

**liten**  
cea tech



## STOCKAGE POUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

Marion PERRIN | [marion.perrin@cea.fr](mailto:marion.perrin@cea.fr) | ASPROM Paris | 30 novembre 2016

# STOCKAGE : L'OPTION ULTIME DE LA FLEXIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE



© exclusive design / Fotolia

Demand Side Management (private households)



© Andrei Merkulov / Fotolia

Demand Side Management (industry)



© Petair / Fotolia

Double use storage system



Hanno Böck / https://hboeck.de/

Power-to-Gas (Chemicals)



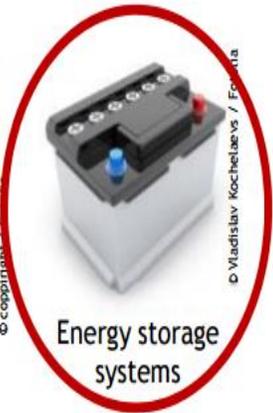
© Markus Gössing / Fotolia

Grid extension



© coppinab / Fotolia

Power-to-Heat



© Vladislav Kochelaevs / Fotolia

Energy storage systems



© Gert Skriver / Wikimedia Commons

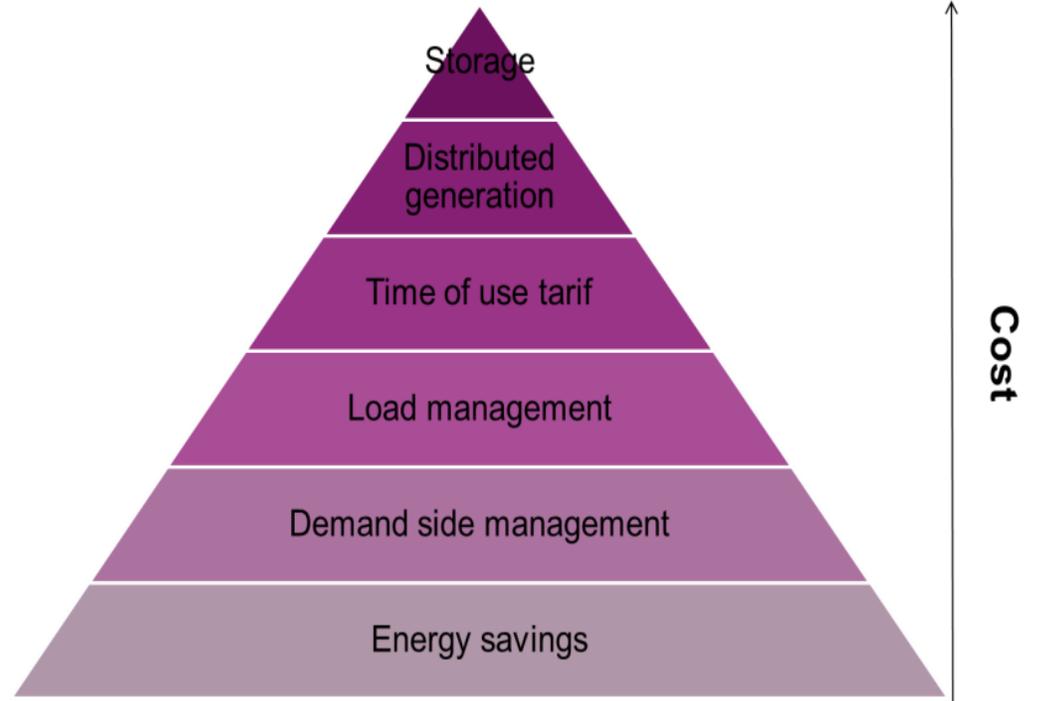
Smart grids



© vege / Fotolia

Curtailment of renewable generation

➔ Electrical Energy Storage is only one of many flexibility options!



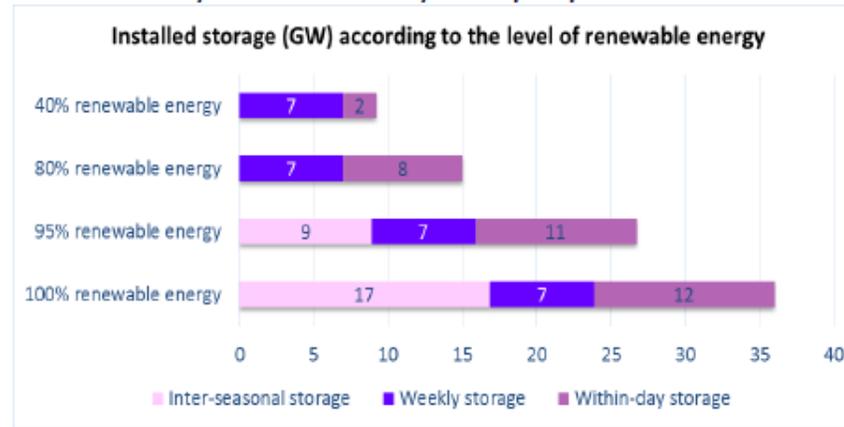
# Need for storage: scenario ADEME 100% renewables FR 2050



Result 3

Flexibility and storage are essential

- The market share of each storage type depends on mix constraints:
  - Short term storage share increases with PV capacity: about 20% (8 GW) of PV capacity for mixes above 80% RE.
  - Inter-seasonal storage is not necessary under 80%RE share in the mix, if syngas is used only for electricity mix purpose

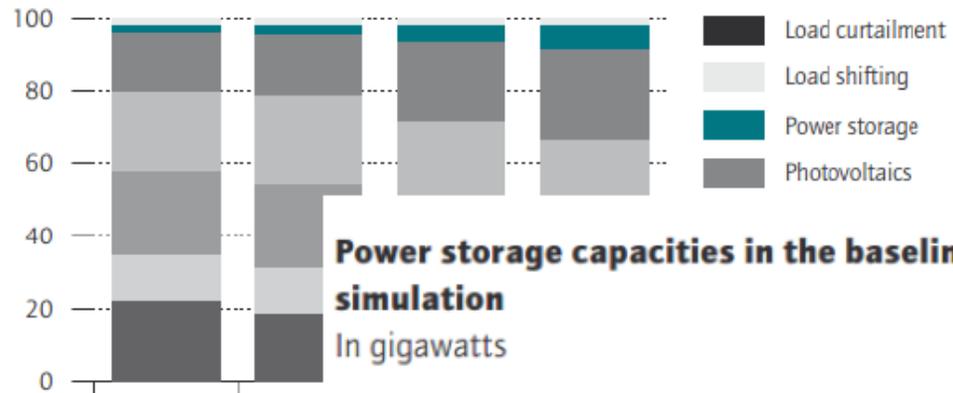


- Dynamic Demand Side Management and short-term storage provide the same services for the system

# Need for storage: scenario Germany 100% renewables 2050

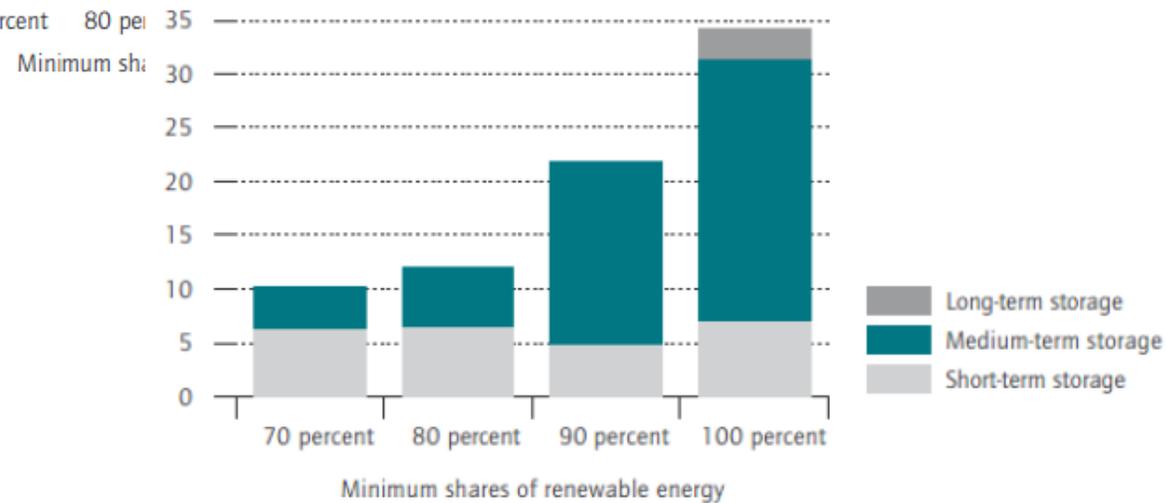
## Power supply in the baseline scenario of the long-term simulation

Shares in percent



## Power storage capacities in the baseline scenario of the long-term simulation

In gigawatts



## Concordant / non concordant conclusions

### NO NEED OF STORAGE FOR THE ELECTRICAL SYSTEM IN THE SHORT TERM

- Long term storage (e.g. power to gas) only needed with RE shares higher than 70 to 80%

#### FR

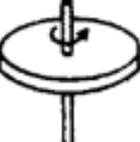
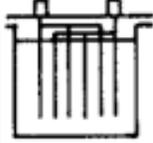
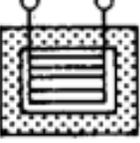
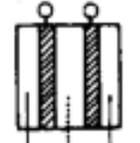
- First need is weekly storage
- From 40% share on, need of intraday storage
- At 80% RE, 8GW weekly, 7GW short term storage needed
- The focus is put on « distribution grid support » (hundreds of kW/kWh)
- water heaters represent a 13 to 20 TWh intra-day flexibility

#### DE

- First need is on short term storage (frequency regulation)
- At 80% RE, 5GW weekly, 7GW short term storage needed
- Focus is put on larger scale storage (MW) for frequency regulation and on residential storage for PV self-consumption

