



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE



Maîtrise et contrôle de l'approvisionnement en électricité au moyen de dispositifs de stockage électrochimique

Fabrizio Sossan, Emil Namor, Rachid Cherkaoui, Mario Paolone

Laboratoire des systèmes électriques distribués (DESL)

Sommaire

- Contexte de l'étude
- Design du système: feeder dispatchable
- Détermination du plan de soutirage (dispatch plan)
- Suivi du dispatch plan en temps réel
- EPFL – Infrastructure expérimentale
- Résultats
- Conclusions

Contexte de l'étude

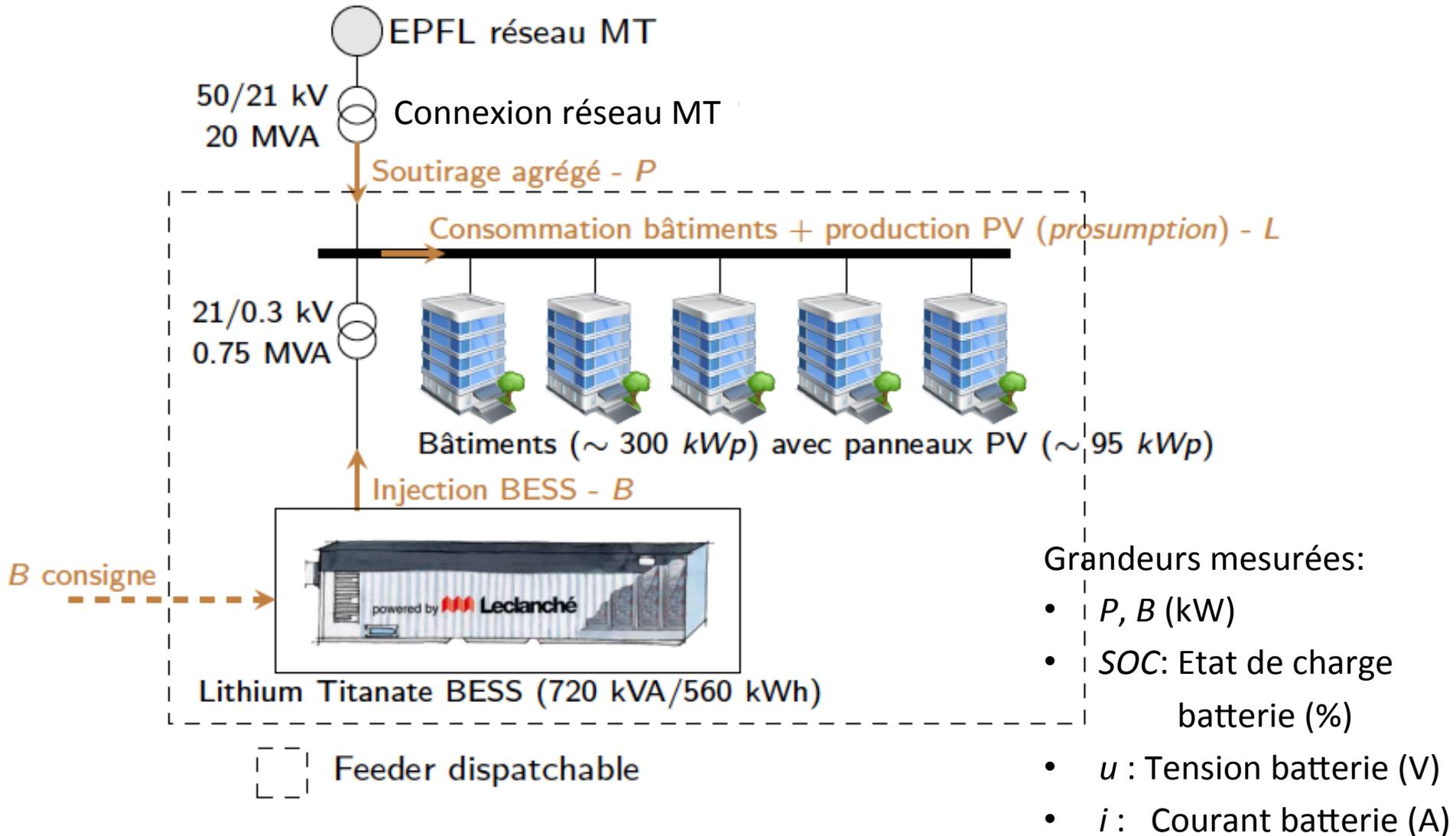
Canton VD – DIREN: programme de soutien pour Recherche & Développement

