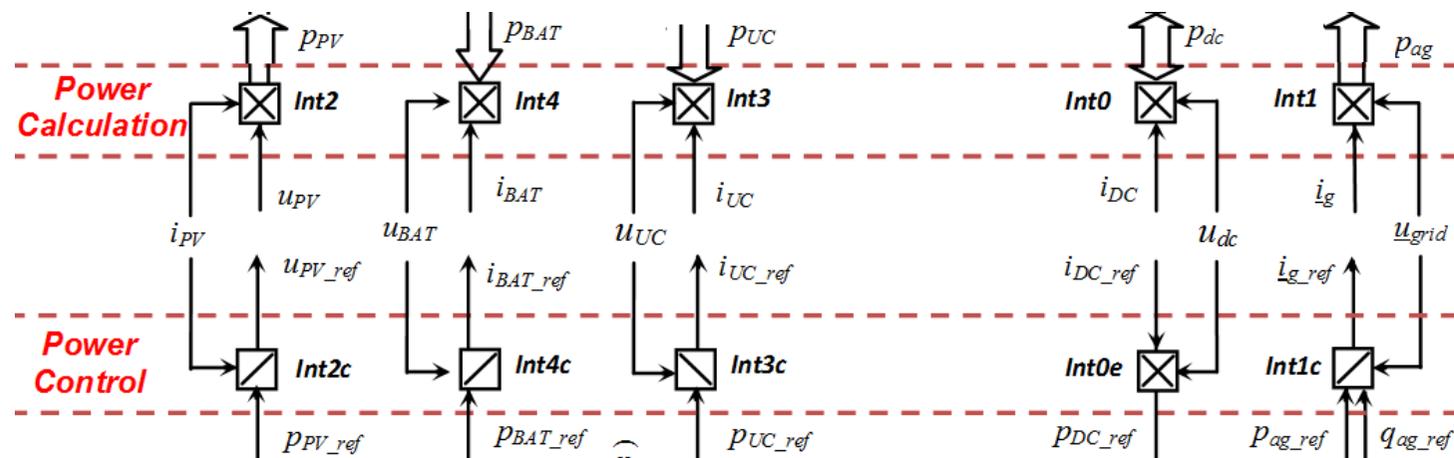
Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Contrôle de puissance

CONTRÔLE DES PUISSANCES

Objectif → établir les liens entre les grandeurs physiques et les puissances

Méthodes → par calcul direct ou inverse des puissances

Energy source	PV generator	Batteries	Super-capacitors	DC-bus capacitor	Grid connection
Power calculation	<i>Int2</i> : $p_{PV} = i_{PV} u_{PV}$	<i>Int4</i> : $p_{BAT} = i_{BAT} u_{BAT}$	<i>Int3</i> : $p_{UC} = u_{UC} i_{UC}$	<i>Int0</i> : $p_{dc} = u_{dc} i_{dc}$	<i>Int1</i> : $\begin{cases} p_{ag} = u_{13} i_{g1} + u_{23} i_{g2} \\ q_{ag} = \sqrt{3}(u_{13} i_{g1} - u_{23} i_{g2}) \end{cases}$
Power control	<i>Int2c</i> : $u_{PV_ref} = \frac{1}{\hat{i}_{PV}} P_{PV_ref}$	<i>Int4c</i> : $i_{BAT_ref} = \frac{1}{\hat{u}_{BAT}} P_{BAT_ref}$	<i>Int3c</i> : $i_{UC_ref} = \frac{1}{\hat{u}_{UC}} P_{UC_ref}$	<i>Int0e</i> : $P_{dc_ref} = \hat{u}_{dc} i_{dc_ref}$	<i>Int1c</i> : $\begin{cases} i_{g1_ref} = \frac{(2\hat{u}_{13} - \hat{u}_{23})p_{ag_ref} + \sqrt{3}\hat{u}_{23}q_{ag_ref}}{2\hat{u}_{13}^2 - 2\hat{u}_{13}\hat{u}_{23} + 2\hat{u}_{23}^2} \\ i_{g2_ref} = \frac{(2\hat{u}_{23} - \hat{u}_{13})p_{ag_ref} - \sqrt{3}\hat{u}_{13}q_{ag_ref}}{2\hat{u}_{13}^2 - 2\hat{u}_{13}\hat{u}_{23} + 2\hat{u}_{23}^2} \end{cases}$



RÉPARTITION ET CALCUL DES PUISSANCES DE RÉFÉRENCE

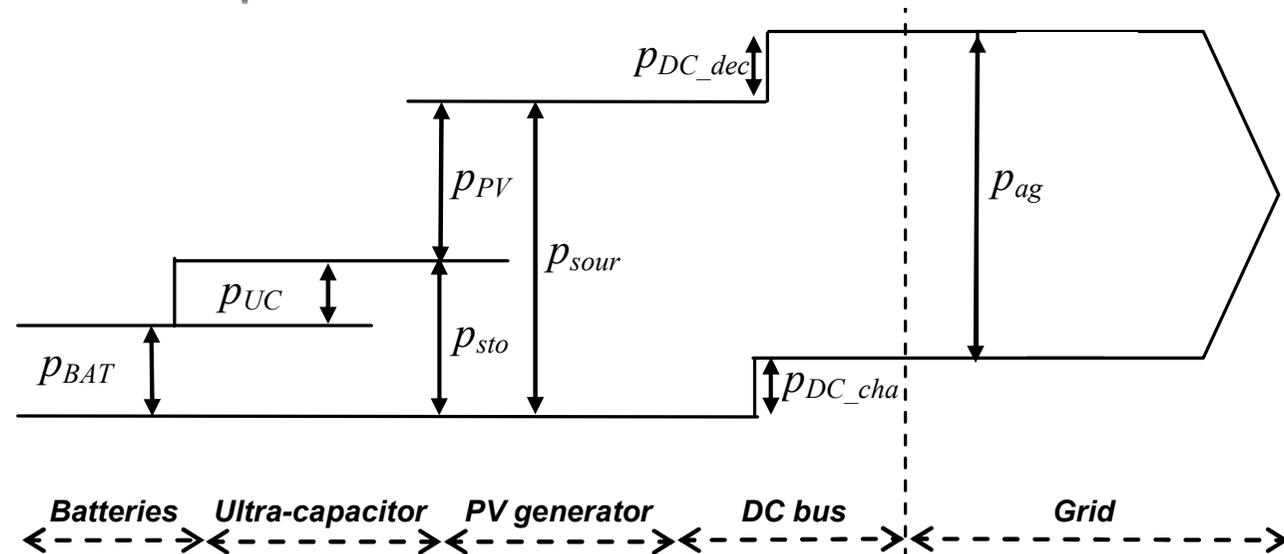
Objectifs :

- Calcul de la puissance à échanger avec chaque unité de stockage
- Prendre en compte la puissance nécessaire à la régulation de bus DC

Méthode :

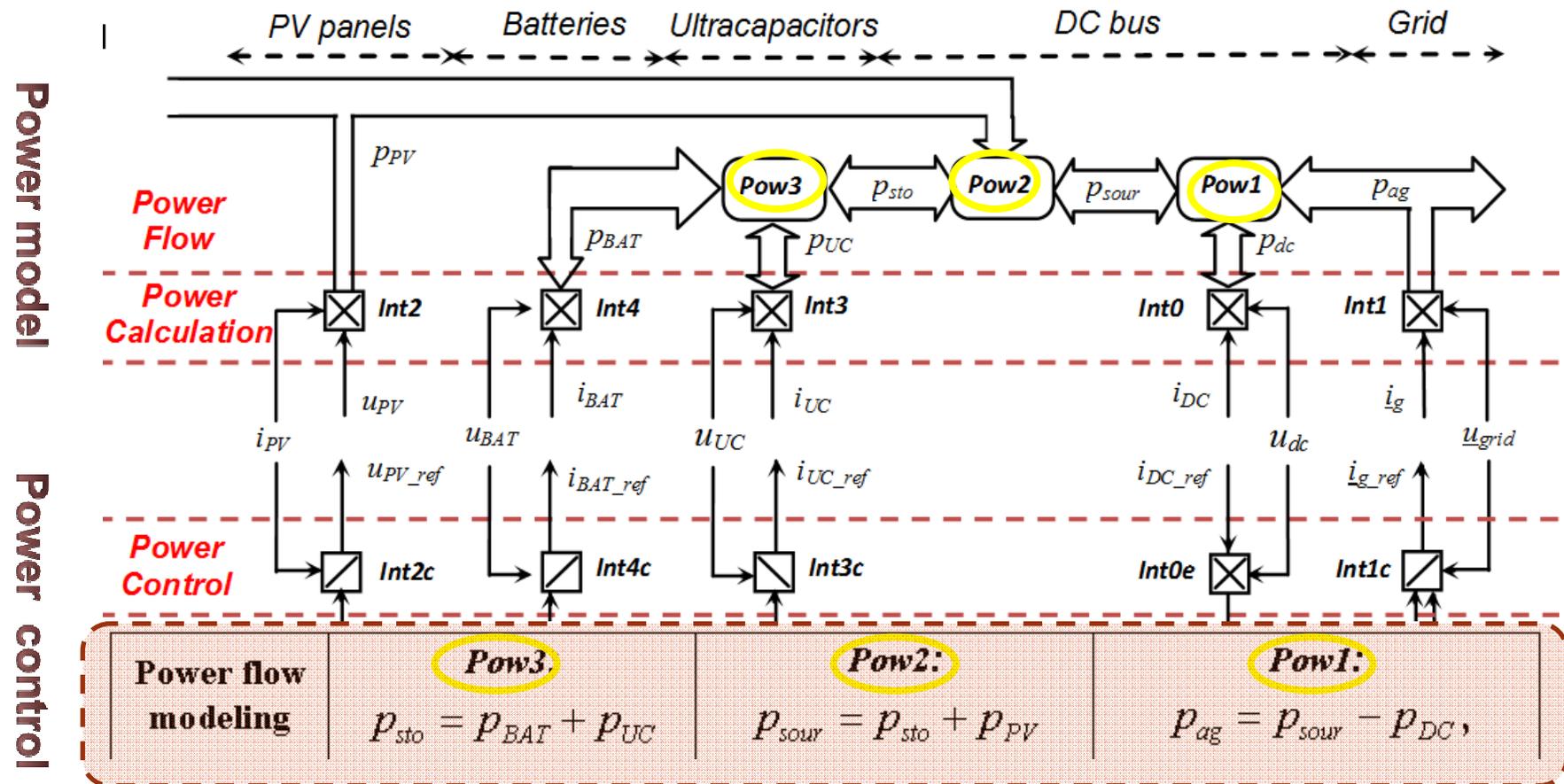
- Analyse du bilan de puissance
- Modélisation Multiniveau
- Coordination et répartition par inversion des flux de puissance

Bilan de puissance (génération de puissance au réseau)

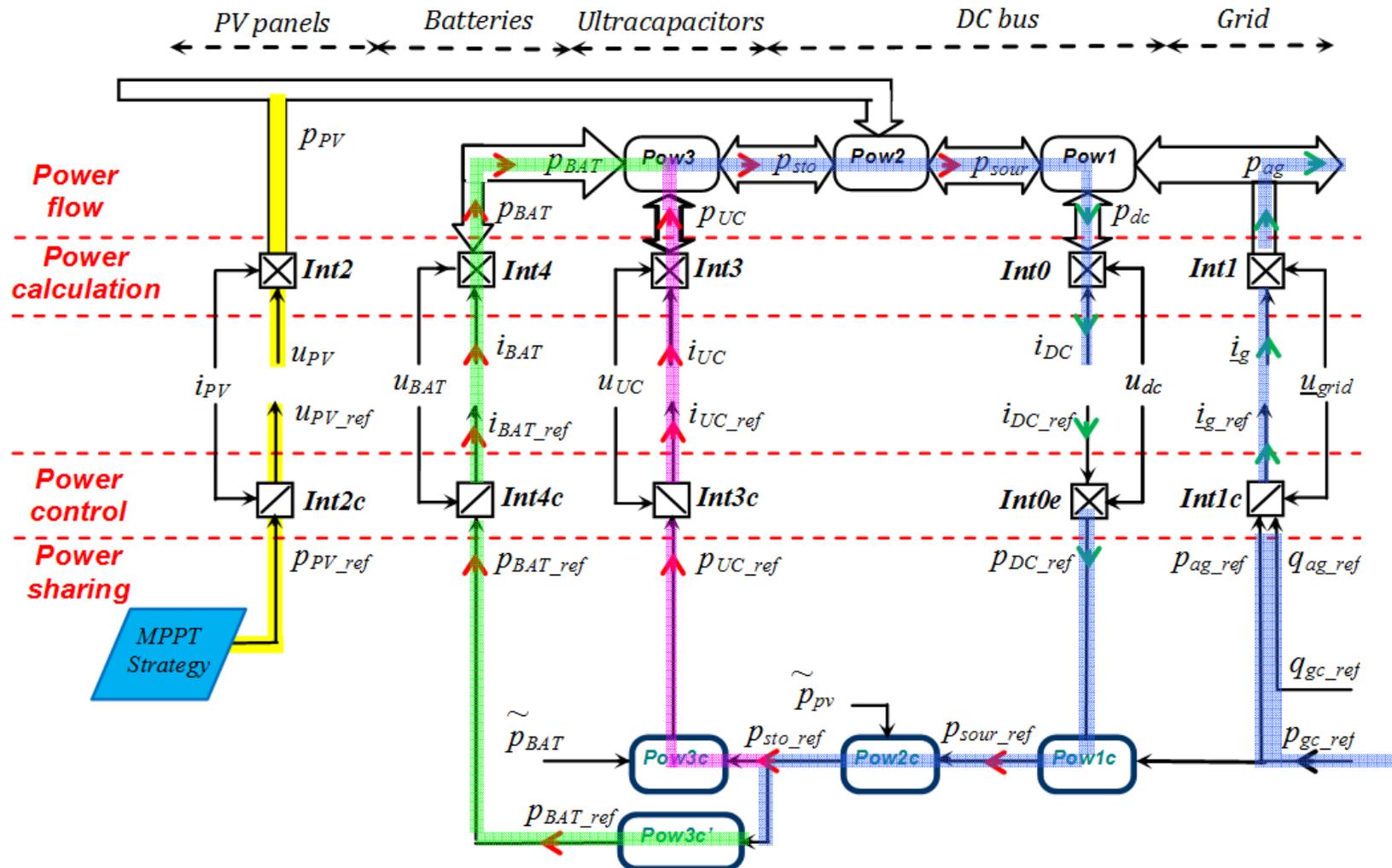


Power flow modeling	<i>Pow3:</i>	<i>Pow2:</i>	<i>Pow1:</i>
	$p_{sto} = p_{BAT} + p_{UC}$	$p_{sour} = p_{sto} + p_{PV}$	$p_{ag} = p_{sour} - p_{DC}$