- **Quelle technologie pour quelle application?**
- **Méthodologie pour le choix et l'intégration**
- **Evolution des coûts et des marchés sur les 3 dernières années**
- **Une domination du Li-ion**
- **EMS des systèmes PV + stockage**
- **Conclusions**

# LES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ

0	0	2	2	2	2	2	3	3	4
direct		mechanical		electrochemical			thermic		thermochemical
		static	dynamic						
capacitor  $d = d' = 1 \mu\text{m}$ $100 \text{ V}, \epsilon_r = 100$ $\rho = 2 \text{ kg/m}^3$	superconductor air torus  $B = 10 \text{ Tesla}$ $\mu_r = 1$ $\rho = 2 \text{ kg/m}^3$	a) pump-fed power station (h=300m)  b) air pressure	storage gyroscope  $7000 \text{ min}^{-1}$	LT batterie  1) Pb/PbO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2) Zn/NiO <sub>2</sub> 3) Zn/Cl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	HT batterie  1) Na/S (320°) 2) Li(Al)FeS <sub>4</sub> (450°C)	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> fuel cell  a) stored H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> b) just H <sub>2</sub> in FeT	hot water  $\Delta t = 70^\circ\text{C}$ $\eta = 19\%$	PCM - device  a) water steam (100 bar) b) LiF / NaF - melt	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> motor  H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> stored $\eta = 25\%$



# COMPARAISON DES TECHNOLOGIES DE BATTERIES



## Comparison Battery Technologies

Technologie		LIB	Solid State	LiS	LiSi	Metal Air	Pb	NaS	VRFB	EOS	Na+
Densité d'énergie	$\rho E$	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red
Densité de puissance	$\rho P$	Green	Light Green	Yellow	analog LIB	Yellow	Light Green	Light Green	Yellow	Yellow	Red
Rendement	$\eta$	Green	Innerwiderstand	Yellow	analog LIB	n/a	Light Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Coût	€	Light Green	Green	Green	n/a	n/a	Green	Yellow	Orange	Green	Light Green
Tenue cyclage	zyk	Green	n/a	n/a	Volumen-änderung	Dendrite n	Yellow	Green	Green	Light Green	Light Green
Sécurité	Safe	brennbarer Elektrolyt	Light Green	metallisches LI	n/a	metallisches LI	Gasung Säure	brennbar	Säuredichtigkeit	n/a	wässriger Elektrolyt
Maturité	TtM	verbreitet	Laborssystem	Laborssystem	Laborssystem	Laborssystem	verbreitet	verfügbar	verfügbar	Demo	Demo
Dispo matière	Roh	Lithium	Lithium	Lithium	Lithium	Lithium	Green	Green	Vanadium	Green	Green

- ➔ No single perfect battery, different applications require different battery
- ➔ New battery technologies all still have one or more problems
- ➔ Actual challenge is meeting requirements at low cost!

28.01.2016

DFBEE Berlin - Storgae Technologies - Leuthold, RES Deutschland

20

# METHODOLOGIE POUR LE CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE BATTERIES

①

## Définition des contraintes de l'application

Séries temporelles courant/puissance et température

Liste de contraintes (encombrement, conditions extérieures ...)

Base de données de caractéristiques de technologies

...

②

## Simulation système avec différentes technologies

Calculs sur la durée de vie de l'application

Utilisation d'une plateforme de simulation « model based design »

Utilisation de modèles simplifiés ou élaborés incluant le vieillissement

Définition d'un dimensionnement et d'une architecture système grossiers

③

## Sélection d'1 famille technologique

Optimisation du dimensionnement et de l'architecture système

# METHODOLOGIE POUR L'INTÉGRATION DE BATTERIES

①

## Pré-sélection de fournisseurs / références batteries

Benchmark cellules selon cahier des charges de l'application (3 mois)

**Performances initiales** en fonction des conditions I, T

**Essais de stabilité thermique** (optionnels)



②

## Sélection de 2 références

Essais de vieillissement (toujours selon cahier des charges de l'application) (9 mois minimum)

**Performances en endurance en cyclage**

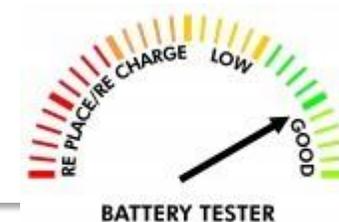
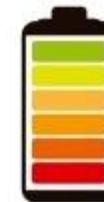
**Performances en endurance en calendrier**

③

## Sélection d'1 référence

Développement d'algorithmes BMS, ex. SOC et/ou Pmax ( ① + 6 mois)

Développement de modèles de vieillissement ( ② +12 mois)





- The largest R&D storage tests platform in Europe with more than 300 cycling channels
- Tests channels from small individual cells to packs and storage containers (up to 250kW)
- Library of aging models and BMS algorithms



# MOYENS D'ESSAIS



ESS in real operating systems up to 350kVA

300 channels for Li-ion batteries + BMS



50 channels for aqueous batteries



Redox flow battery  
100kWh/10kW

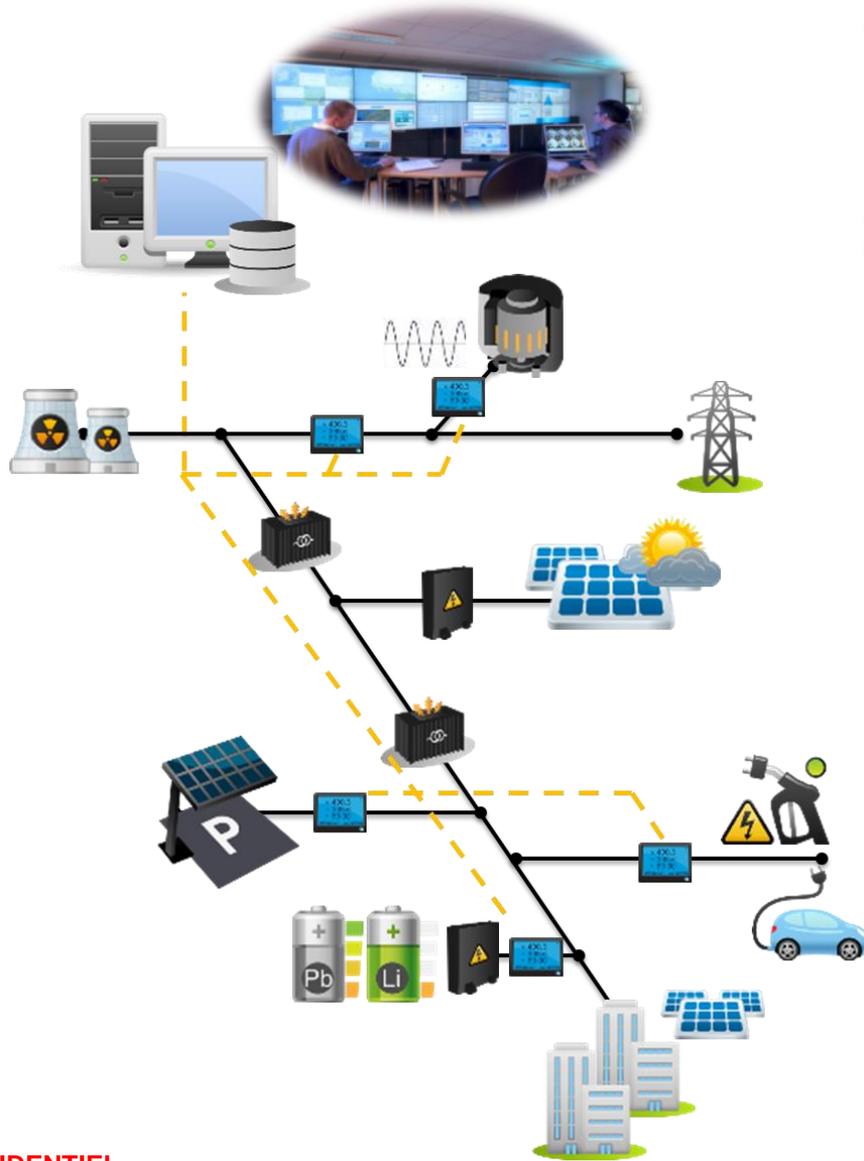


Li-ion battery Kokam  
150kWh/60kW

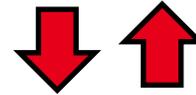


Na/NiCl<sub>2</sub> battery  
140kWh/120kW

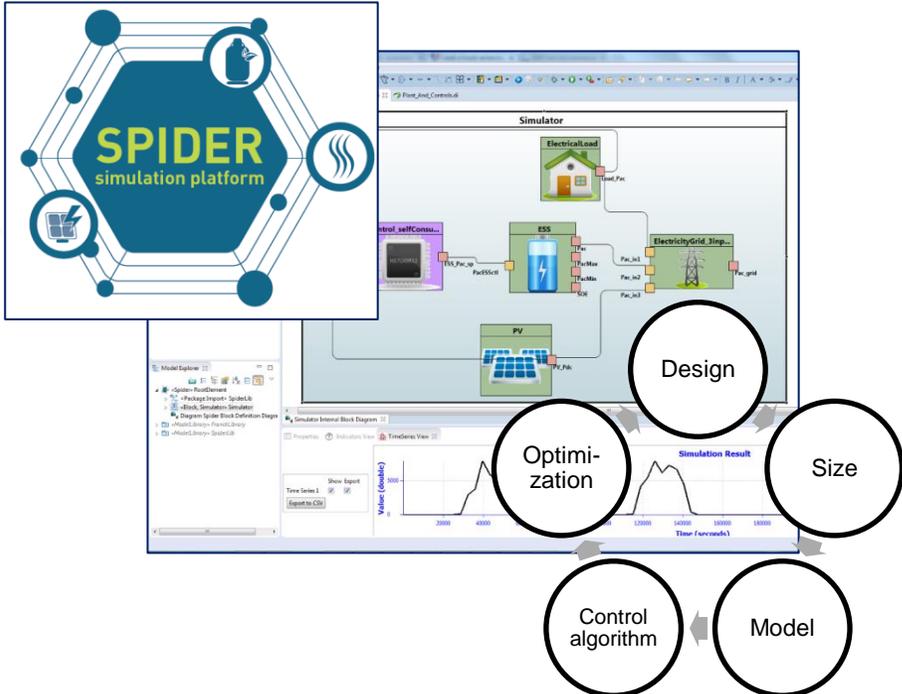
# e-Platform: cyber physic system modelling and control