- 100 millions de francs pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique -

Projet de recherche EPFL – Leclanché – Romande Energie:

- Système Pilote de Stockage d'Énergie de 500 kWh pour le Contrôle des Réseaux Electriques de Distribution avec Génération Distribuée -

Design du système: feeder dispatchable



Objectifs

- Définir à l'avance un *plan de soutirage* \hat{P} (*dispatch plan*) pour les prochaines 24h (jour d'après) en fonction de la *prévision de la production/consommation* \hat{L} (*prosumption*) des bâtiments et de la *disponibilité de la batterie* (injection B)
- En exploitation en temps réel (jour d'après), observer aussi scrupuleusement que possible le *plan de soutirage* prédéfini \hat{P} en contrôlant l'injection B de la batterie
- Tenir compte de la nature stochastique de la production/consommation et des limites physiques (état de charge, courant/tension, etc.) de la batterie – maximiser la flexibilité de la batterie
- Application à différents cas: écrêtage du soutirage, nivellement du soutirage, réduction de coûts du soutirage, etc.
- **Motivation:** réduction des besoins en matière de réserve de puissance

Détermination du plan de soutirage (dispatch plan)

Le plan de soutirage \hat{P} est un profil temporel de puissance défini le jour d'avant pour les 24 heures du jour suivant selon une résolution de 5mn. Il est déterminé comme suit:

$$\hat{P}_t = \hat{L}_t + F_t \quad t= 1, \dots, N \quad (N=288)$$

\hat{L}_t : prévision de la consommation/production (prosumption) pour les prochaines 24 heures selon une méthode probabiliste

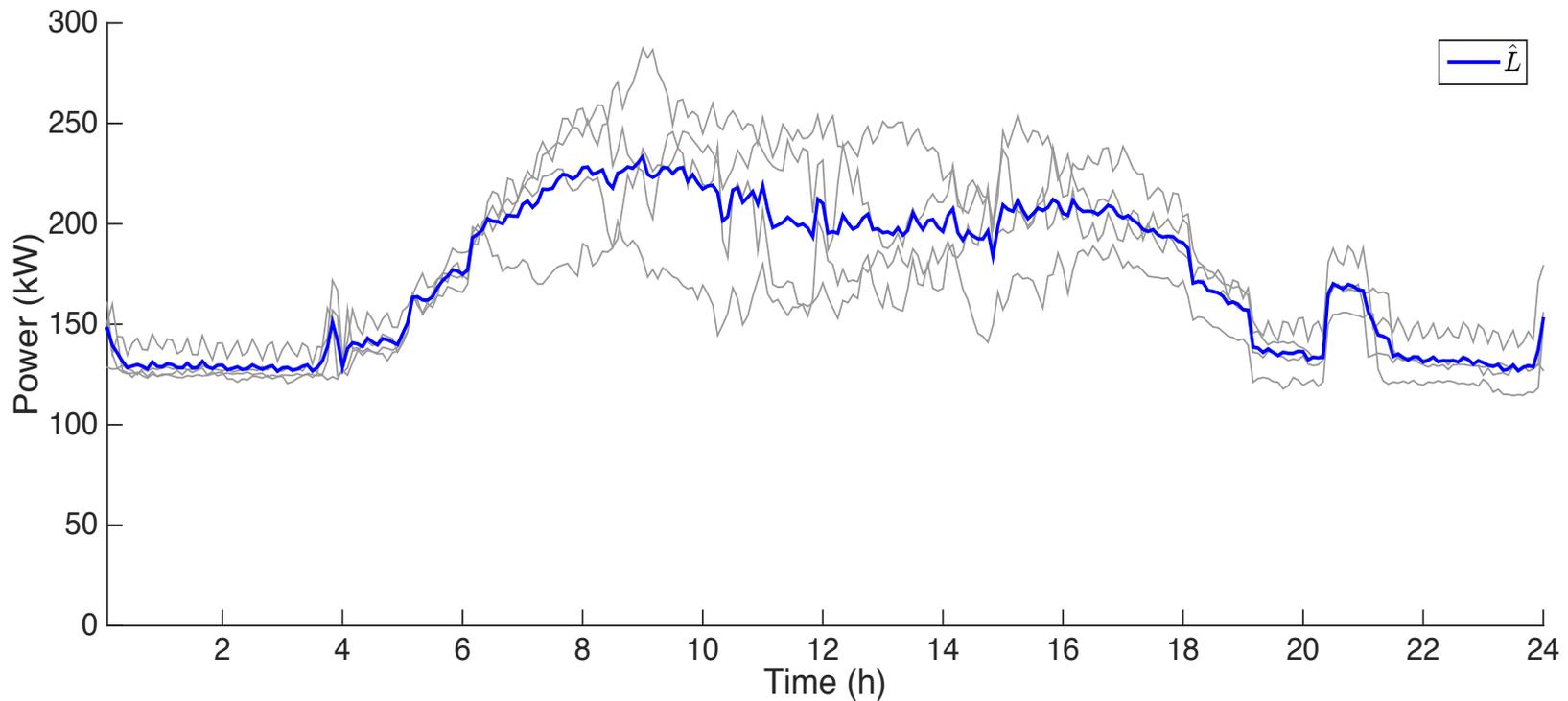
F_t : profil de puissance offset déterminé selon le cas d'application considéré tout en s'appuyant sur l'injection B de la batterie comme degré de liberté