MODÉLISATION MULTI NIVEAU



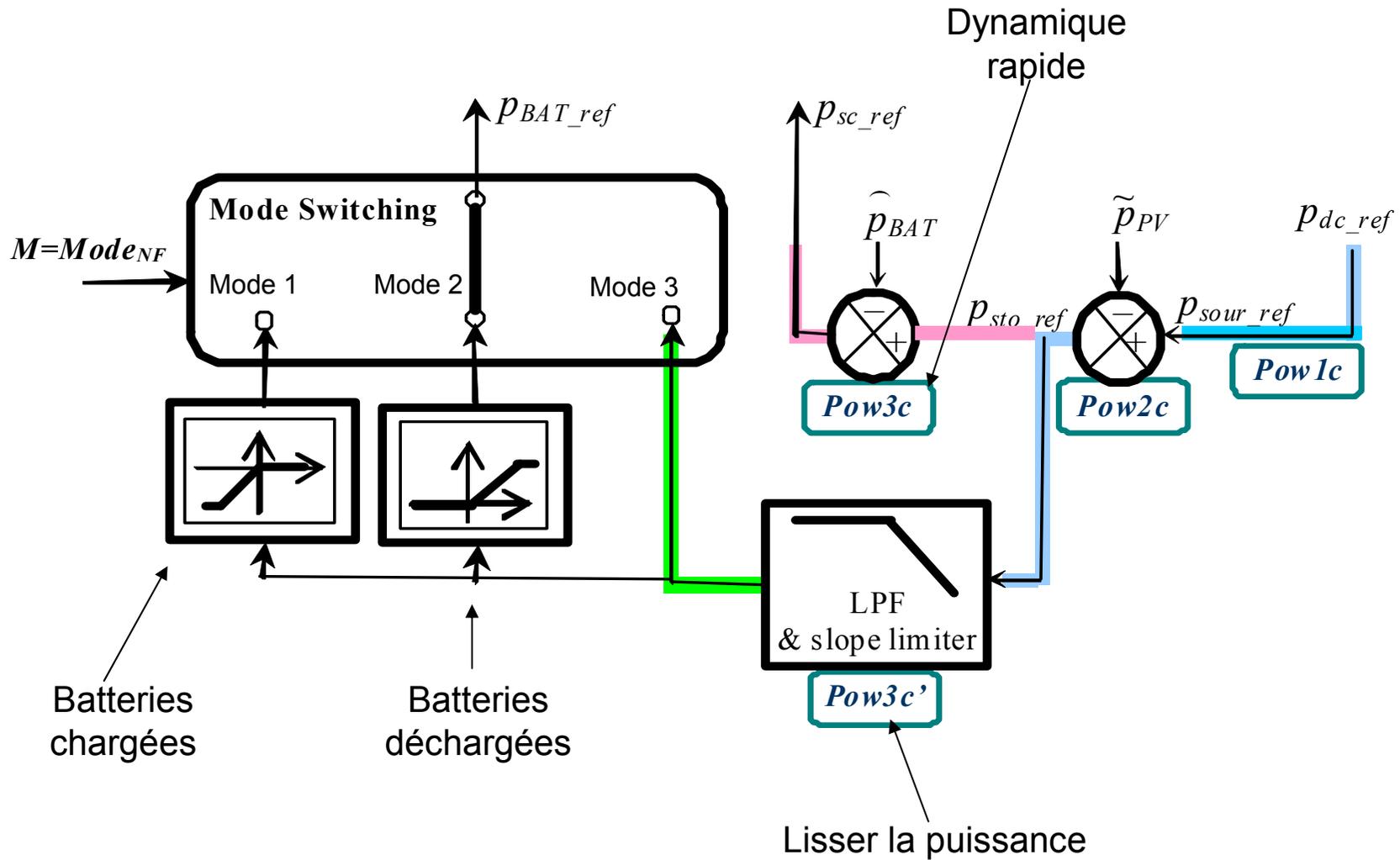
Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Contrôle de puissance



Power flow modeling	Pow3: $p_{sto} = p_{BAT} + p_{UC}$	Pow2: $p_{sour} = p_{sto} + p_{PV}$	Pow1: $p_{ag} = p_{sour} - p_{DC}$
Power dispatching strategy	Pow3c: $p_{BAT_ref} = ?$ Pow3c': $p_{UC_ref} = ?$	Pow2c: $p_{sto_ref} = p_{sour_ref} - \tilde{p}_{pv}$	Pow1c: $p_{sour_ref} = p_{ag_ref} + p_{DC_ref}$

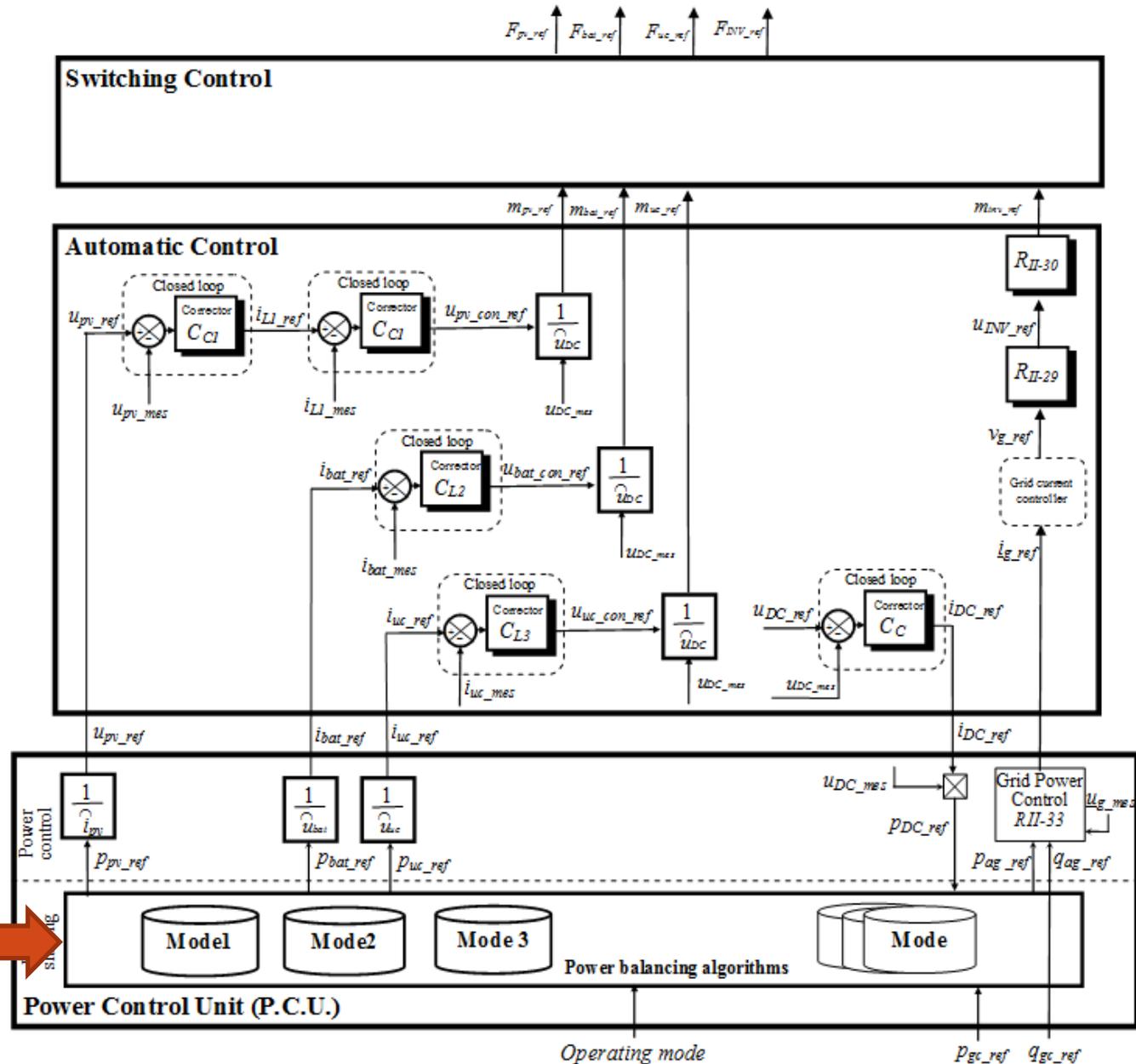
RÉPARTITION DES PUISSANCES

Stratégie « Power dispatching »



Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV

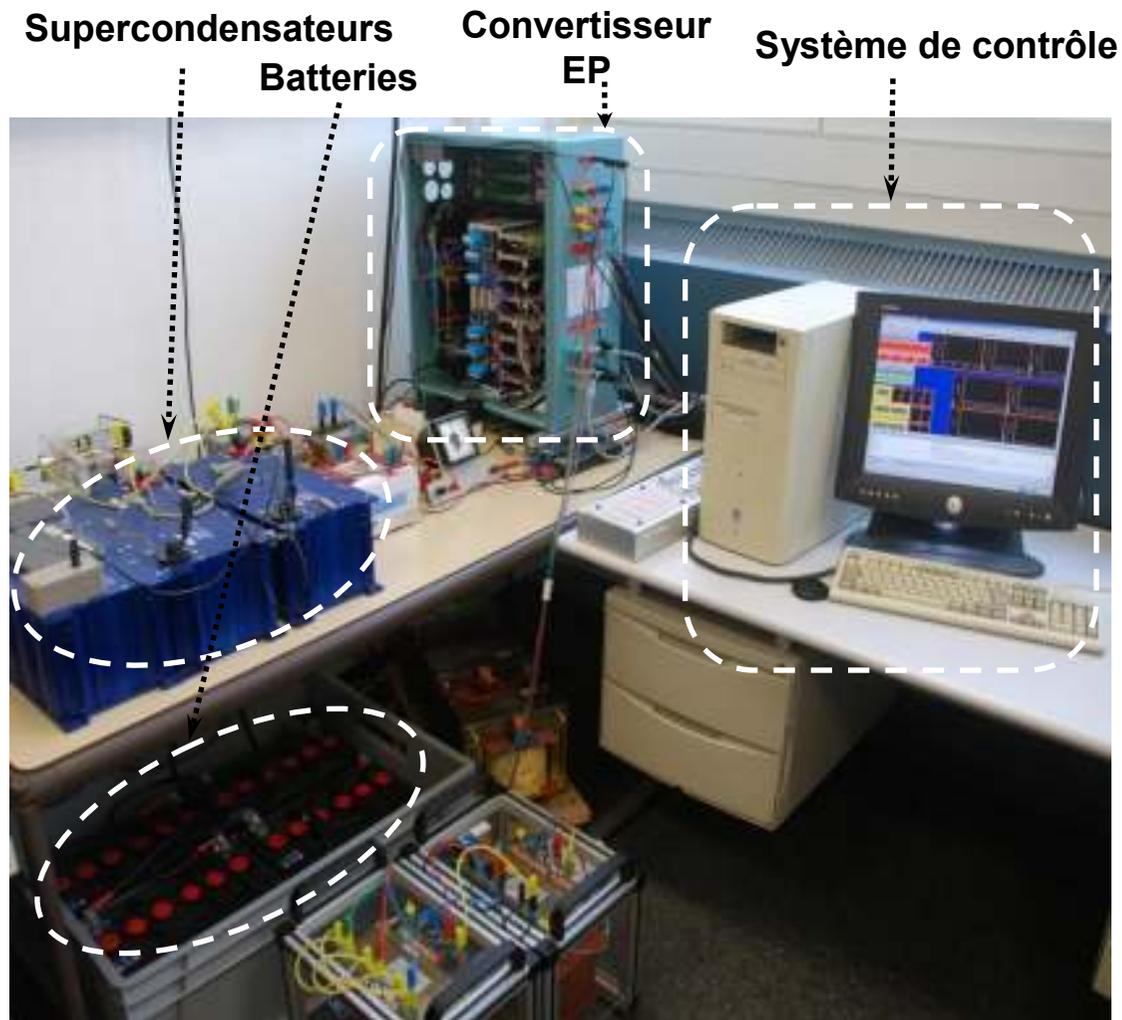
ORGANISATION DU SYSTÈME DE COMMANDE LOCALE



RÉPARTITION
DES PUISSANCES

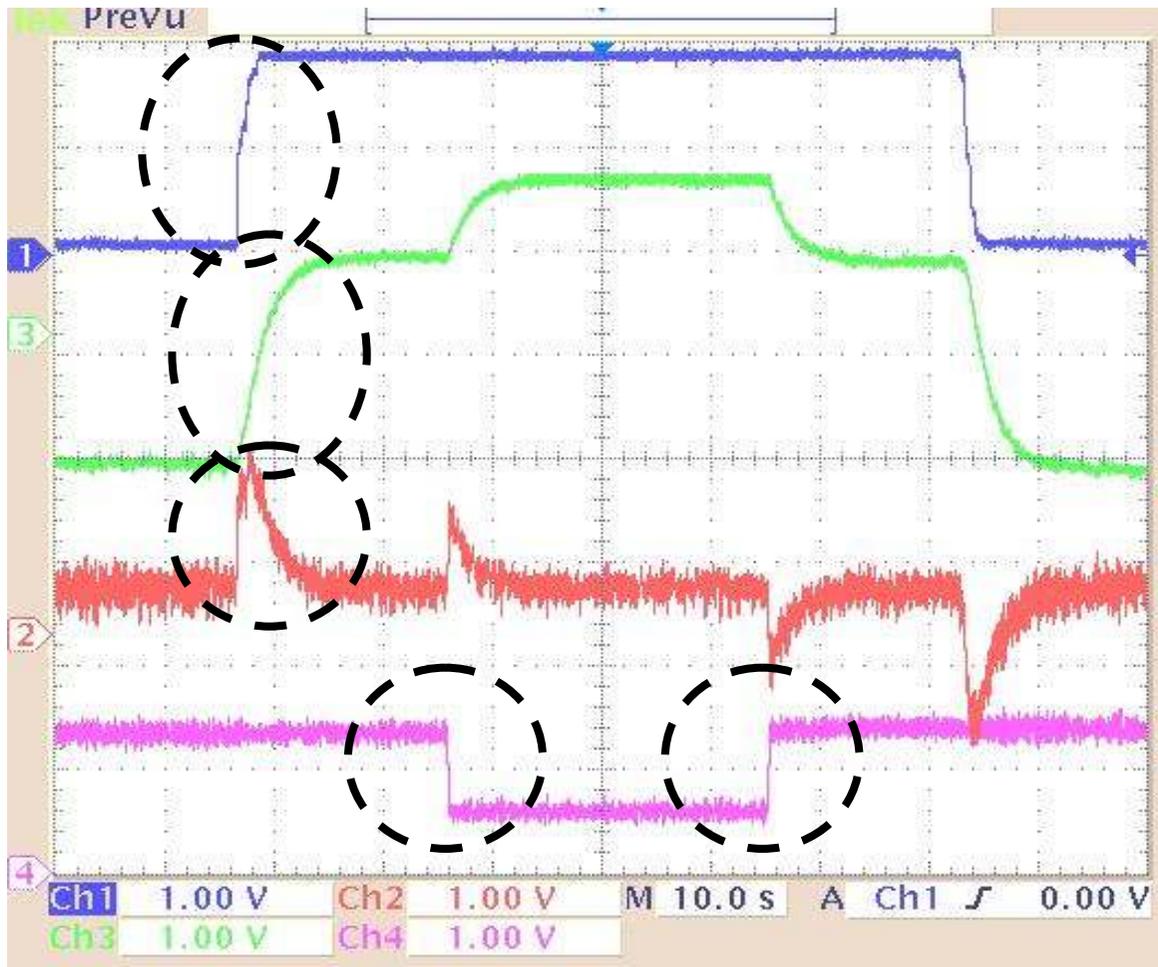
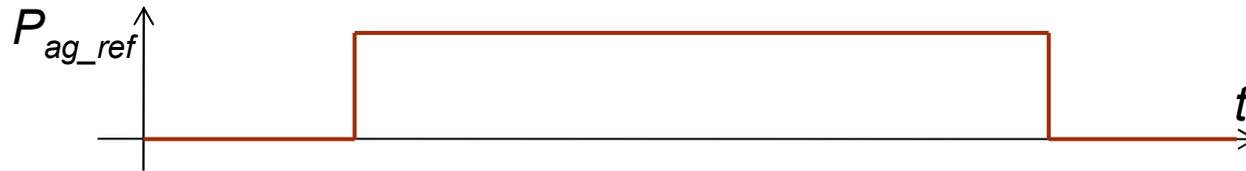


BANC EXPÉRIMENTAL



Partie II: Contrôleur local pour générateur actif PV / Validation du contrôleur local

TEST EXPÉRIMENTAL



Ch1 (200W/div): P_{ag}

Ch2 (200W/div): P_{uc}

Ch3 (200W/div): P_{bat}

Ch4 (200W/div): P_{pv}

P_{ag} : Puissance générée selon la référence de puissance

P_{bat} : Puissance issue des batteries

P_{uc} : Puissance issue des supercondensateurs

P_{pv} : Puissance générée par les panneaux PV



PARTIE III: MICRO RÉSEAU ET RÉSEAU INTELLIGENT

POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

Augmentation des générateurs PV passifs

Affaiblissement de la commandabilité du système électrique

Renforcement du réseau

Coûts

Générateurs PV actifs

Nouvelles flexibilités pour participer à la gestion du réseau
comme tout générateur conventionnel

Comment caractériser cette flexibilité ?

Quelle sera l'organisation du système électrique ?

Comment concevoir la conduite d'un système électrique pour l'exploiter ?

Méthode suivie :

- **Bibliographie** sur les systèmes électriques « modifiés » pour intégrer des générateurs *EnR*, micro réseaux (projets de démonstration)
- **Synthèse** des principes généraux pour la conduite
- Cas d'un générateur PV **actif** résidentiel dans un microréseau **urbain**

MODIFICATION DE LA COMMANDE DES GÉNÉRATEURS

1. Contrôle du bus continu interne

Générateur PV passif	Générateur PV actif	Technologies
		ilotage
Utilisant le réseau « Grid following strategy »	Utilisant le réseau « Grid following strategy »	Pas de possibilité
	Utilisant l'énergie primaire stockée « Power dispatching strategy »	Possibilité

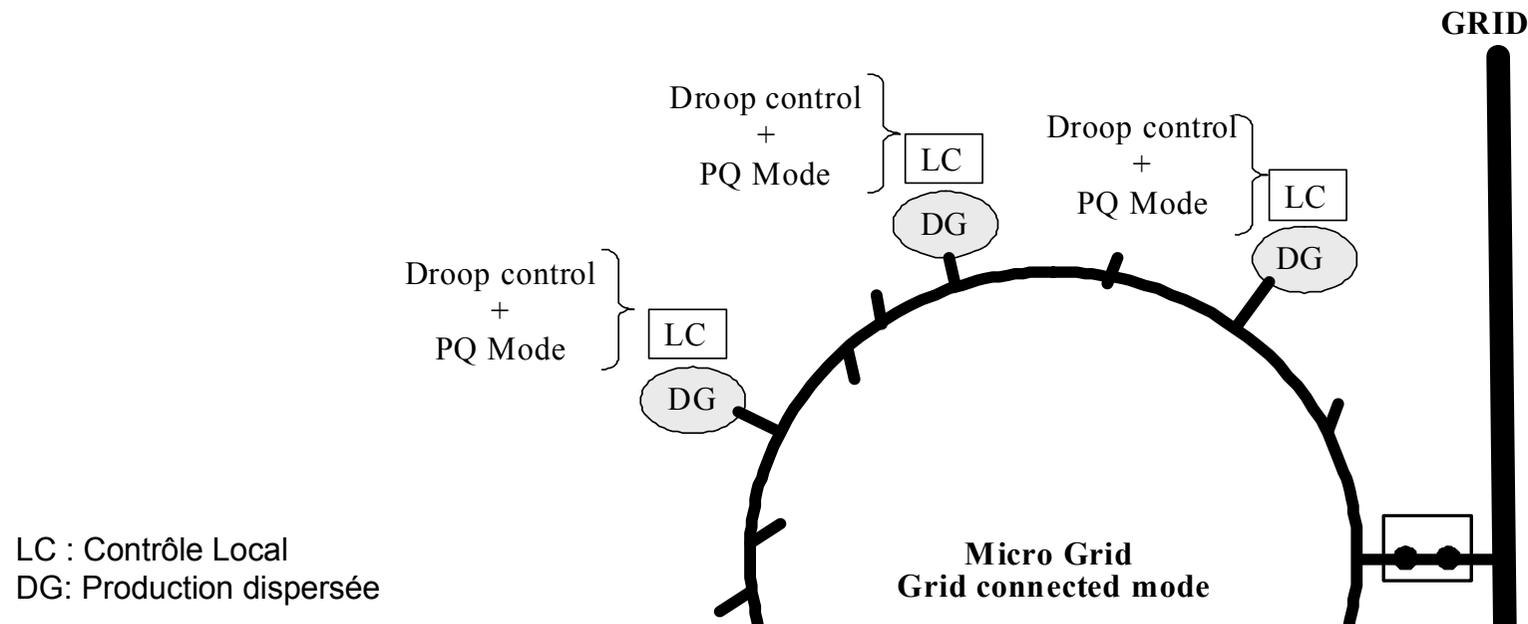
Entrées:
 Puissance active de référence } P,Q mode
 Puissance réactive de référence }

2. Contrôle primaire de la fréquence et de la tension (Droop control) Détaillé dans le cas d'application

INTÉGRATION DANS UN MICRORÉSEAU

Avantages liées à la taille réduite

- 1) Regroupement des producteurs dispersés (DG) et des consommateurs locaux
 - Minimisation des pertes dues au transport de l'électricité
- 2) Possibilité de cogénération d'énergie
 - Augmentation du rendement de la génération des énergies



Exemple d'une organisation "non interactive" d'un micro réseau

Comment gérer un très grand nombre de générateurs dispersés ?

- 3) Facilité d'utilisation d'un réseau de communication
 - Possibilité d'échange d'informations

UTILISATION D'UN RESEAU DE COMMUNICATION

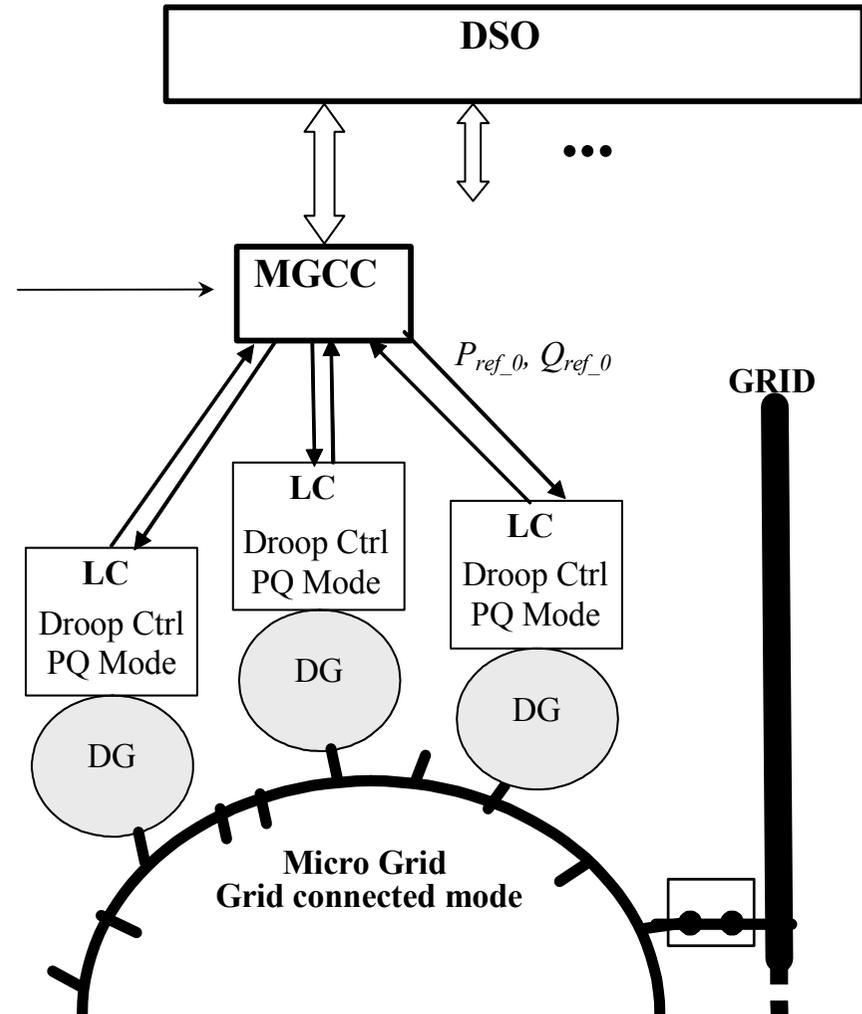
Organisation « Interactive » d'un microréseau

Supervision centrale:

- Réception des informations
- Envoi de consignes

Gestion technico-environnementale:

- Prioriser les EnR
- Renforcer la qualité et la fiabilité



LC : Contrôle Local
DG: Production dispersée

Caractéristiques originales

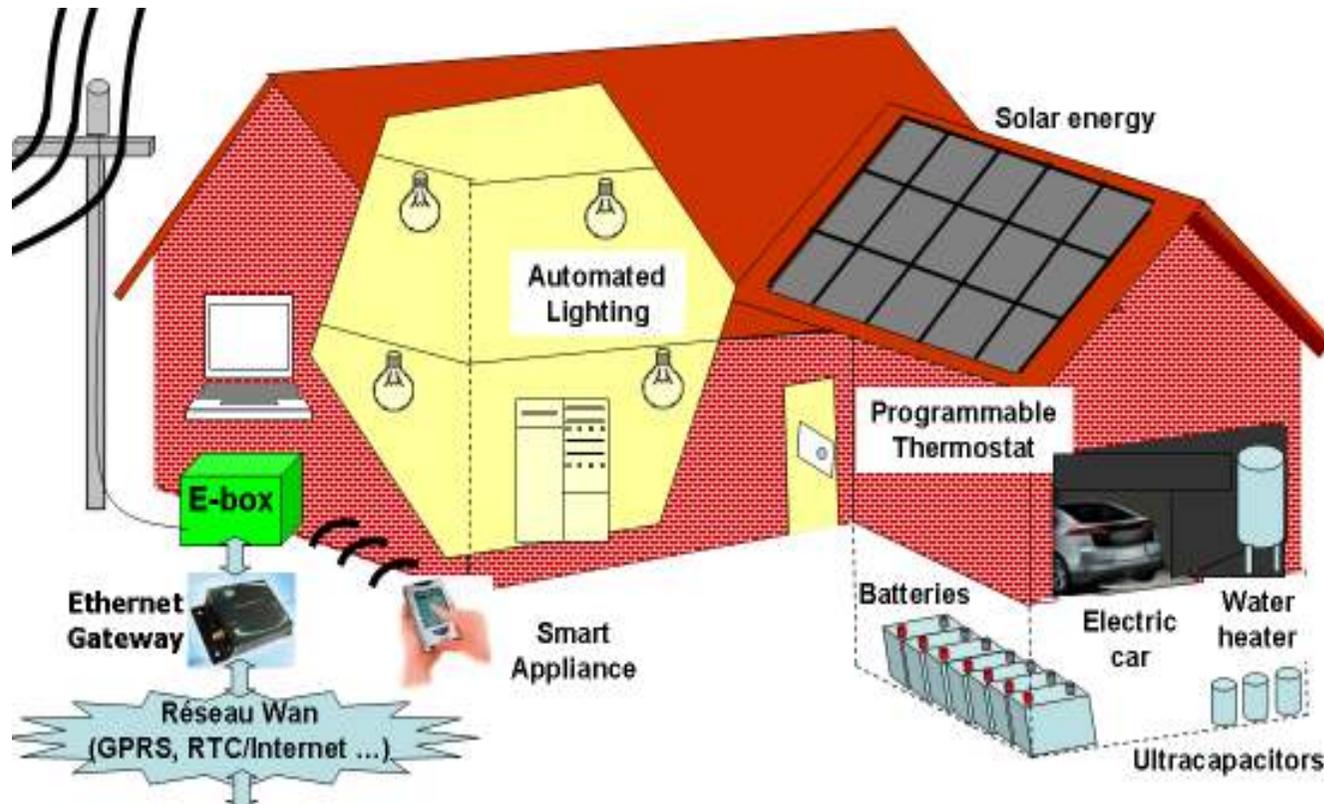
- Fonctionnalités avancées pour la gestion
- Réseau de communication

Réseau intelligent



PARTIE IV: MICRO RÉSEAU INTELLIGENT URBAIN

CONCEPT D'UN «PRODUCTEUR-CONSOMMATEUR» AVEC UN GÉNÉRATEUR ACTIF PV



Composants:

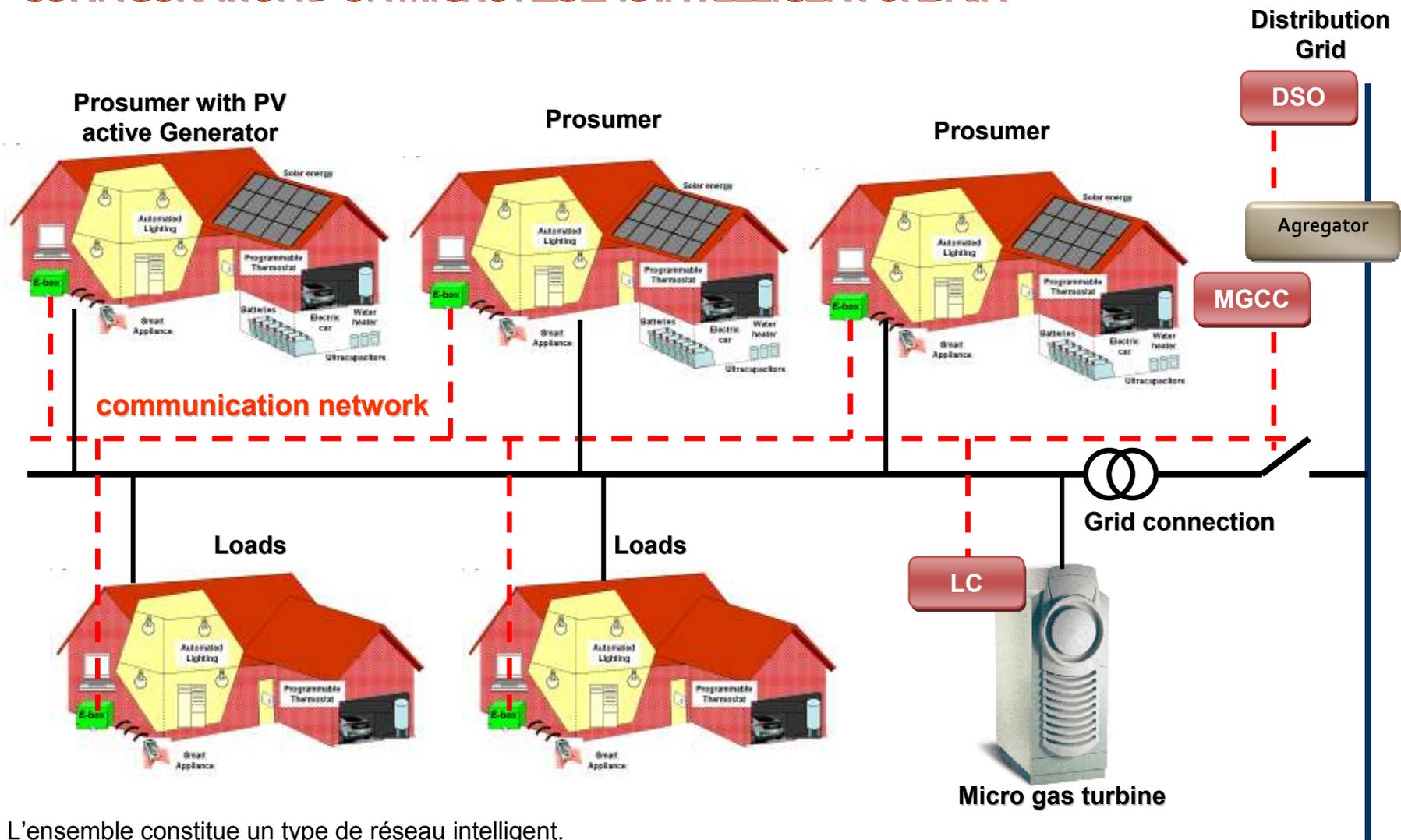
- Générateur actif PV
- Charge électrique contrôlable
- Energy- Box
- Réseau informatique (Ethernet)

Fonctions

- Compteur intelligent d'électricité
- Contrôleur local du générateur actif PV
- Gestion des charges contrôlables
- Interface avec la supervision centrale de MG

Partie IV: Micro réseau intelligent urbain

CONFIGURATION D'UN MICRO RÉSEAU INTELLIGENT URBAIN



L'ensemble constitue un type de réseau intelligent.

Intelligences:

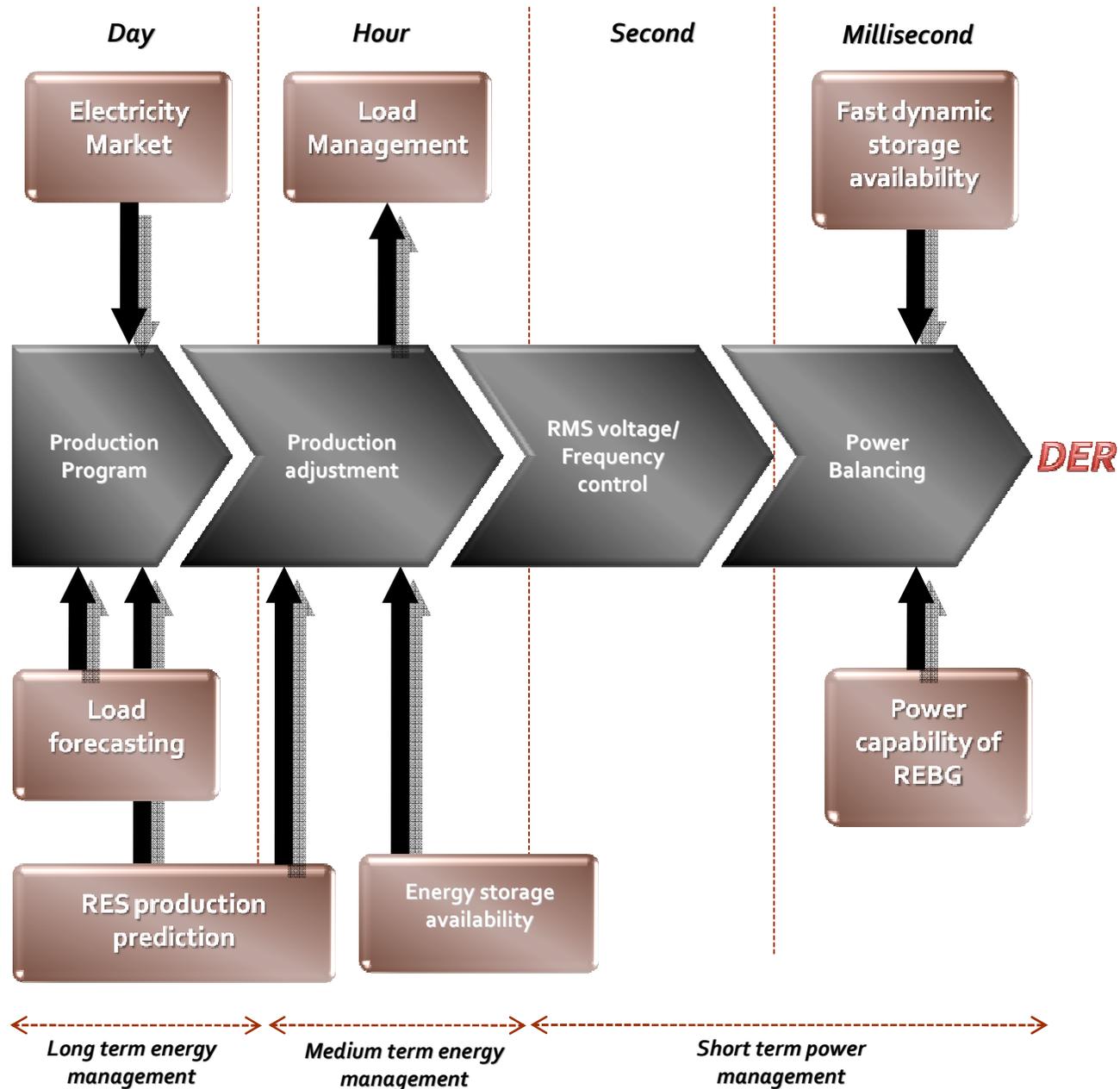
Capacité d'intégration d'énergie renouvelable

Grande efficacité, fiabilité et alimentation d'électricité sans interruption

Maximisation de la production électrique d'énergie renouvelable et minimisation de consommation

Réalisation des interfaces de communication pour l'amélioration des services « système »