MORE platform:  
design and operation of energy management  
algorithms

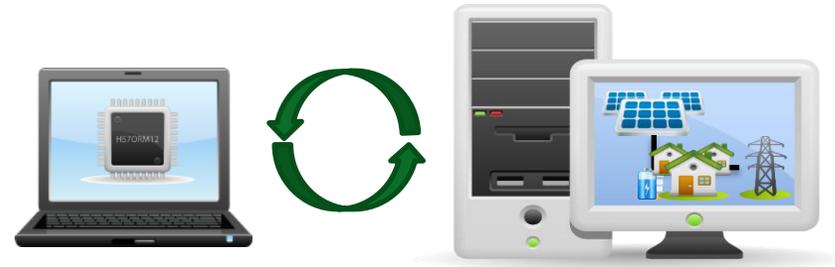


SPIDER platform:  
cyber-physic energy systems modeling

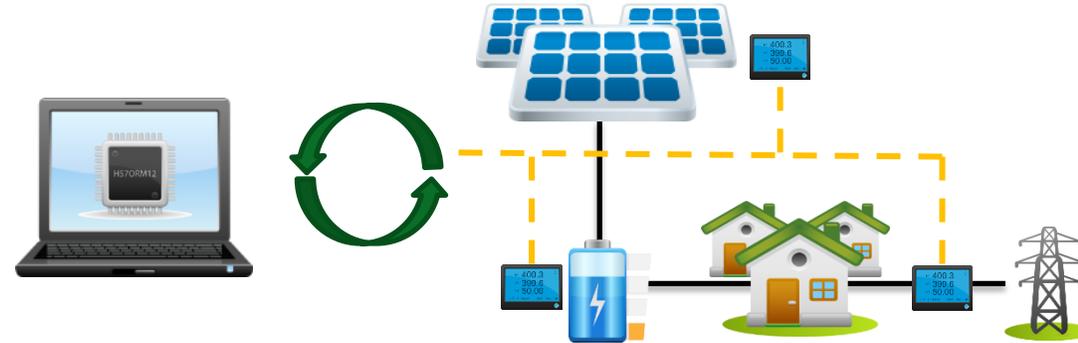


# HIL PLATFORM: CONFIGURATIONS

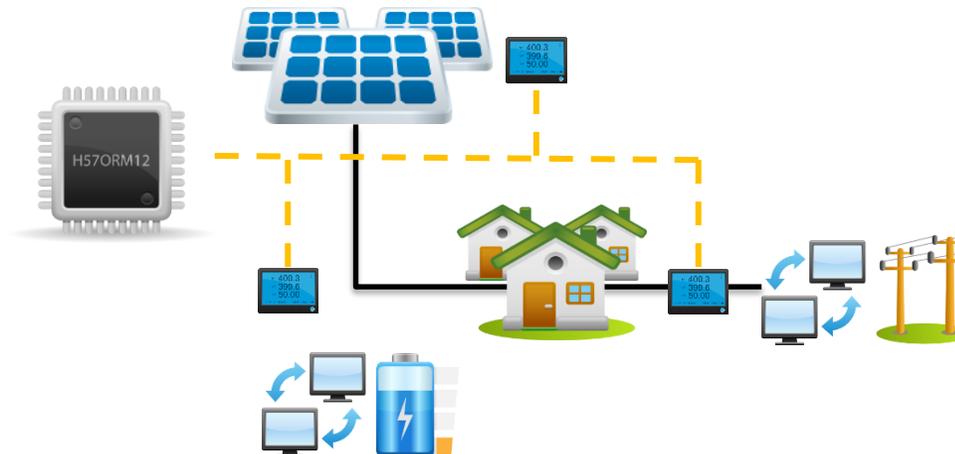
Rapid prototyping and real-time simulation



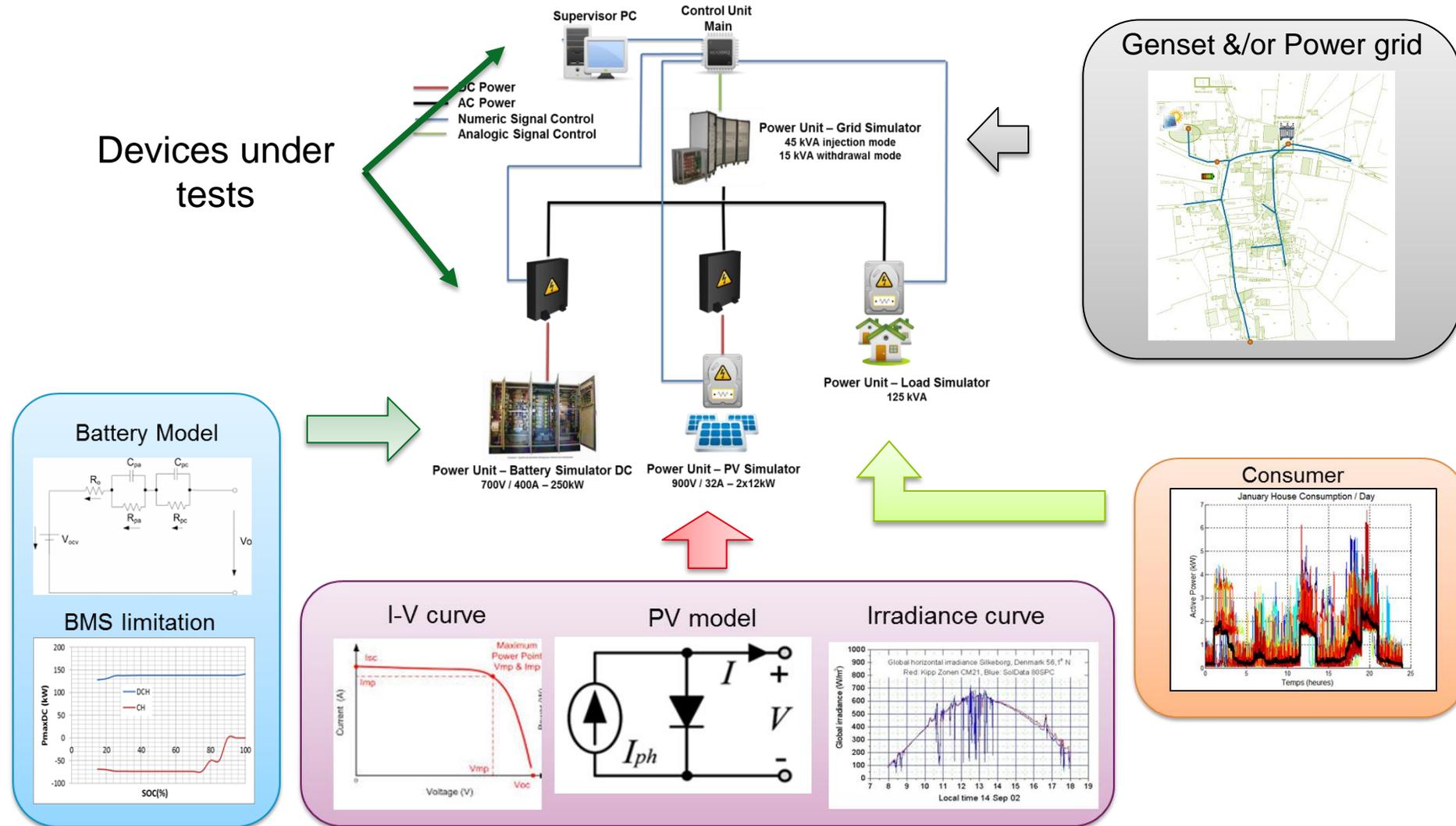
Rapid prototyping and representative plant