Détermination du plan de soutirage (dispatch plan)

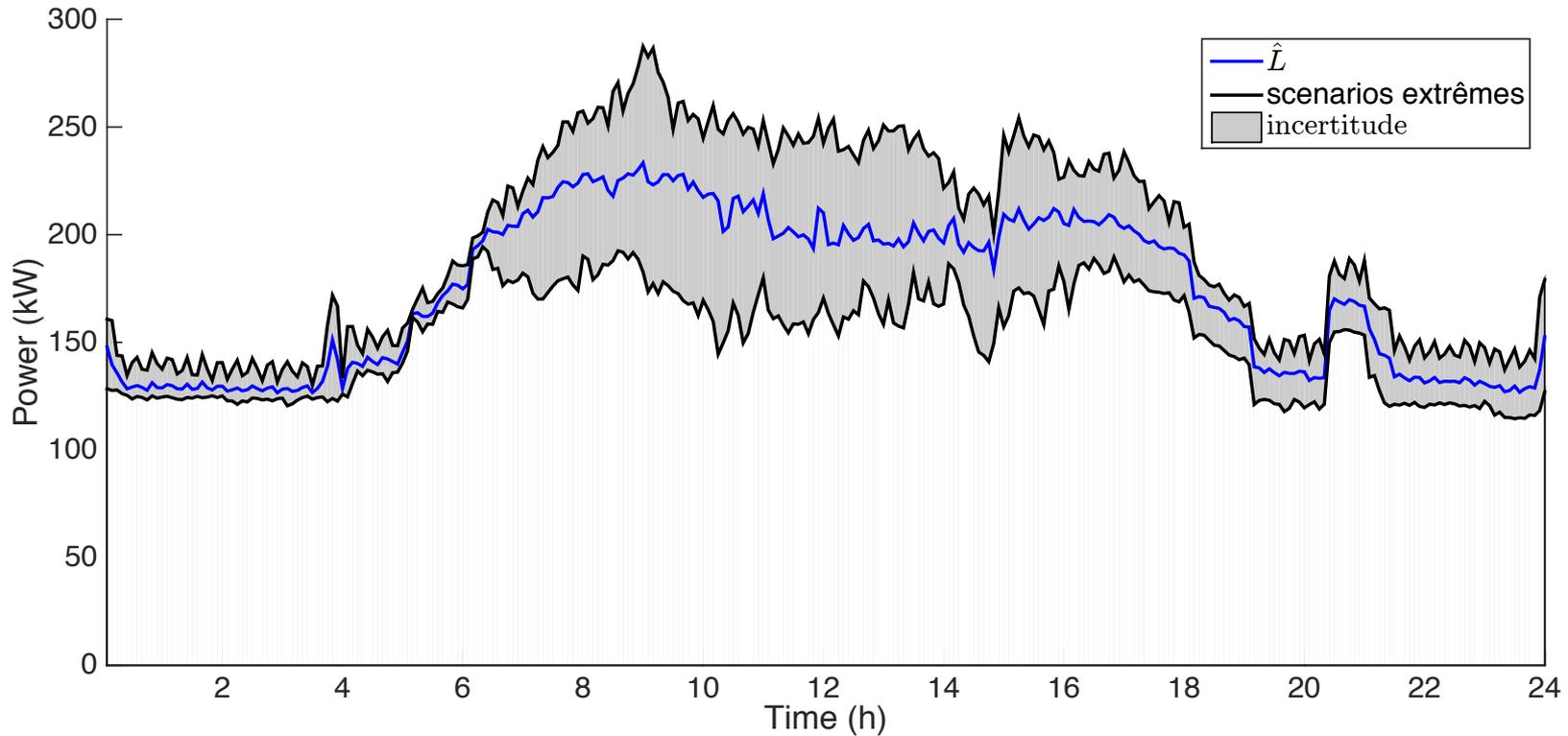
Prévision de la consommation/production (prosumption) \hat{L} :