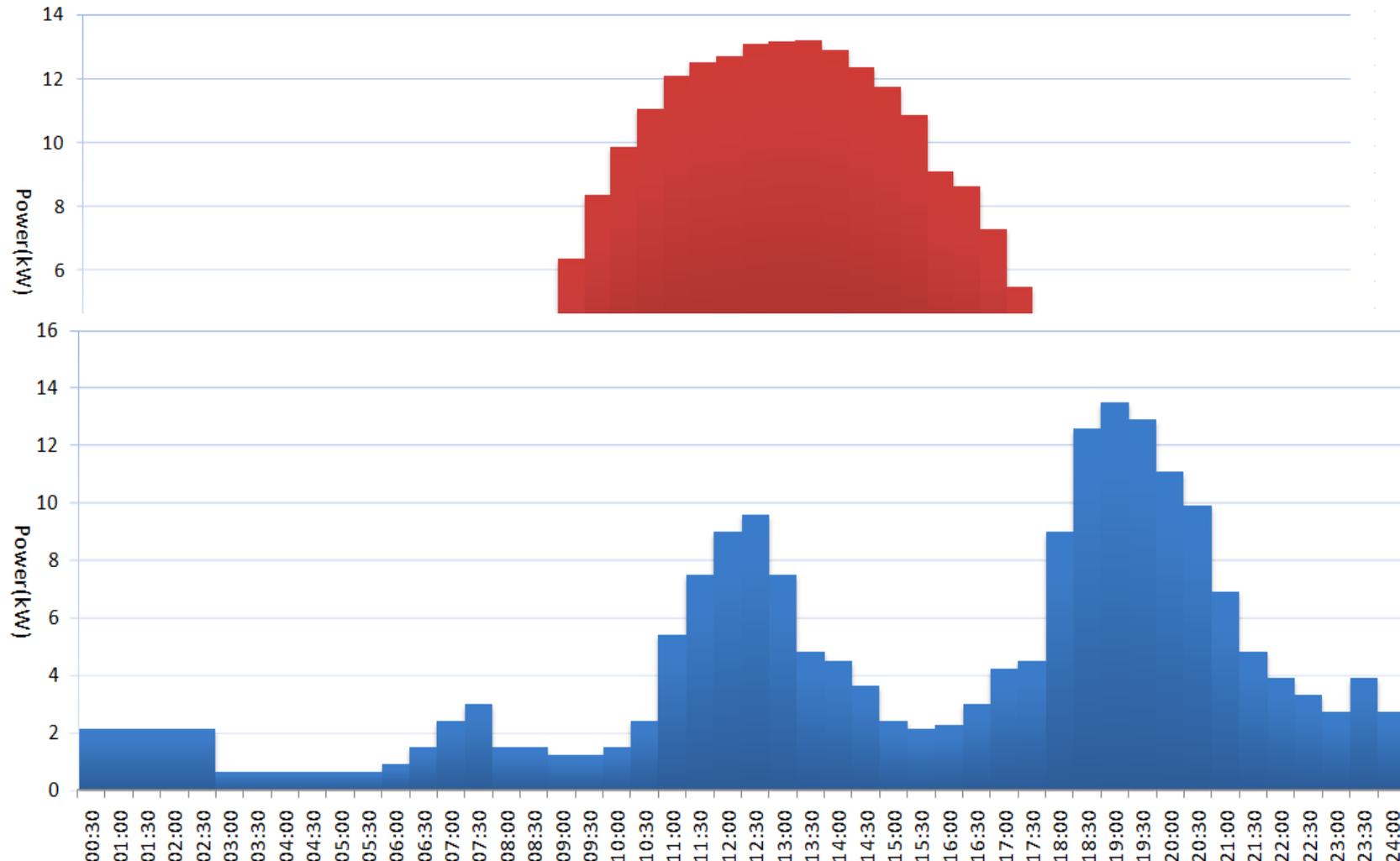
DIFFÉRENTES FONCTIONS DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE



PRÉVISION JOURNALIÈRE

Prédiction de la puissance PV

- Prédiction selon les conditions météo et les données historiques
- Prédiction peu précise
- Tendence générale (saison, habitude...)



PLANIFICATION DÉTERMINISTE SUR 24-HEURE À L'AVANCE

Estimation des énergies journalières mises en jeu

Classification énergétique

À partir de la prévision, l'énergie renouvelable disponible et la consommation d'énergie totale sur 24 heures peuvent être calculées:

$$\text{Energie renouvelable: } E_{PV_p} = \int_0^{24h} p_{pv_p}(t) dt$$

$$\text{Energie consommée: } E_{mg_p} = \int_0^{24h} p_{mg_p}(t) dt$$

Analyse

- Si $E_{PV_p} > E_{mg_p}$, l'énergie PV en surplus est stockée dans les batteries ou limitée.
- Si $E_{PV_p} < E_{mg_p}$, l'énergie supplémentaire est compensée par la micro turbine.

Détermination des puissances de référence

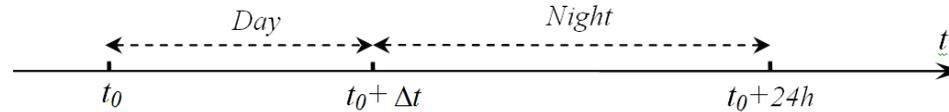
- Prises en comptes des contraintes
- Contraintes liées aux puissances nominales
- Contraintes énergétiques

Partie IV: Micro réseau intelligent urbain / Supervision énergétique

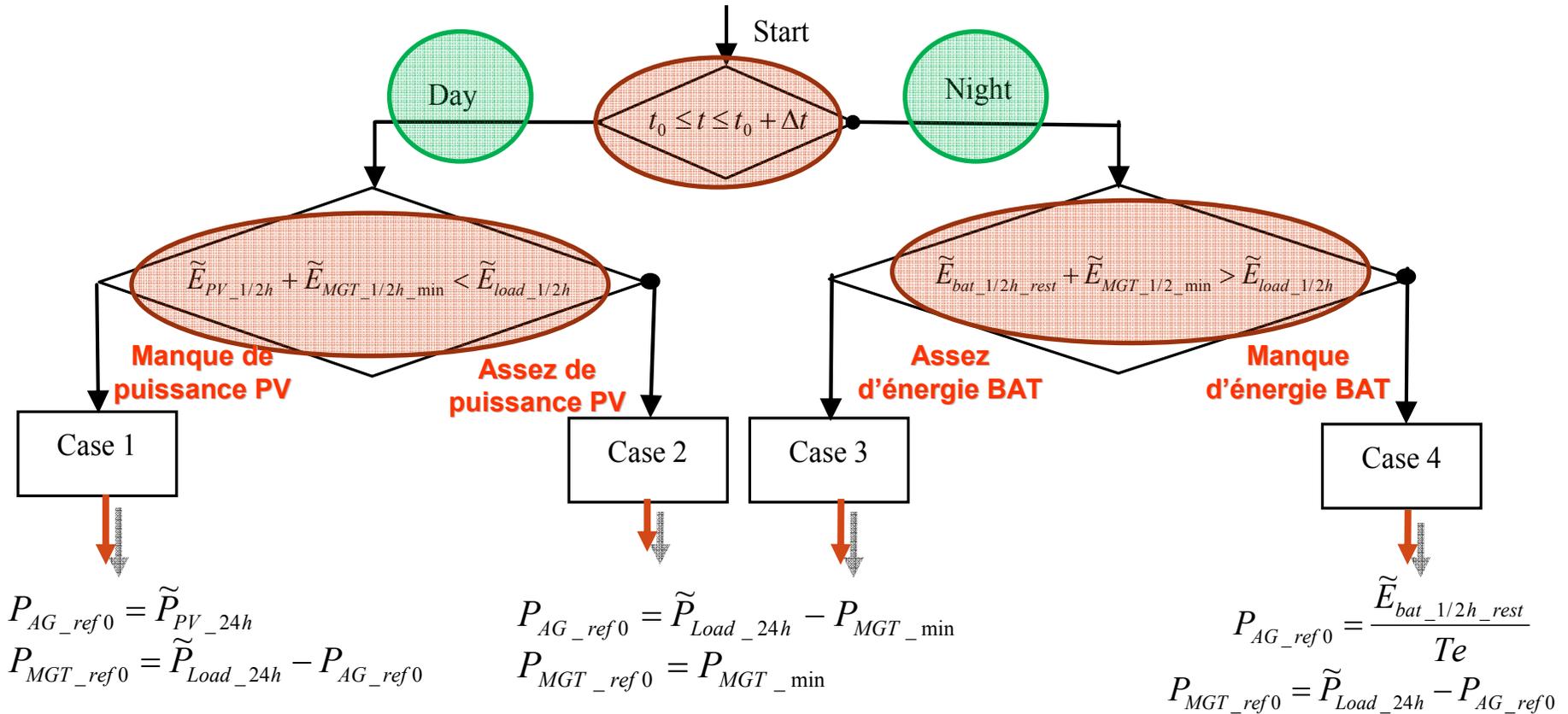
PROCESSUS DE LA PLANIFICATION 24H À L'AVANCE

➔ Long terme (24h à l'avance)
 Moyen terme (chaque 1/2h)
 Court terme (temps réel)

Détermination des temps t_0 et Δt



Construction des références planifiée par pas demi horaire



SUPERVISION ÉNERGÉTIQUE À MOYEN TERME

→ **Supervision centrale**

Long terme (24h à l'avance)
→ Moyen terme (chaque 1/2h)
Court terme (temps réel)

*** Réglage des références de puissance chaque demi-heure**

- Correction de la prédiction de puissance PV et de la charge (à moyen terme)
- Disponibilité des batteries (en énergie et en puissance)

$$P_{AG_ref1} = P_{AG_ref0} + \Delta P_{AG1_1/2h}$$

↓
Planifiée 24h à l'avance

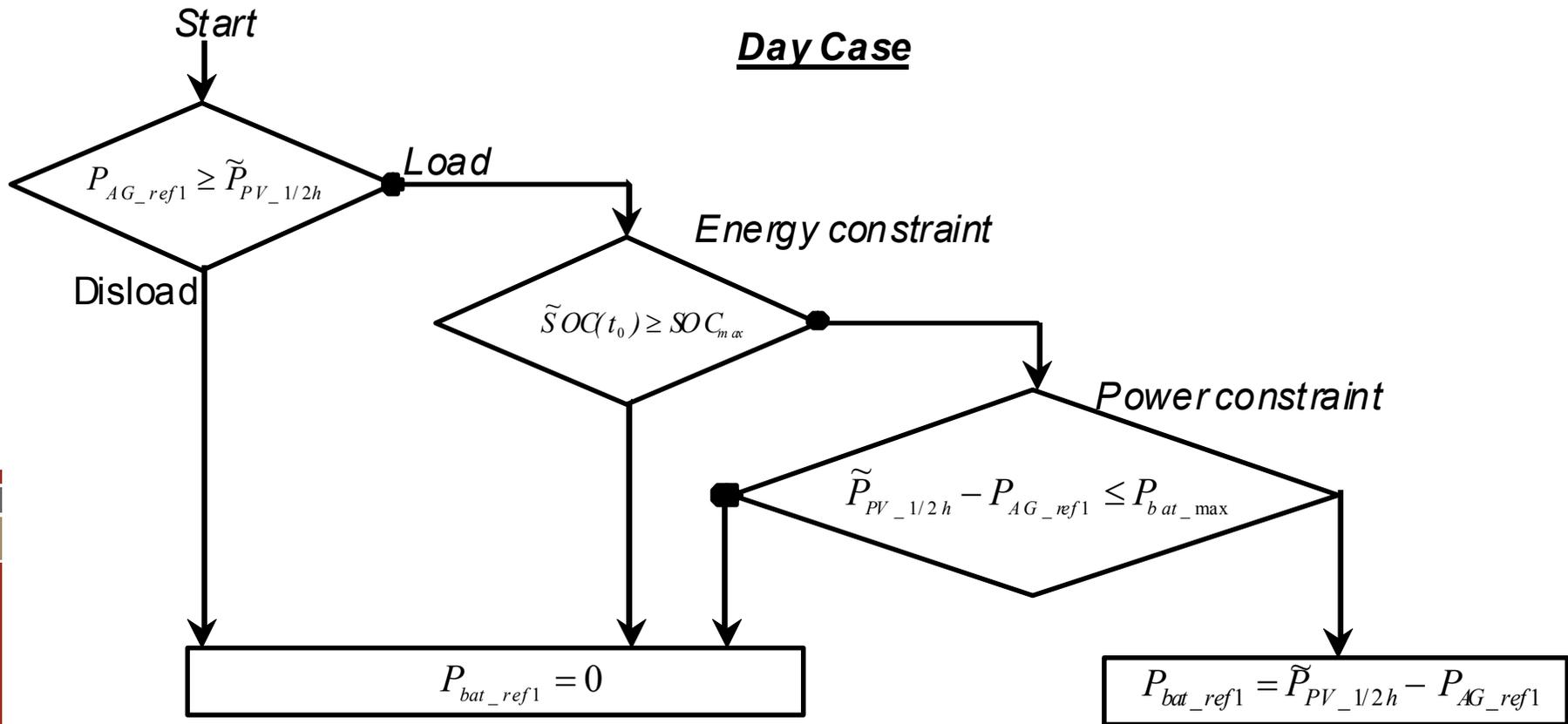
↘ correction
 $\Delta P_{AG1_1/2h} = \Delta P_{PV_1/2h} + \Delta P_{Load_1/2h}$
Mise à jour pour la prochaine 1/2h