Power hardware in the loop

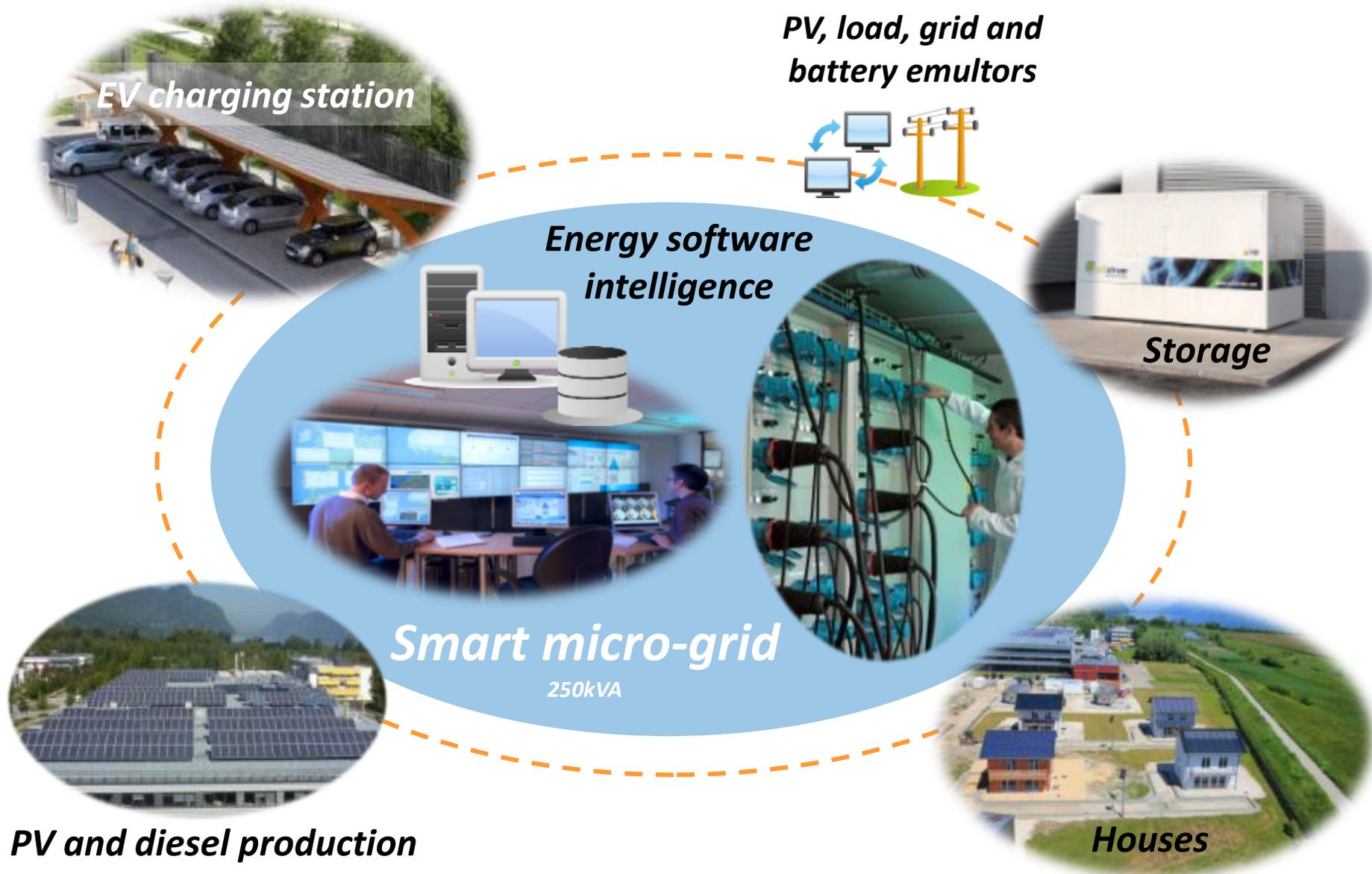


# Power Hardware in-the-loop (PHIL)

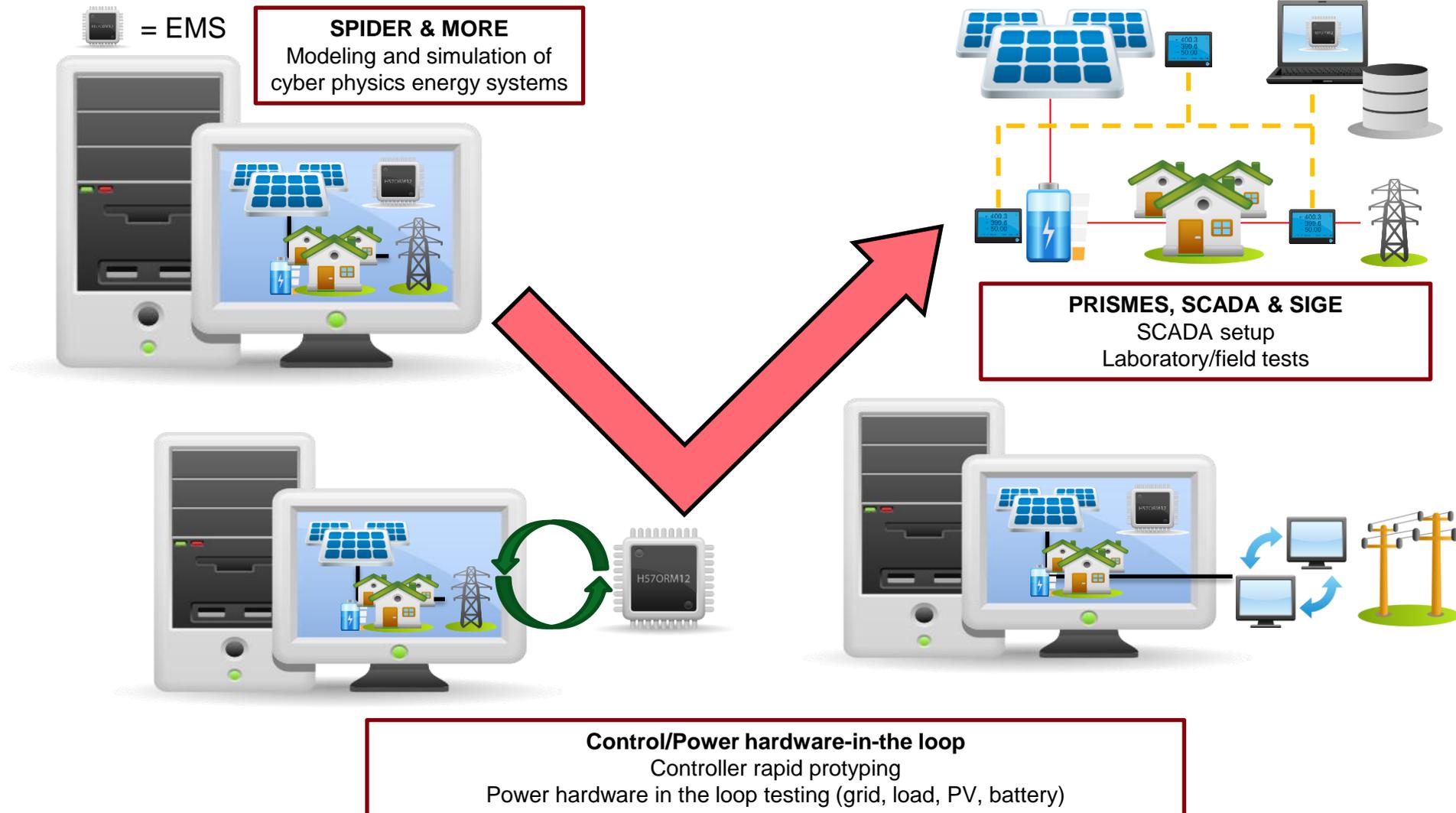


Ex: evaluate how the different global and storage energy management strategies could improve to better manage the power grid

# Smart micro-grid platform



# Synergies between platforms



## CONTENU DE LA PRÉSENTATION

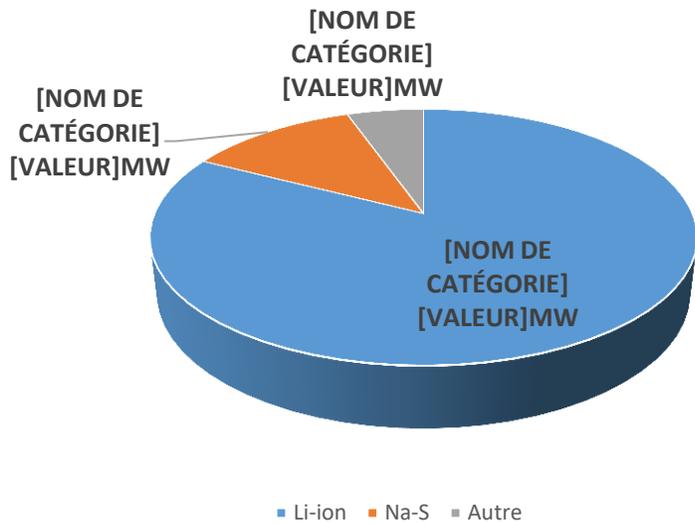
- Quelle technologie pour quelle application?
- Méthodologie pour l'intégration
- **Evolution des coûts et des marchés sur les 3 dernières années**
- Une domination du Li-ion
- EMS des systèmes PV + stockage
- Conclusions

# BESS DOMINATION DES TECHNOLOGIES LI-ION DEPUIS 2014

- Domination des technologies Li-ion dans les projets récents au niveau mondial (projets référencés dans la base de données DoE)

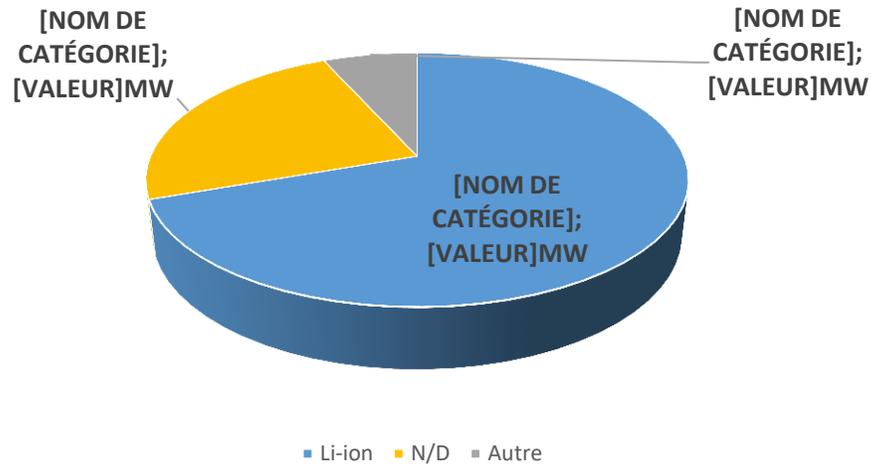
Projets mis en opération depuis janvier 2014  
- Répartition par technologies de batteries

Un total de 740MW mis en opération selon la base DOE  
82% de ces projets utilisent des batteries Li-ion



Projets annoncés depuis janvier 2014 - Répartition par technologies de batteries

Un total de 1480MW référencés dans la base DOE  
Au minimum 74% de ces projets utilisent / utiliseront des batteries Li-ion.  
A noter, aucune annonce pour de nouveaux projets utilisant la technologie Na-S