- Basée sur une méthode d'auto-régression
- Elaboration au préalable d'une base de données statistiques contenant les profils journalier de prosumption pour un certain nombre d'années passées
- Dans cette base, sélection d'un ensemble de profils qui s'approcheraient au mieux de celui du jour visé. Critères de sélection: type de jour (sem./wd/férié), jour de l'année (effet saisonnier), radiation solaire, etc.
- Le profil \hat{L} est déterminé en effectuant pour chaque intervalle de 5mn une moyenne des valeurs fournies par les profils retenus

Détermination du plan de soutirage (dispatch plan)



Détermination du plan de soutirage (dispatch plan)



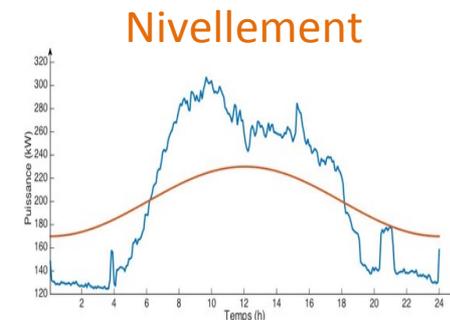
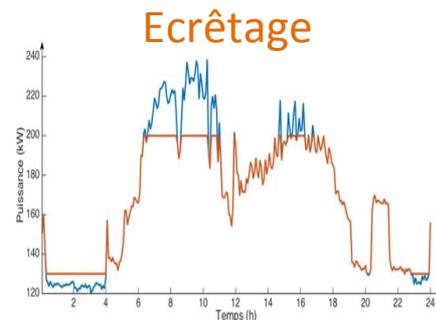
Détermination du plan de soutirage (dispatch plan)

Détermination du profil offset F_t :

- Formulation d'un problème d'optimisation robuste correspondant au cas d'application étudié et utilisant l'injection B comme degré de liberté

Critères et contraintes

- Critères spécifiques à l'application



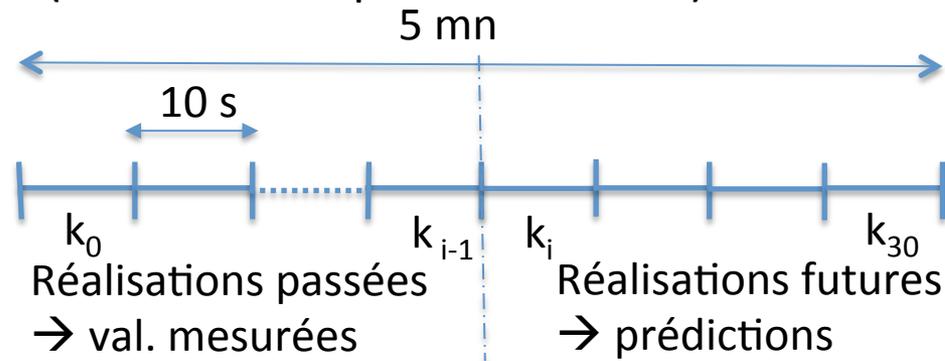
- Maintien adéquat du niveau de charge de la batterie SOC de sorte à garantir la flexibilité nécessaire durant toute la période d'exploitation pour compenser l'écart entre le dispatch plan et la prosumption actuelle
- Respect des limites techniques: SOC , B , etc.
- Prise en compte de l'incertitude liée à la prévision \hat{L} (scenarios extrêmes)

Suivi du dispatch plan en temps réel

- L'objectif est de faire correspondre le profil du soutirage mesuré au dispatch plan moyennant un *modèle de contrôle prédictif* (MPC) utilisant l'injection B de la batterie comme variable de liberté.
- En d'autres termes, la batterie va fournir l'écart entre la presumption réelle et le dispatch plan