SUPERVISION ÉNERGÉTIQUE À MOYEN TERME

→ **Contrôleur local**

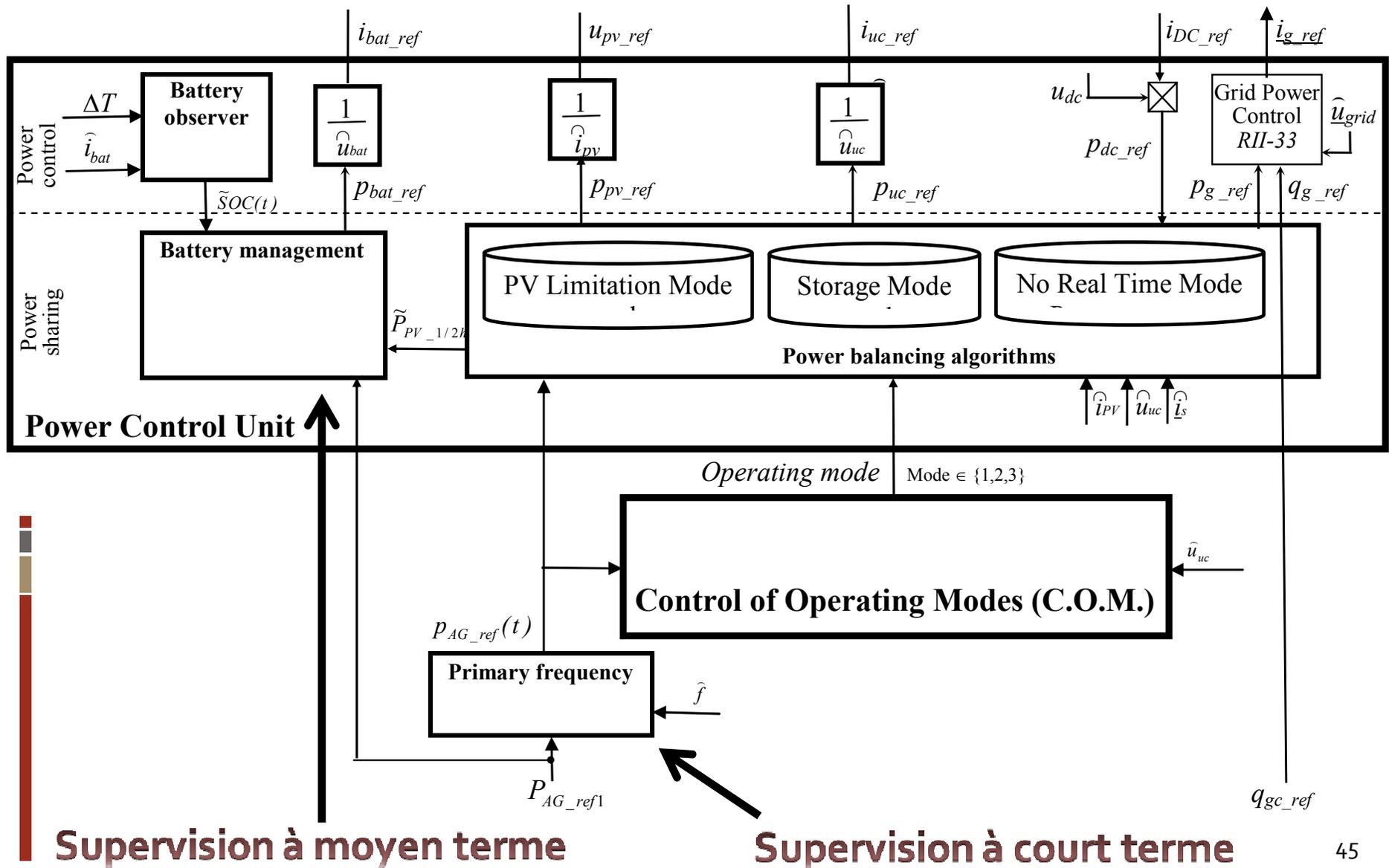
Long terme (24h à l'avance)
 → Moyen terme (chaque 1/2h)
 Court terme (temps réel)

* Détermination de la puissance de référence pour les batteries



**PRISE EN COMPTE DE LA GESTION
DU MICRO RÉSEAU URBAIN
DANS LE CONTRÔLEUR LOCAL DU GÉNÉRATEUR ACTIF**

Long terme (24h à l'avance)
 → Moyen terme (chaque 1/2h)
 → Court terme (temps réel)



SUPERVISION ÉNERGÉTIQUE À COURT TERME

Long terme (24h à l'avance)
Moyen terme (chaque 1/2h)
→ Court terme (temps réel)

Objectif:

Réalisation de l'équilibrage de puissance en temps réel dans le micro réseau

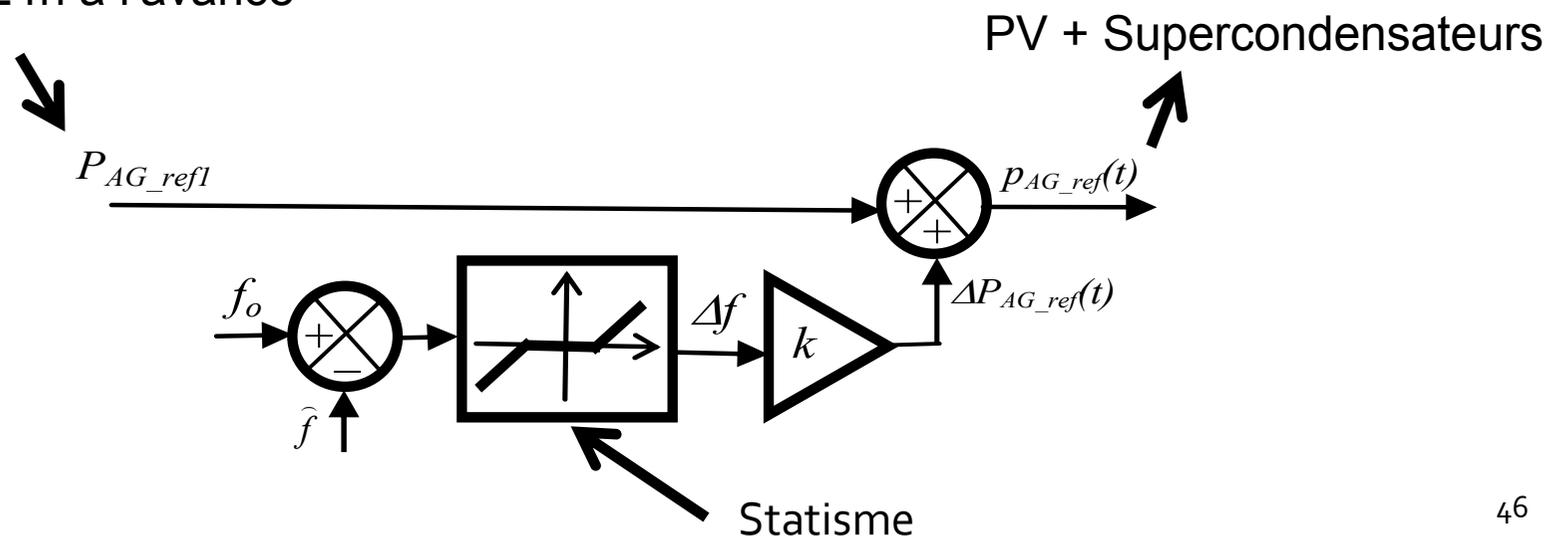
Fonctionnement:

La participation de chaque générateur est fixée par une droite de statisme.

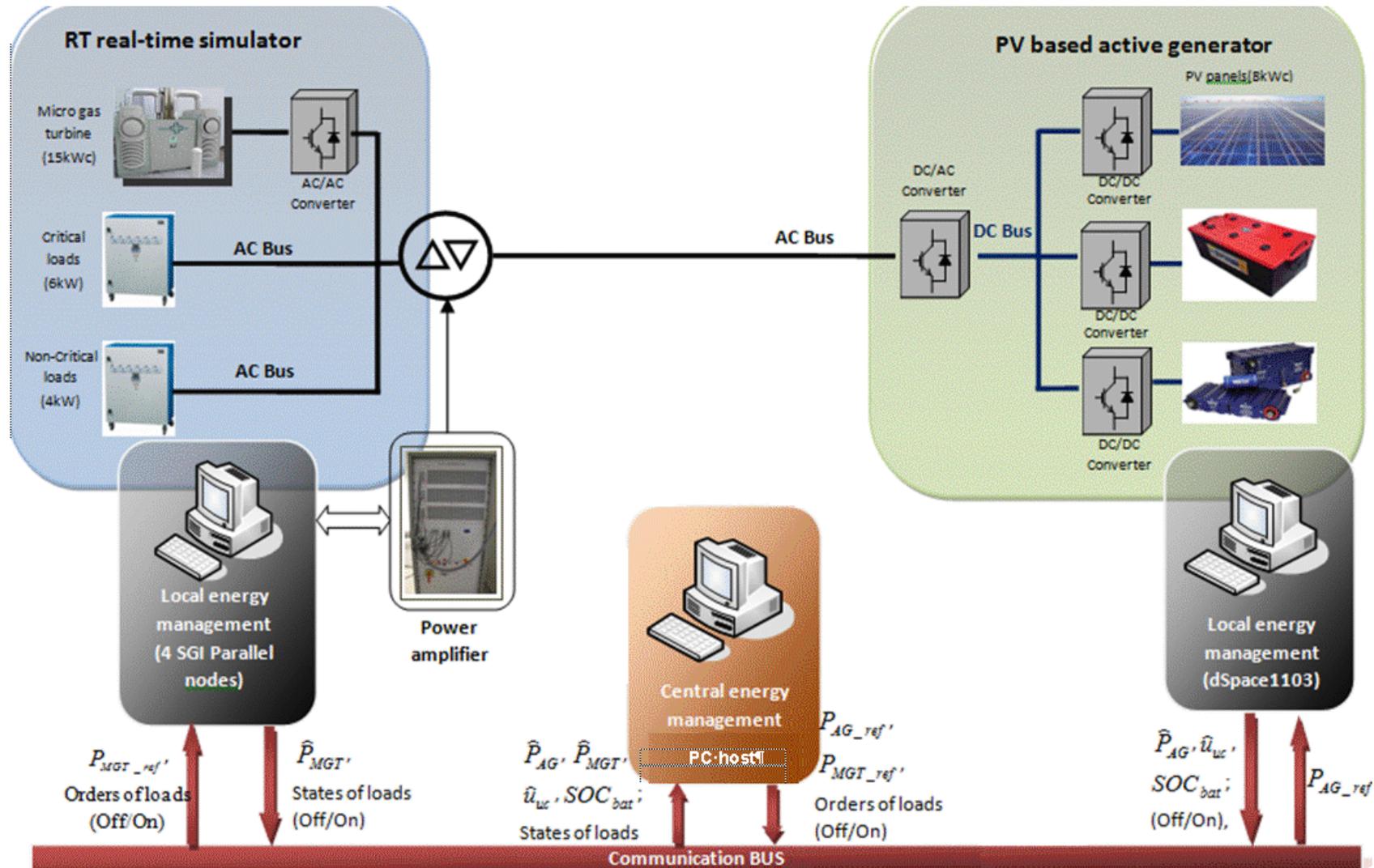
Supervision locale:

Réglage primaire de fréquence avec un statisme

Planifiée 24h à l'avance



CONFIGURATION DE TEST HIL (HARDWARE IN THE LOOP)

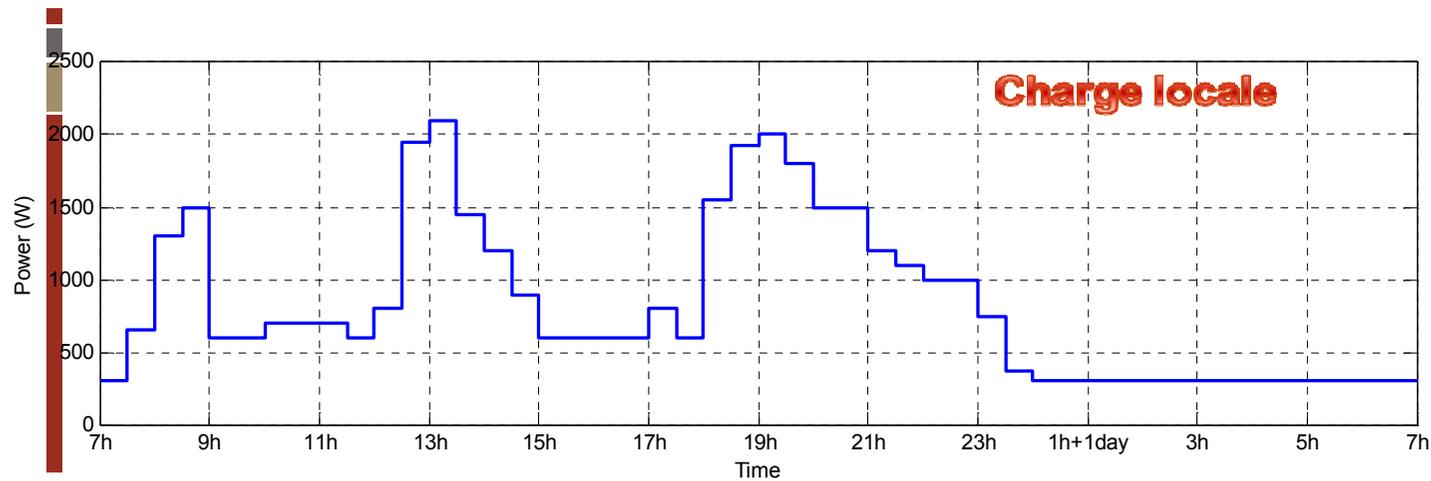
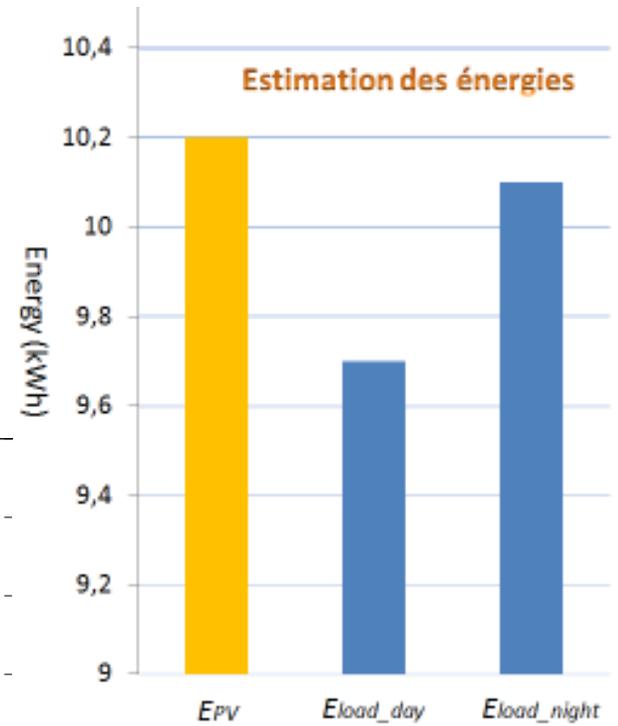
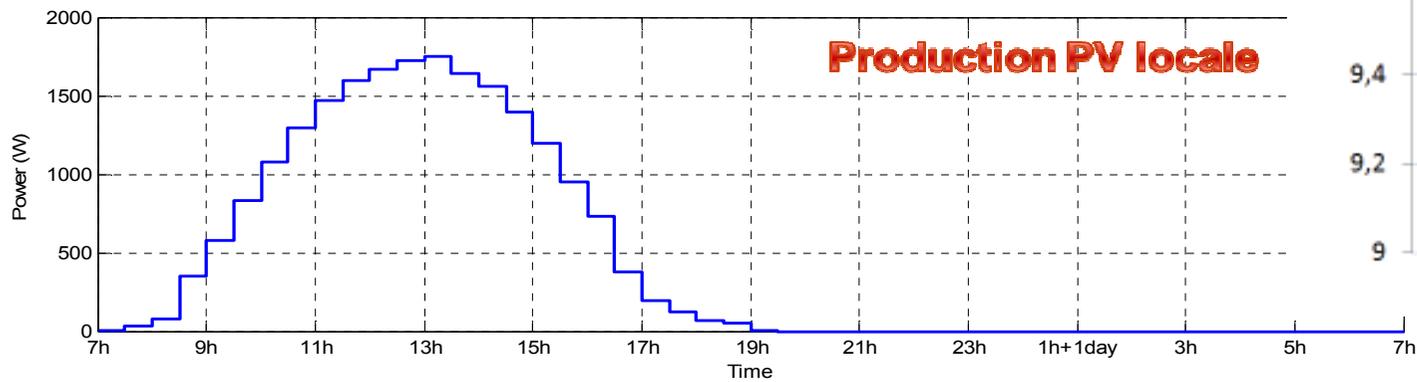