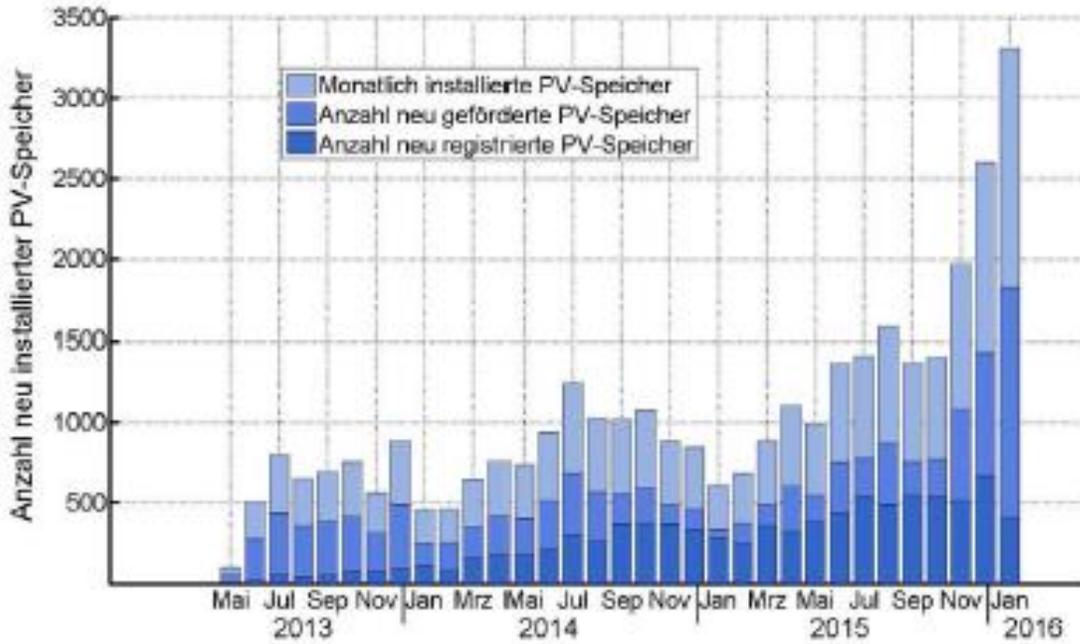
Source : base de données DOE

## PROJETS RÉCENTS/PRÉVUS >30MW

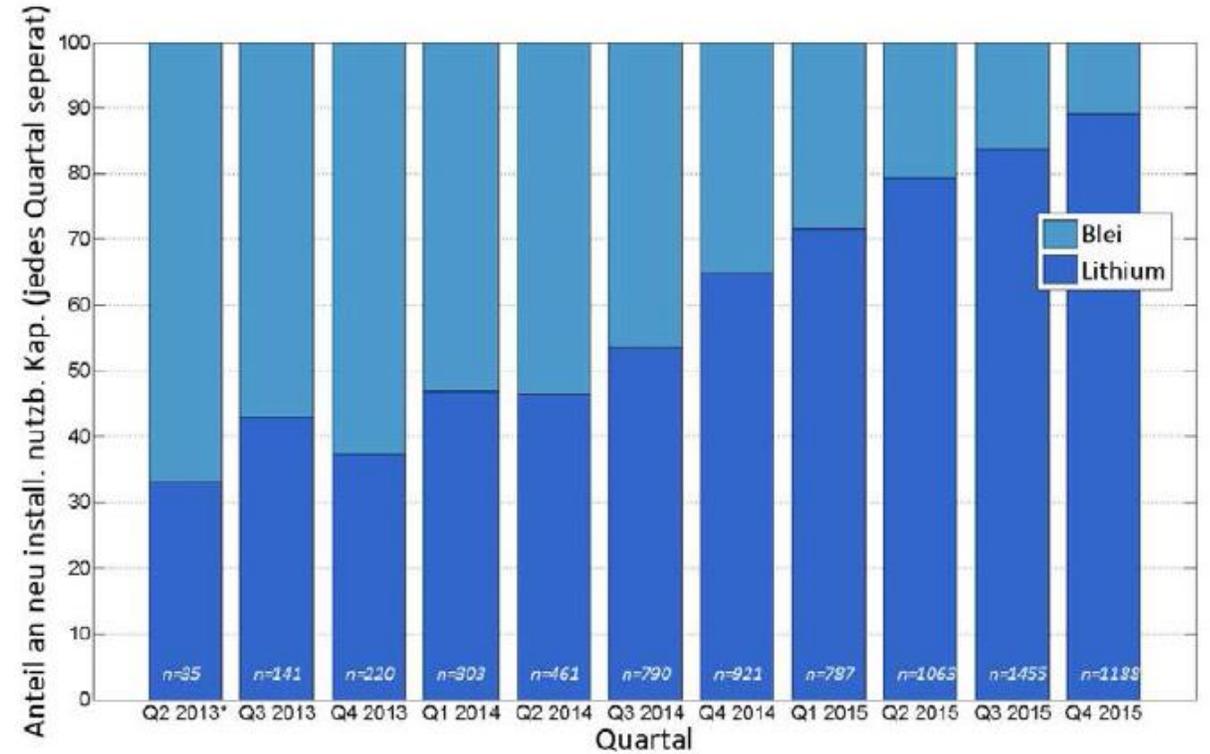
- La bascule vers la technologie Li-ion se retrouve sur ces projets d'envergure ;
- A noter que les 3 marchés les plus avancés sur ces projets de stockage de grande puissance sont le Japon, la Corée du Sud et les Etats-Unis.

Puissance	Pays / Ville	Techno	Date	Statut	Fournisseur batteries	Intégrateur système
100MW	USA / Long Beach	Li-ion	04/14	Construction annoncée pour 2017	?	AES Energy Storage
100MW	Inde / Ananthapuramu	TBD	02/16	Appel à projet lancé	TBD	TBD
50MW	Japon / Buzen	Na-S	03/16	Mis en opération	NGK Insulators	
48MW	Corée du Sud / Gyeongsan	Li-ion	01/16	En phase de test avant mise en opération	LG Chem	Woojin Industrial Systems
40MW	Japon / Nishi Sendai	Li-ion	02/15	Mis en opération	Toshiba	Toshiba
40MW	Philippines / Kabankalan	Li-ion	2014	Annoncé	TBD	AES Energy Storage
40MW	Japon / Minami-Soma	Li-ion	02/16	Mis en opération	Toshiba	Toshiba
36MW	USA / Notrees Energy Storage System	Plomb > Li-ion	2012	Opérationnel ; annonce juin 2015 : remplacement progressif des batteries plomb par des batteries Li-ion	Xtreme Power (Pb) / Samsung SDI	Yunicos
34.5MW	USA / Grand Ridge	Li-ion	2015	Mis en opération	BYD	
34MW	Japon / Rokkasho	Na-S	2008	Mis en opération	NGK Insulators	
32MW	USA / AES Laurel Mountain	Li-ion	2011	Mis en opération	A123	AES Energy Storage
31.5MW	USA / Beech Ridge	Li-ion	11/15	Mis en opération	BYD	