Modèle de Contrôle Prédictif (MPC):

- En référence au dispatch plan, chaque période de 5 mn est discrétisée en intervalles de 10 s (définition du pas de contrôle)



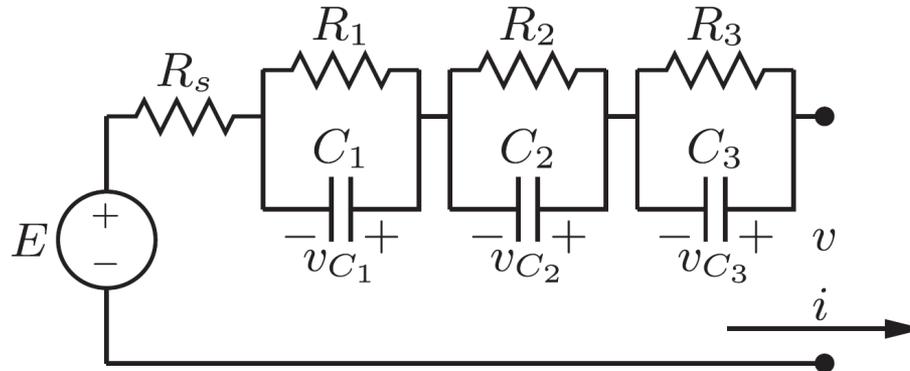
- A l'intervalle k_i (ou $i * 10$ s), on effectue une prédiction à court terme de la presumption sur la période allant de k_i à k_{30} . Cette prédiction s'appuie sur les grandeurs mesurées jusqu'à k_{i-1} (presumption L , injection B ,...)

Suivi du dispatch plan en temps réel

- Déterminer, sur la période allant de k_i à k_{30} , une séquence d'injection B de la batterie visant à compenser au mieux l'écart entre la prédiction à court terme précitée et le dispatch plan (constant pendant la période de 5 mn en cours)
- Cette séquence d'injection B est le résultat d'une optimisation ayant pour contraintes les limites physiques suivantes: tension u , courant i , et état de charge SOC de la batterie
- Cette optimisation inclut une représentation du modèle dynamique de la batterie permettant d'évaluer les contraintes précitées (calcul de u notamment)
- La première composante de la séquence d'injection (au pas k_i) est transmise à la batterie comme étant la nouvelle consigne d'injection jusqu'à l'intervalle k_{i+1}