Plateforme « Energie Répartie »

Partie IV: Micro réseau intelligent urbain / Test expérimental

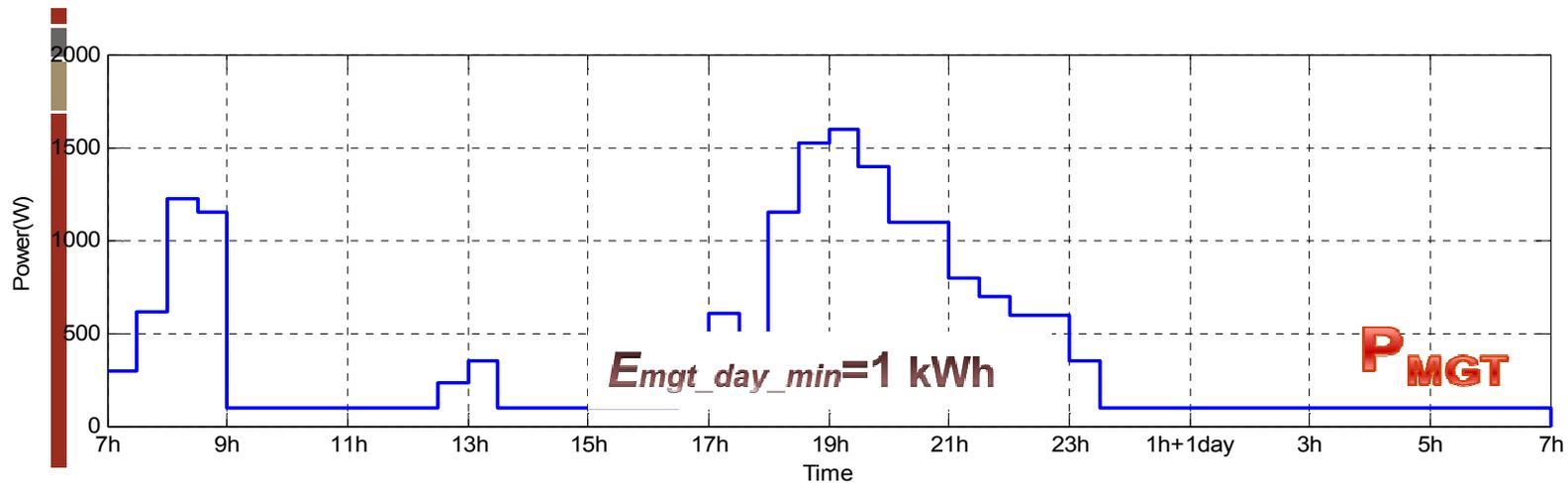
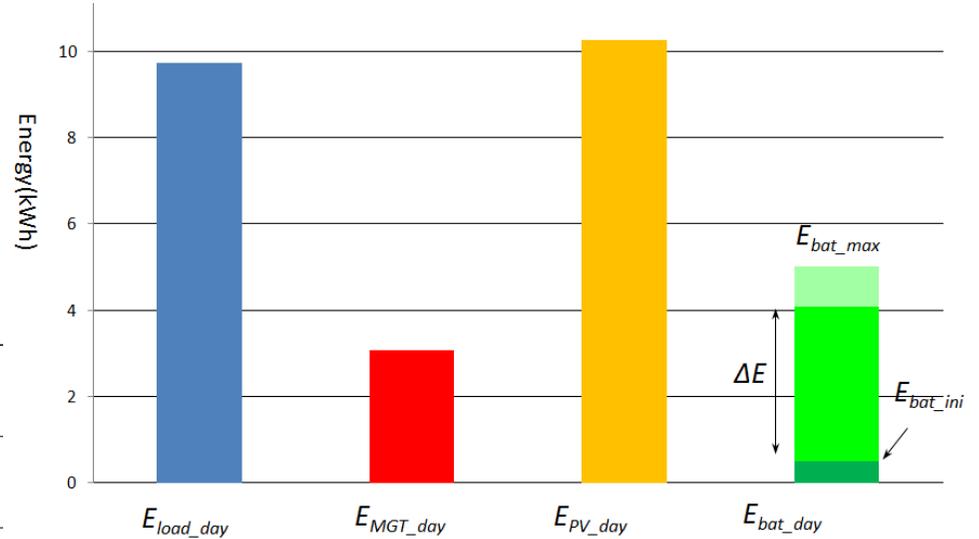
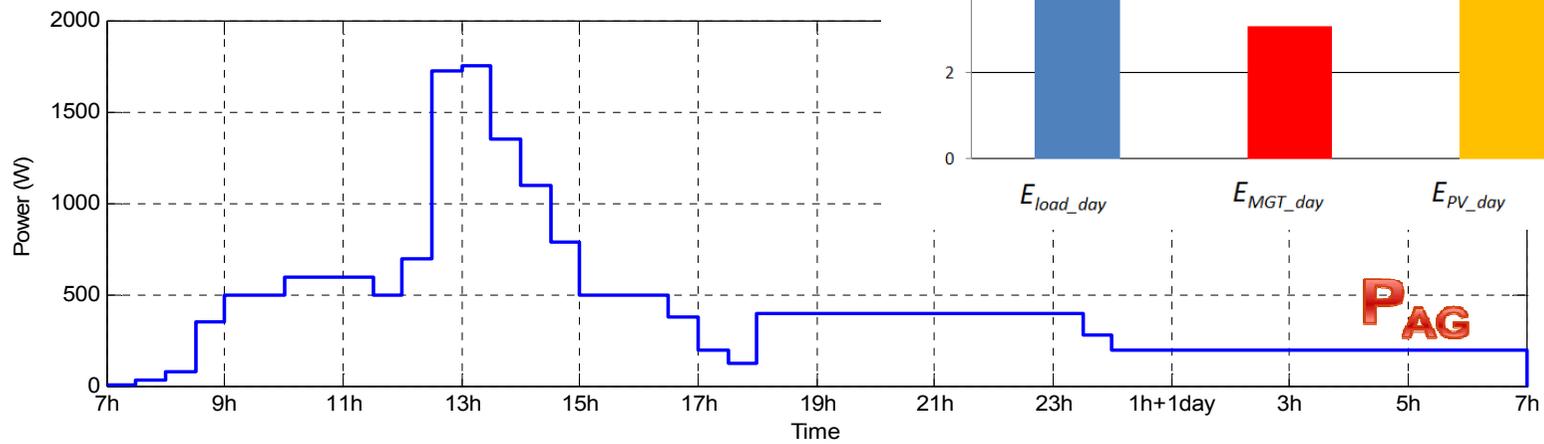
PRÉDICTION DE PUISSANCE PV ET DE LA CHARGE

Un producteur-consommateur

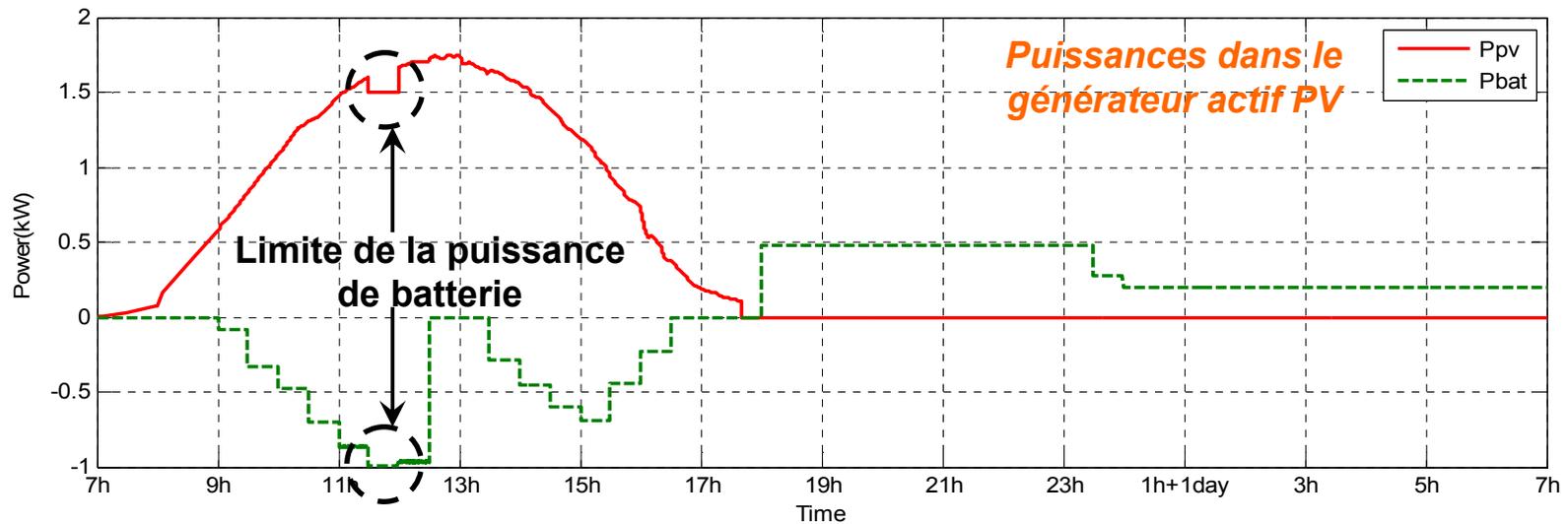
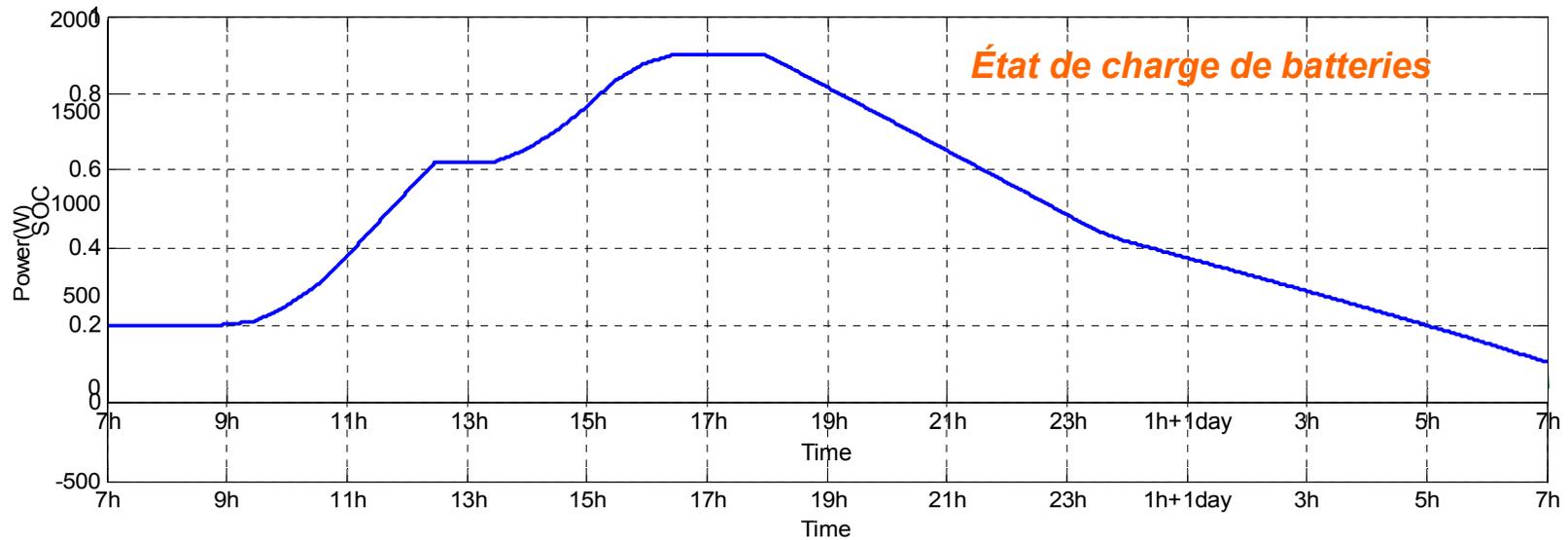