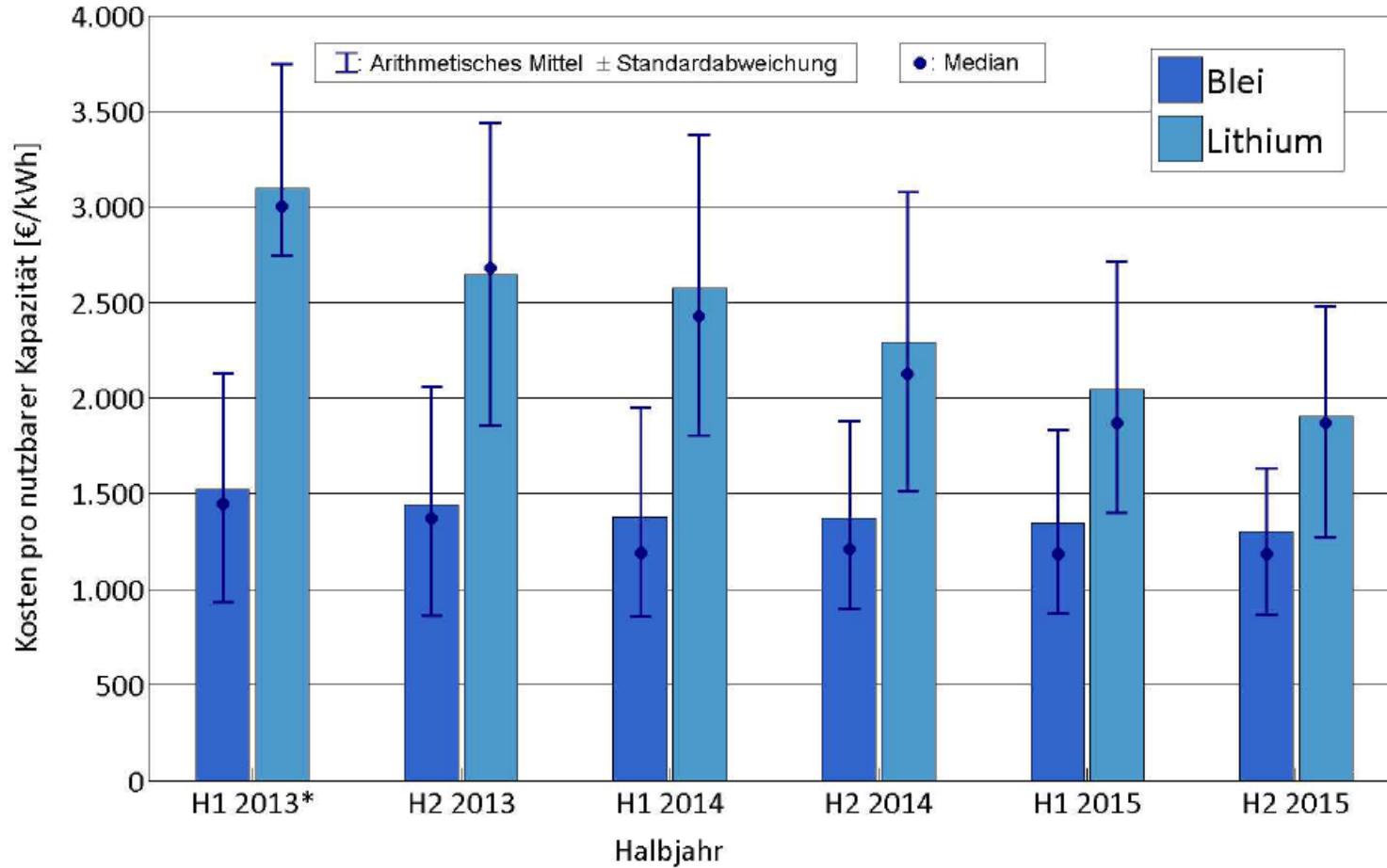
- Source ISEA Speichermonitoring



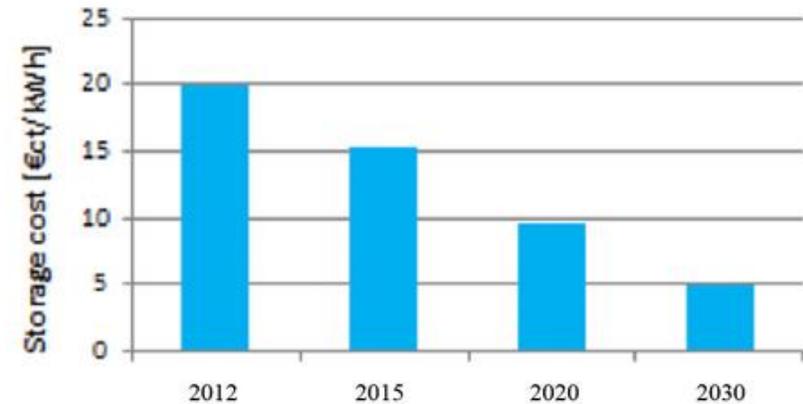
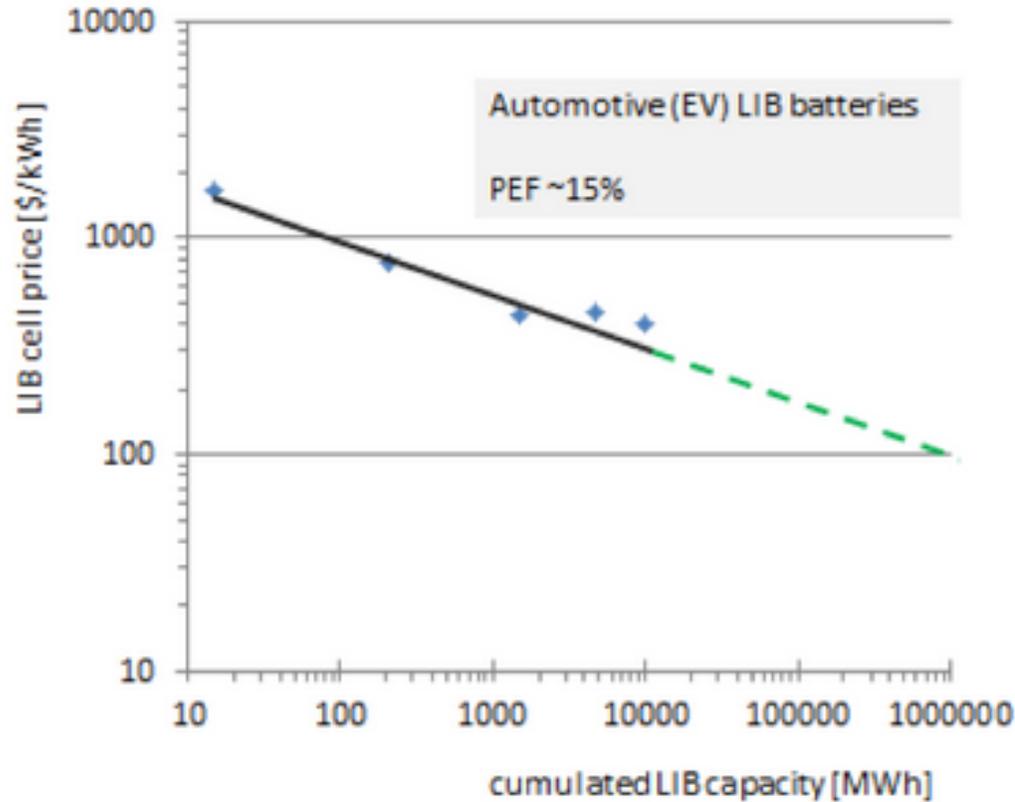
- Taille moyenne 6kWh



# EVOLUTION DU COÛT DES SYSTÈMES D'AUTOCONSOMMATION



# COURBE D'APPRENTISSAGE DU LI-ION: WINFRIED HOFFMANN PVSEC 2014



Décroissance de 15% du prix à chaque doublement de la capacité installée  
100€/kWh une fois 1TWh atteint (soit 40 millions de véhicules)

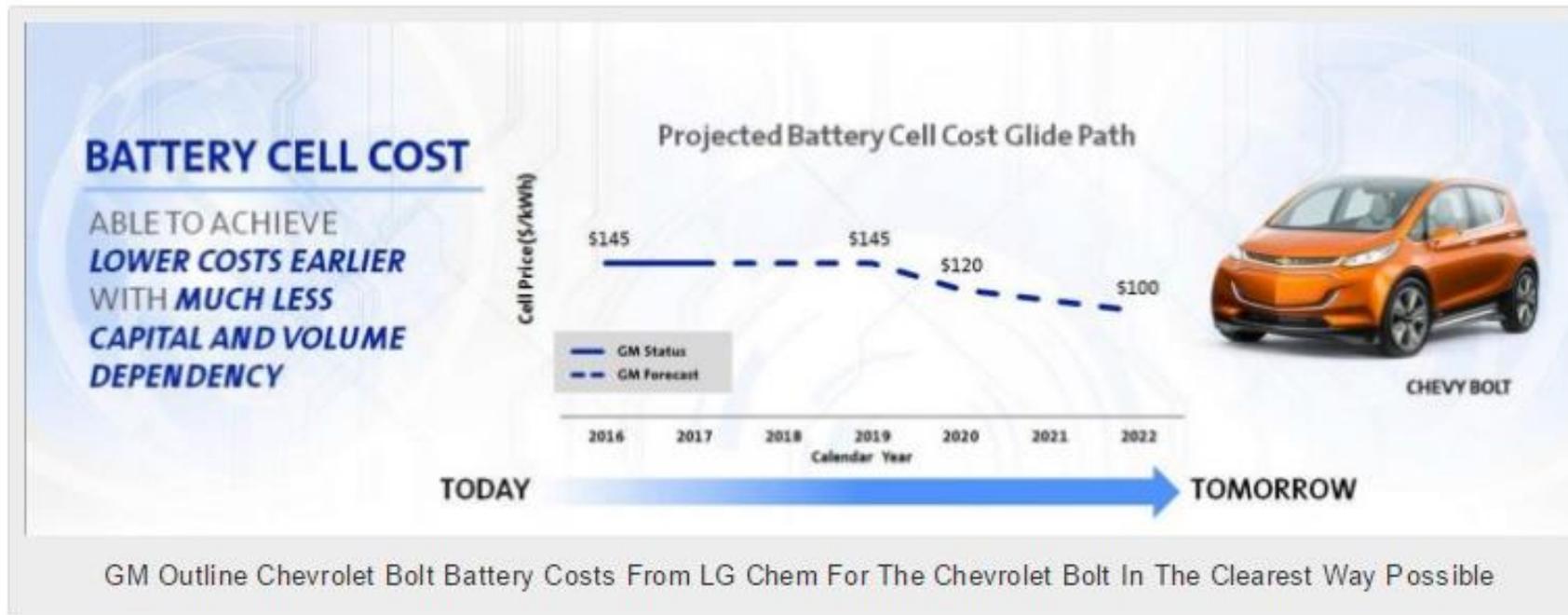
Possible en 2030 sous réserve d'une croissance du marché de 31% par an

# QUELLE ASYMPTOTE POUR LA RÉDUCTION DE COÛT ?

General Motors rattled the electric vehicle world on October 1st when they announced that the battery cell costs inside the new Chevrolet Bolt was an “*industry-leading*” **\$145/kWh** from its annual Global Business Conference.

The declaration was significant for a couple reasons.

For starters, it is unprecedented for any automaker to *actually* disclose specific battery pricing. Secondly, that confirmed \$145/kWh price-point ended a long standing argument on how price competitive 2nd generation plug-ins could be, and just how low today’s battery costs actually were.