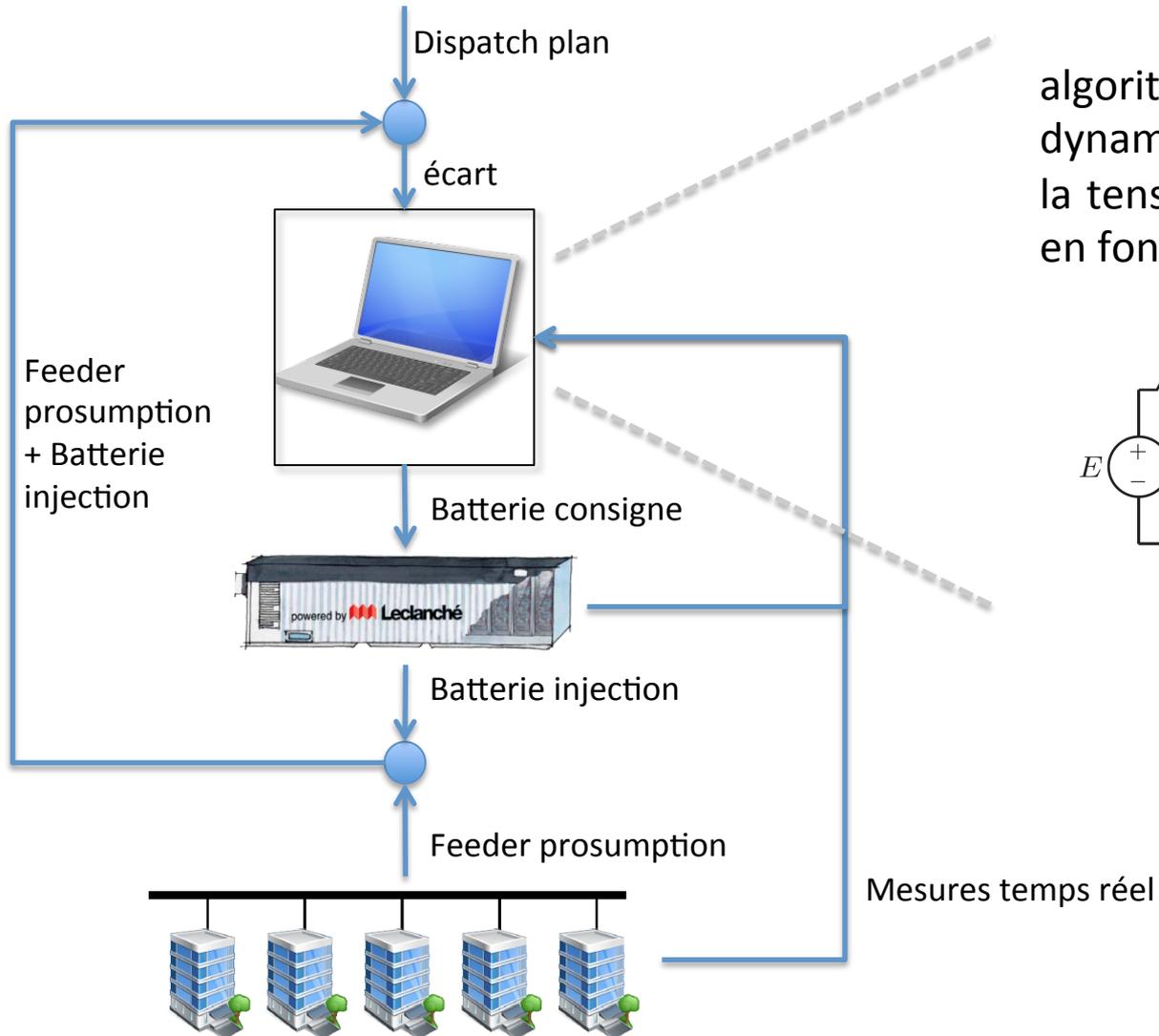
Suivi du dispatch plan en temps réel

Modèle dynamique de la batterie:

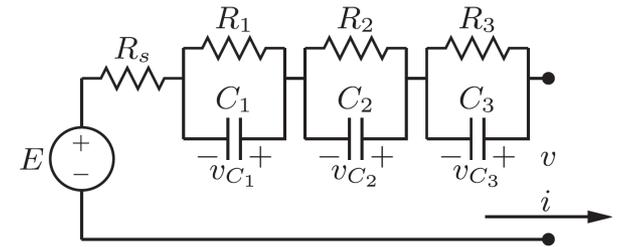


- Les paramètres sont définis par méthode d'identification selon une série de test expérimentaux permettant de reproduire une large palette de phénomènes dynamiques
- Ces paramètres dépendent de l'état de charge *SOC*. Ils sont mis à jour à chaque pas de 10 s en les extrayant d'une table issue des tests expérimentaux