Partie IV: Micro réseau intelligent urbain / Test expérimental

PLANIFICATION SUR 24H OBTENUE PAR NOTRE STRATÉGIE

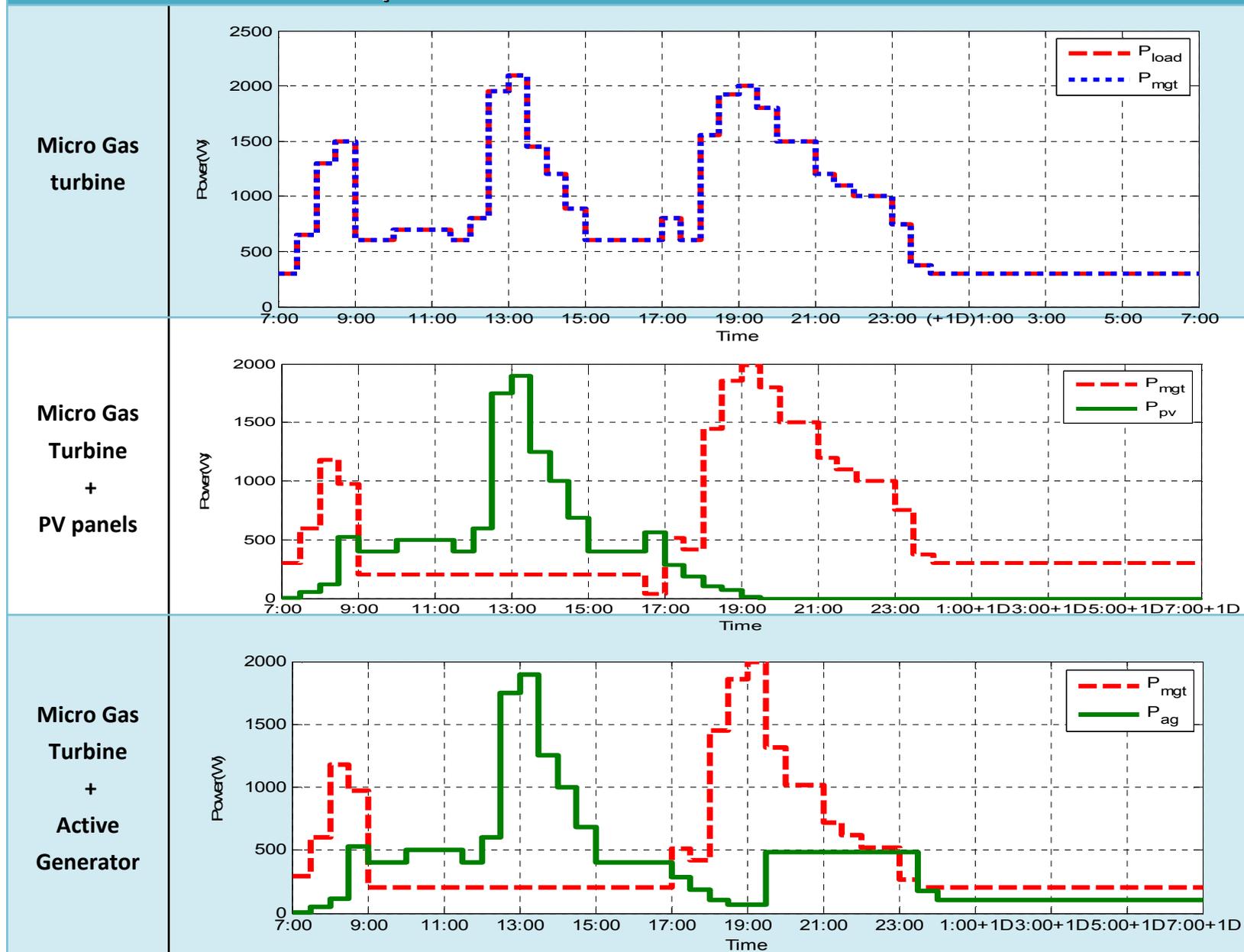


RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES PUISSANCES AUSEIN DU GÉNÉRATEUR ACTIF



Partie IV: Micro réseau intelligent urbain / Comparatif de simulation

Comparatif des résultats de simulation



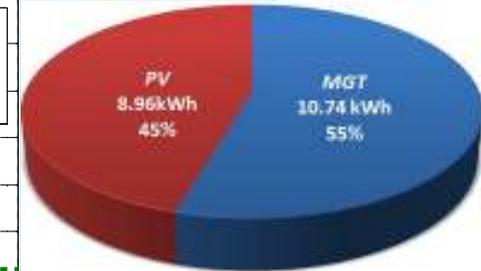
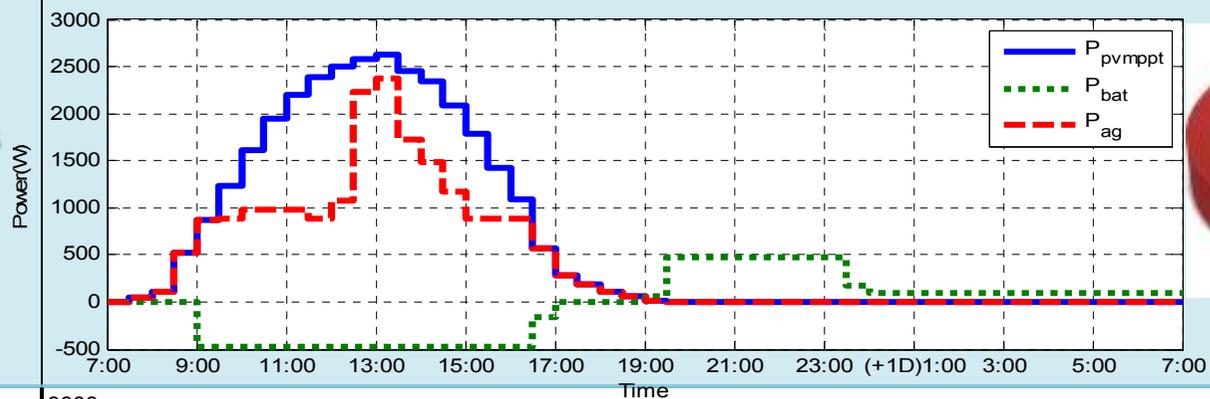
	$E_{load}(kWh)$	$E_{mgt}(kWh)$	$E_{pv}(kWh)$
Micro gas turbine	19.7	19.7	0
Micro gas turbine + PV Panels	19.7	13.37	6.50
Micro gas turbine + Active generator	19.7	10.74	10.11

Partie IV: Micro réseau intelligent urbain / Comparatif de simulation

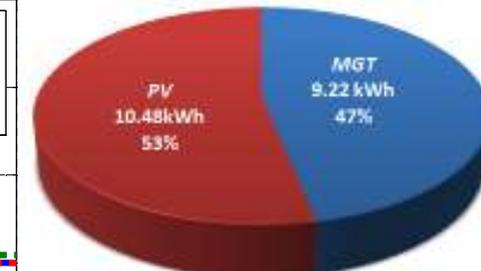
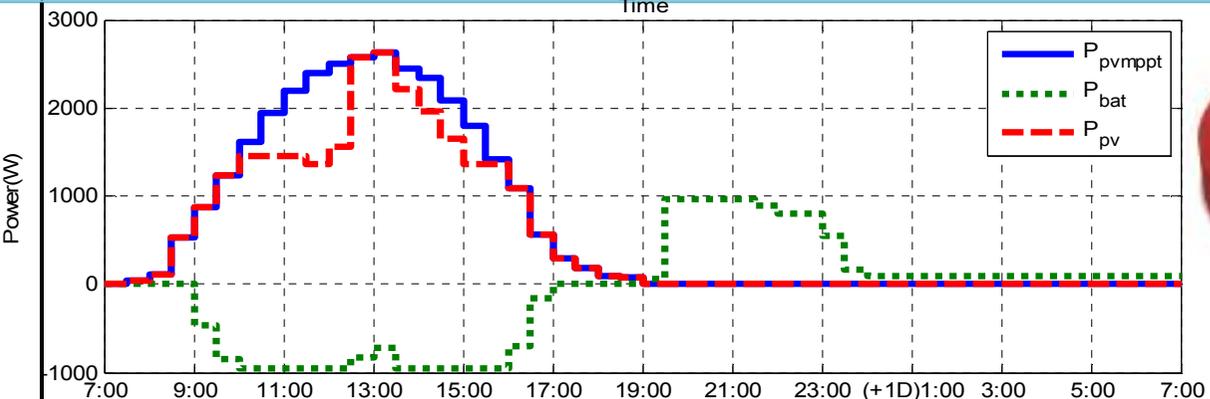
Comparatif des résultats de simulation

BATTERIES

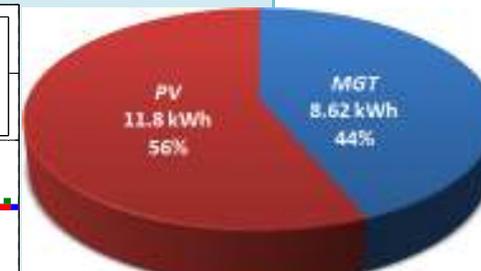
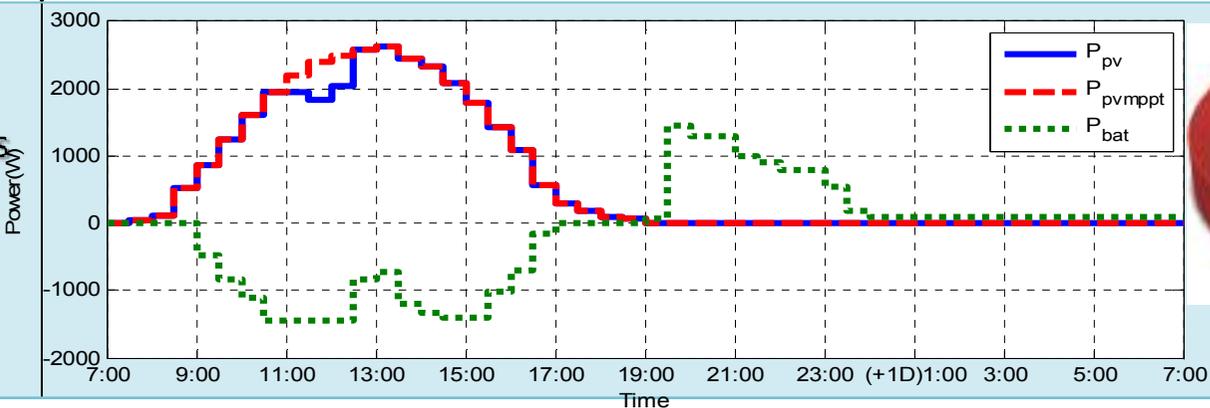
4cells



8cells



12cells



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Générateur actif PV

- Des panneaux PV → Source primaire à base d'énergie renouvelable
- Supercondensateurs → stockage à dynamique rapide (pour équilibrer en temps réels les flux de puissance)
- Batteries à plomb acide → Stockage sur le long terme (pour garantir une disponibilité énergétique)

Contributions pour la production PV

- Développement de la commande d'un générateur actif PV
- Stratégies de la gestion des puissances pour la coordination des trois sources
- Proposition et validation d'une stratégie pour améliorer la charge et la décharge des batteries
- Validation sur un prototype

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Contributions pour l'organisation et la gestion du système électrique

- Transfert des concepts issus des microréseaux à la conception d'une gestion centralisée pour une agrégateur
- Proposition d'une supervision énergétique d'un micro réseau urbain avec les différentes fonctions à différente échelle de temps
- Intégration du générateur actif PV dans le plateforme du micro réseau; implémentation et validation de la supervision énergétique dans le contrôleur central du micro réseau

Perspectives

Optimisation (Evaluation technico-économique)

- Avec le dimensionnement optimisé du système
- Avec la prise en compte de l'impact environnemental
- Permettant la comparaison des différentes solutions.

MERCI

QUESTIONS?