Turns out, that LG Chem is pretty *none-to-happy* with GM in a report filed by Autoline Daily (*from the 1:50 mark*). John McElroy says E-Today in South Korea is reporting that:

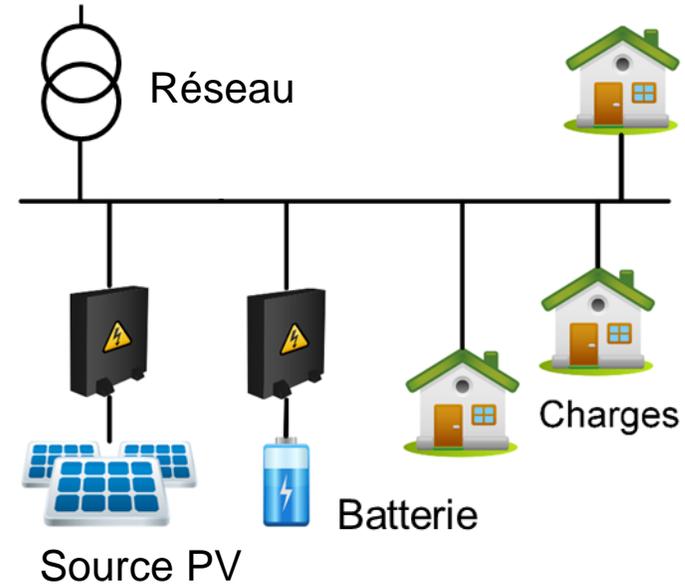
- Quelle technologie pour quelle application?
- Méthodologie pour l'intégration
- Evolution des coûts et des marchés sur les 3 dernières années
- Une domination du Li-ion
- **EMS des systèmes PV + stockage**
  - Recalage de modèles en cours d'opération
  - Gestion optimale basée sur des modèles adaptatifs
- Conclusions

## Source de coût / revenu

- Vente / achat d'énergie au point de raccordement
  - Participation / utilisation de services système
  - Remplacement / réparation d'équipement
- => Maximiser la valeur de la centrale pour l'opérateur et pour le gestionnaire du système électrique

## Objectifs

- Système de contrôle / gestion d'une centrale PV+stockage en présence d'incertitude
- Optimisation de la gestion d'énergie



### Réduction CAPEX

- Dimensionnement
- Choix de Technologie

Conception

Installation

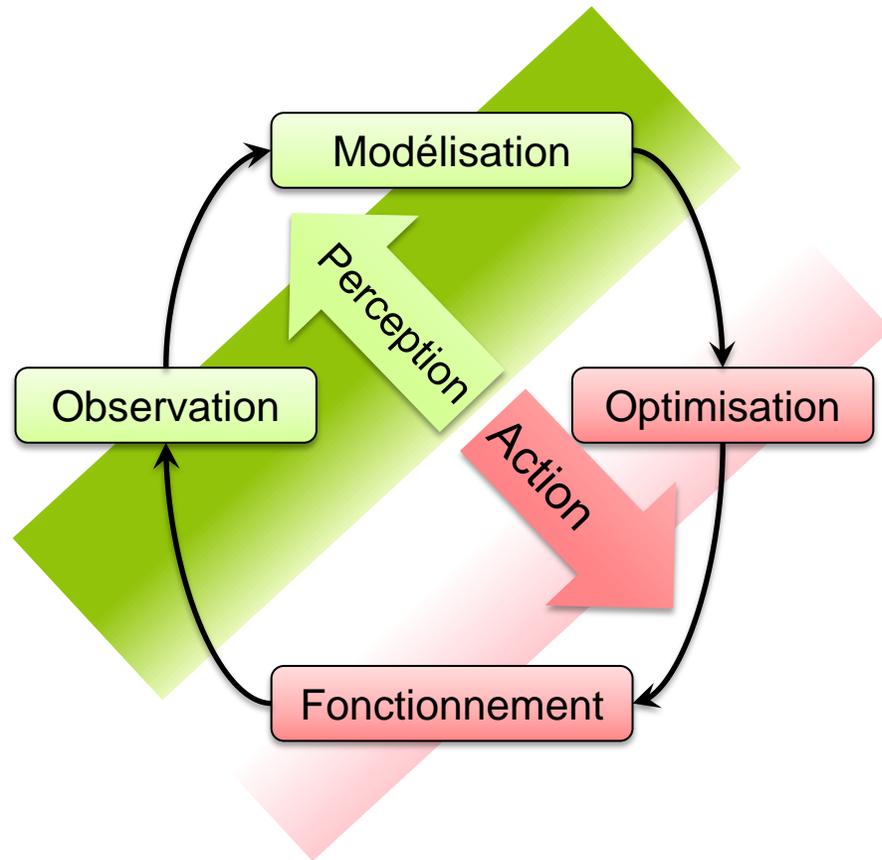
### Réduction OPEX

#### Maximisation bénéfique

- Pertes énergétiques
- Vieillessement
- ...

Opération

Maintenance



## Défis

- La modélisation des batteries nécessite des tests chronophages au laboratoire
- Prise en compte des conditions de fonctionnement
- Evolution des caractéristiques au long de la durée de vie

## Objectifs

- Minimiser le besoin de test au laboratoire
- Permettre le recalage du modèle
- Eviter l'arrêt de la centrale

# Recalage du modèle par déclenchement de tests pendant l'opération

## OBJECTIFS :

Mise au point des stratégies de contrôle visant à améliorer l'usage du stockage.

Un enjeu important est de concevoir un contrôle qui **maximise le revenu généré** par le service fourni par le système de stockage **tout en maximisant ses performances** (rendement, vieillissement).

Pour cela, l'algorithme de contrôle doit disposer de paramètres précis pour ces modèles. En revanche, il n'est pas possible de procéder à des tests sur le système car cela causerait une importante indisponibilité. L'objectif de l'algorithme a donc été d'**identifier le besoin de tests**, de **réaliser les tests** sans impacter l'opération du système et de **recaler les paramètres de l'EMS** pour améliorer sa performance.

## RÉSULTATS :

- 1) L'algorithme identifie qu'il existe un écart entre l'opération optimale planifiée et le réalisé. Il calcule l'impact (financier et/ou énergétique) de cet écart et compare cela au coût de la réalisation d'un test.
- 2) Si le test apporte un gain significatif, l'algorithme définit une série de tests du système de stockage pendant l'opération en ne contrôlant qu'une partie des batteries du système de stockage.
- 3) L'algorithme modifie les paramètres de l'EMS suite aux résultats des tests.

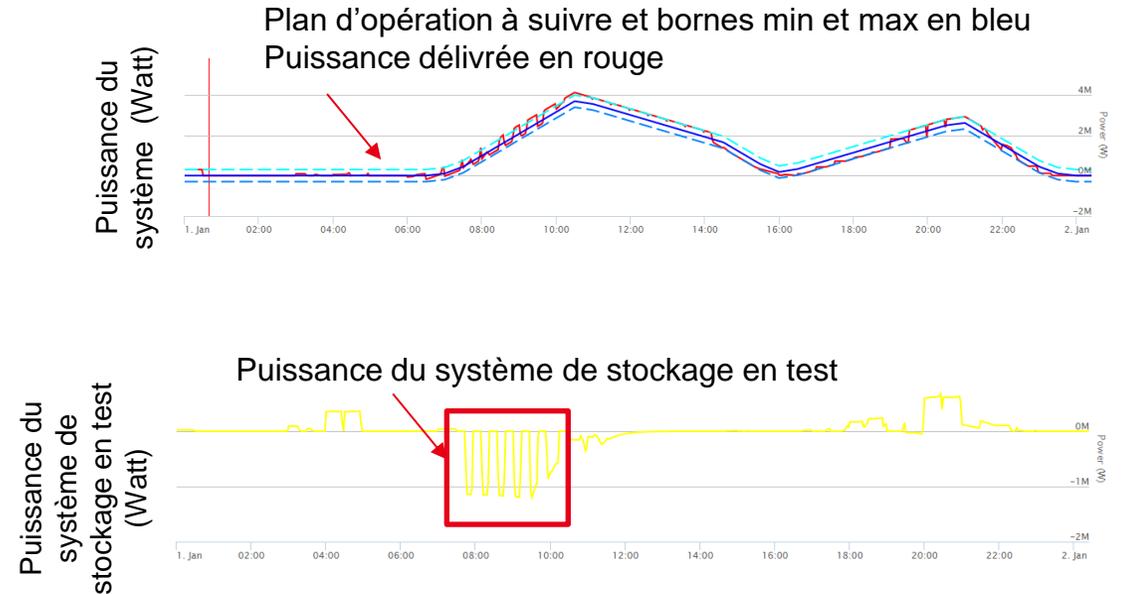
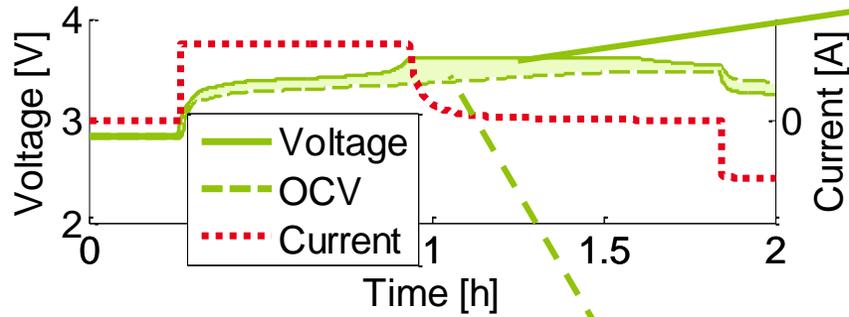


Fig.1. Visualisation de la puissance du système PV avec stockage et de son plan d'opération en haut.

Visualisation de la phase de test sur un des systèmes batteries pendant l'opération

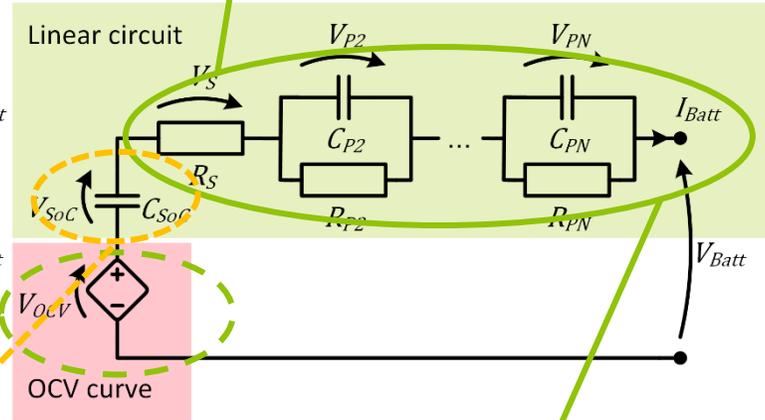
Sur la figure ci-dessus, on constate que le plan d'opération et que le test (ici des appels de puissances successifs) sont bien exécutés. Le profil de puissance du test sur un des systèmes de batteries est compensé par les autres systèmes batteries qui composent le système de stockage.