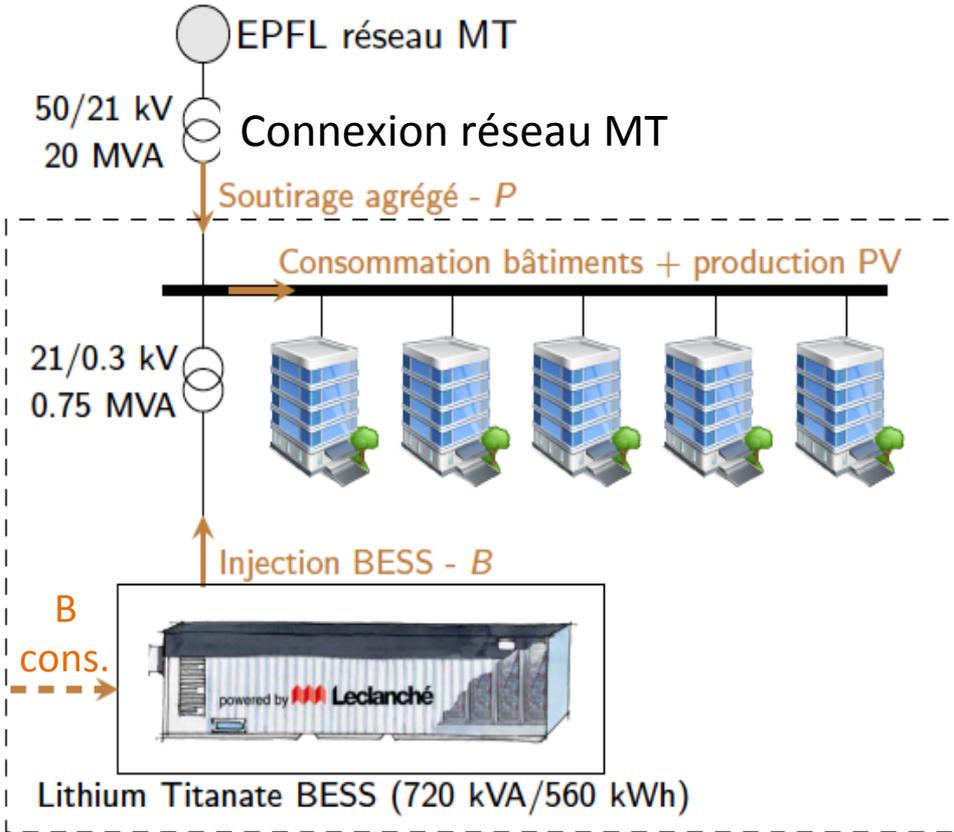
Suivi du dispatch plan en temps réel



algorithme MPC incluant un modèle dynamique de la batterie évaluant la tension u et l'état de charge SOC en fonction du courant i



EPFL – infrastructure expérimentale



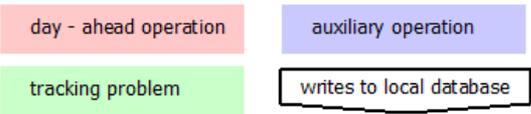
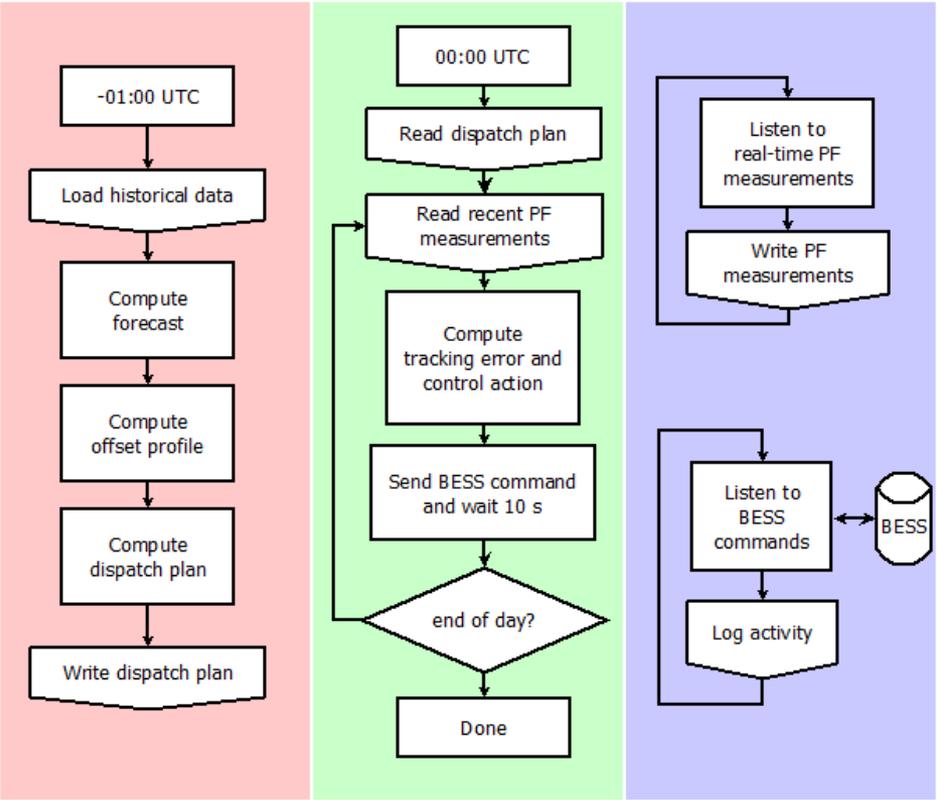
- Point de mesure unique au point de connexion MT.
- Consommation 350 kWp en hiver.
- Installation PV de 95 kWp.

EPFL – infrastructure expérimentale: BESS

Paramètres	valeur
Capacité nominale	720 kVA/560 kWh
Tens. pt.connection MT	20 kV
Tension DC	600/800 V
Technologie cellule (Anode/Cathode)	Lithium Titanate Oxide (LTO) Nichel Cobalt Aluminium Oxide (NCA)
Durée de vie	> 20000 cycles / > 20 years
Nombre de racks	9 en parallel
Nbre de modules par rack	15 en series
Nbre total de cellules	8100
Capacité nominale d'une cellule	30 Ah (69 Wh)
Rendement (AC)	94-96%
Rendement (DC)	97-99%



EPFL – infrastructure expérimentale: outil de contrôle



C++



Organigramme des tâches

Syst. exploit. / langage + hardware utilisés

Résultats (on-line)

Dispatched operation -- 14 Jan 2016

<https://snapshot.raintank.io/dashboard/snapshot/PuW1Rf5d470Q0gsT7UNponM25bGDNTRA>

Dispatched operation -- 13 Jan 2016

<https://snapshot.raintank.io/dashboard/snapshot/cDS4IDniZjRiePXvusnmQXOmMwpGLnR6>

Dispatched operation + Peak Shaving (écrêtage) -- 22/06/2016

<https://snapshot.raintank.io/dashboard/snapshot/LSF3bPxtWYDjHVu6siEr1VPb92EXNkd6>

Dispatched Operation + Load Levelling (nivellement) -- 14/03/2016

<https://snapshot.raintank.io/dashboard/snapshot/4ztn800czpAzEFRzbGOMWc1A2pKeC9ab>

Dispatched operation (continuous operation) -- 16 to 19/03/2016

<https://snapshot.raintank.io/dashboard/snapshot/TNbEgP7j1AWhaW7cEK1ZiK3tY1Or7P4U>

Résultats

Statistiques sur l'erreur de "traking" (kW)

Expérience		RMSE	Moyenne	Max
Jour 0	sans dispatch	19.20	4.68	50.82
	dispatch	0.43	< 0.01	1.54
Jour 1	sans dispatch	18.71	-0.39	72.150
	dispatch	0.25	< 0.01	0.740
Jour 2	sans dispatch	18.06	-4.92	54.45
	dispatch	0.42	< 0.01	1.41
Jour 3	sans dispatch	20.579	-5.451	59.270
	dispatch	0.196	< 0.01	0.570

Conclusions – points clés

- Solution originale afin de faire face à l'accroissement de la demande en matière de réserve (services systèmes) inhérente au degré de pénétration croissant des sources d'énergie d'origine renouvelables
- Mécanisme de contrôle décentralisé/local ne nécessitant pas de coordination particulière (complexité seulement locale liée à l'aptitude à suivre le dispatch plan)
- Mécanisme convenant tout aussi bien au contexte de marché libéralisé que non libéralisé (monopole)
- Mécanisme permettant de traiter des objectifs locaux tels que l'écrêtage ou le nivellement du soutirage
- Infrastructure de monitoring / contrôle non invasif

Conclusions – Perspectives

- Dans le MPC, remplacement du modèle purement électrique de la batterie par un modèle détaillé électrochimique permettant de mieux exploiter les potentialités de la batterie
- Amélioration des modèles de prévision de production/consommation (prosumption)
- Evaluation et comparaison des coûts: cas de déploiement de stockage électrochimique vs. cas régulation de puissance conventionnelle
- Installation multiple de dispositifs de stockage électrochimique dans un réseau électrique – déploiement de services systèmes supplémentaires tel que le contrôle de profil de tensions ou des flux de puissances tout au long des feeders

Références

- F. Sossan; E. Namor; R. Cherkaoui; M. Paolone, *Achieving the Dispatchability of Distribution Feeders through Prosumers Data Driven Forecasting and Model Predictive Control of Electrochemical Storage*, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy* , 10.1109/TSTE.2016.2600103.
- E. Namor, F. Sossan, R. Cherkaoui and M. Paolone, *Load Leveling and Dispatchability of a Medium Voltage Active Feeder through Battery Energy Storage Systems: Formulation of the Control Problem and Experimental Validation*, in proceedings of ISGT Europe 2016, Ljubljana, Slovenija, October 9-12, 2016.
- F. Sossan and M. Paolone, *Integration and Operation of Utility-Scale Battery Energy Storage Systems: the EPFL's Experience*, in proceedings of Control of Transmission and Distribution Smart Grids, CTDSG 2016, Praha, October 11-13, 2016.