# ESTIMATION DU MODÈLE DYNAMIQUE DE BATTERIE PAR FILTRAGE ADAPTATIF



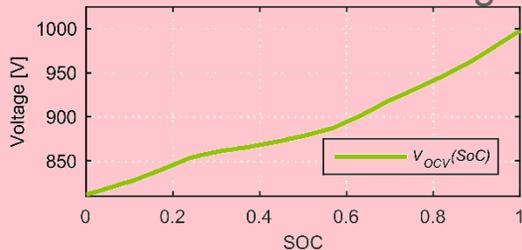
Réponse long terme (SoC)

Réponse transitoire (diffusion+résistance)



## Modèle non-linéaire

- Caractéristique OCV
- Caractéristique d'impédance
- Caractérisation hors-ligne



**Modèle d'erreur OCV**

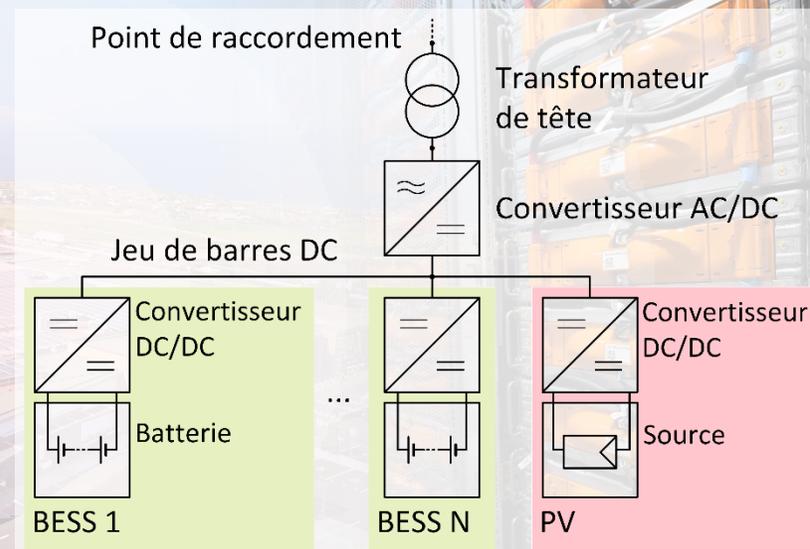
- Décalage OCV
- Estimation d'état
- Pour la mise-à-jour du modèle non-linéaire

**Modèle linéaire**

- Circuit équivalent
- Modélise résistance et diffusion
- Estimation de paramètres

# APPLICATION SUR UN BESS COMMERCIAL

Installation PV LECLERC St. Leu	
Lieu	St. Leu, La Réunion
Gestionnaire	ALBIOMA
Mise en service	Janvier 2015
Capacité PV installée	1 MWp
Système de batterie	2 containers de batteries à 11 racks parallèles
Taille du rack	17 modules
Technologie de batterie	Li-Ion, LG Chem UPB4860
Plage de tension	714.0 - 999.6 V
Courant nominal	660 A (1C)
Capacité BESS	2 x 693 Ah
Capacité énergétique	2 x 600 kWh
Puissance max. BESS	2 x 348 kW



# COMPARAISON DES MÉTHODES D'OBSERVATEUR

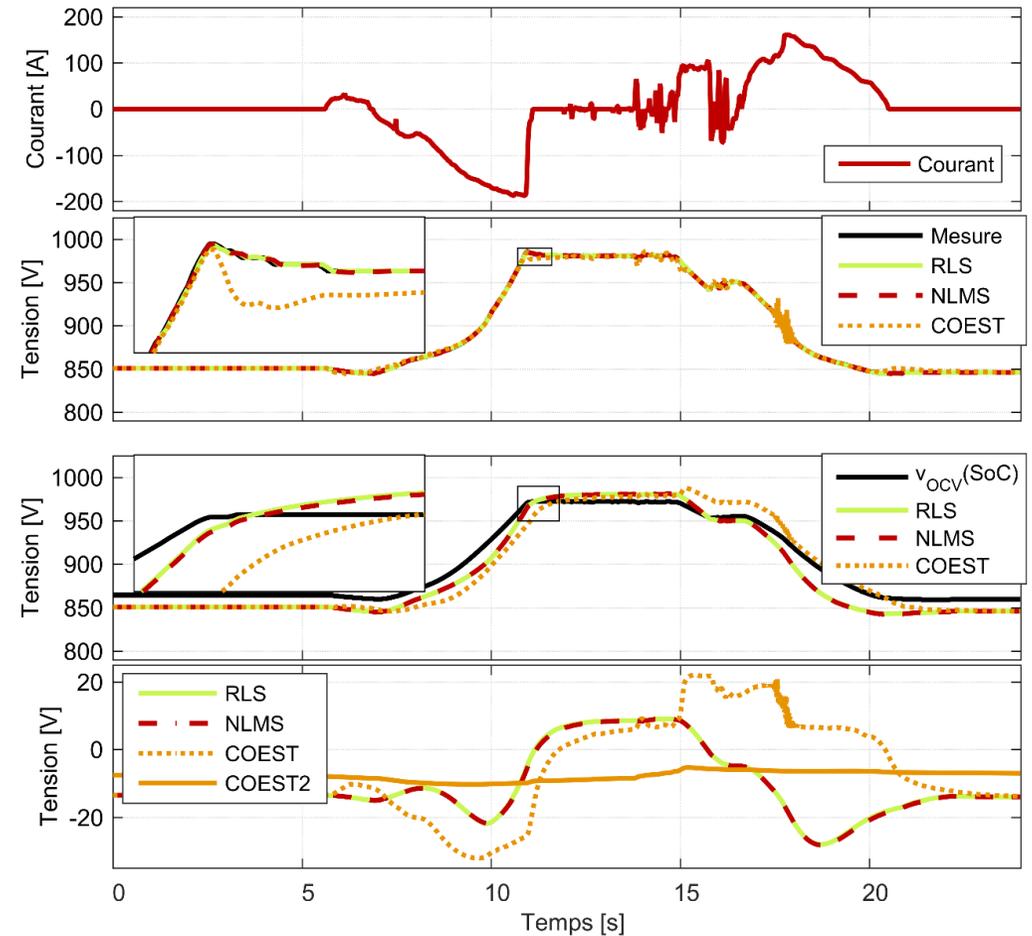
## RLS/NLMS + Kalman

- Estimation de tension précise
- Transformation FNJ – FNC peut être singulière

## Coestimation

- Estimation directe du circuit
- Vitesse d'ajustement contrôlable
- Stabilité non garantie

	RLS	NLMS	COEST	COEST 2
Erreur absolue moyenne	0,16 V	0,17 V	1,42 V	7,53 V
Erreur absolue médiane	0,03 V	0,07 V	0,51 V	6,85 V
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,31 V	0,39 V	2,91 V	9,29 V
Erreur absolue moyenne relative	0,018 %	0,019 %	0,157 %	0,843 %
Erreur absolue médiane relative	0,003 %	0,007 %	0,058 %	0,799 %



# OPTIMISATION DE LA GESTION DE PUISSANCE

## Répartition d'une consigne de puissance donnée

- Objectifs:
  - Minimiser les pertes instantanées

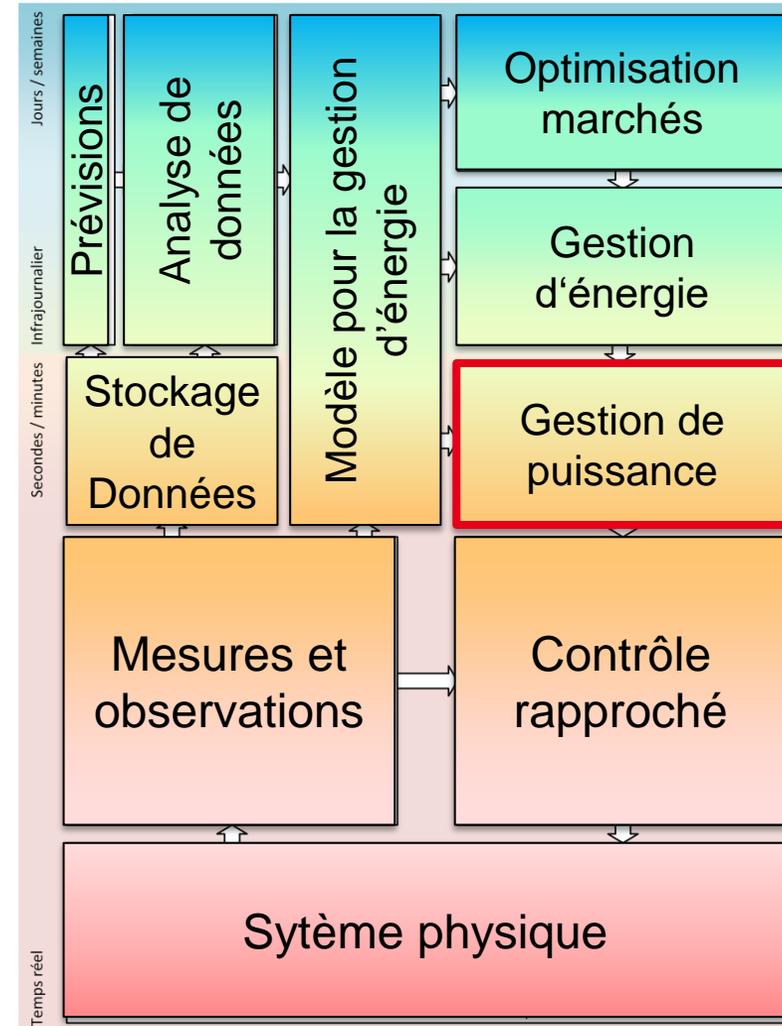
$$\min_{\delta} \sum_{i=1}^{N_B} \varepsilon_t^{B,i} - P_t^{B,i}$$

- Contraintes
  - Modèle de batterie
  - Limites de puissance
  - Respect de la consigne

$$\varepsilon_t^{B,i} = f_{\varepsilon}^i(P_t^{B,i})$$

$$P_t^{B,i, \min} \leq P_t^{B,i} = \delta^{B,i} \cdot P_{ESS,t}^* \leq P_t^{B,i, \max}$$

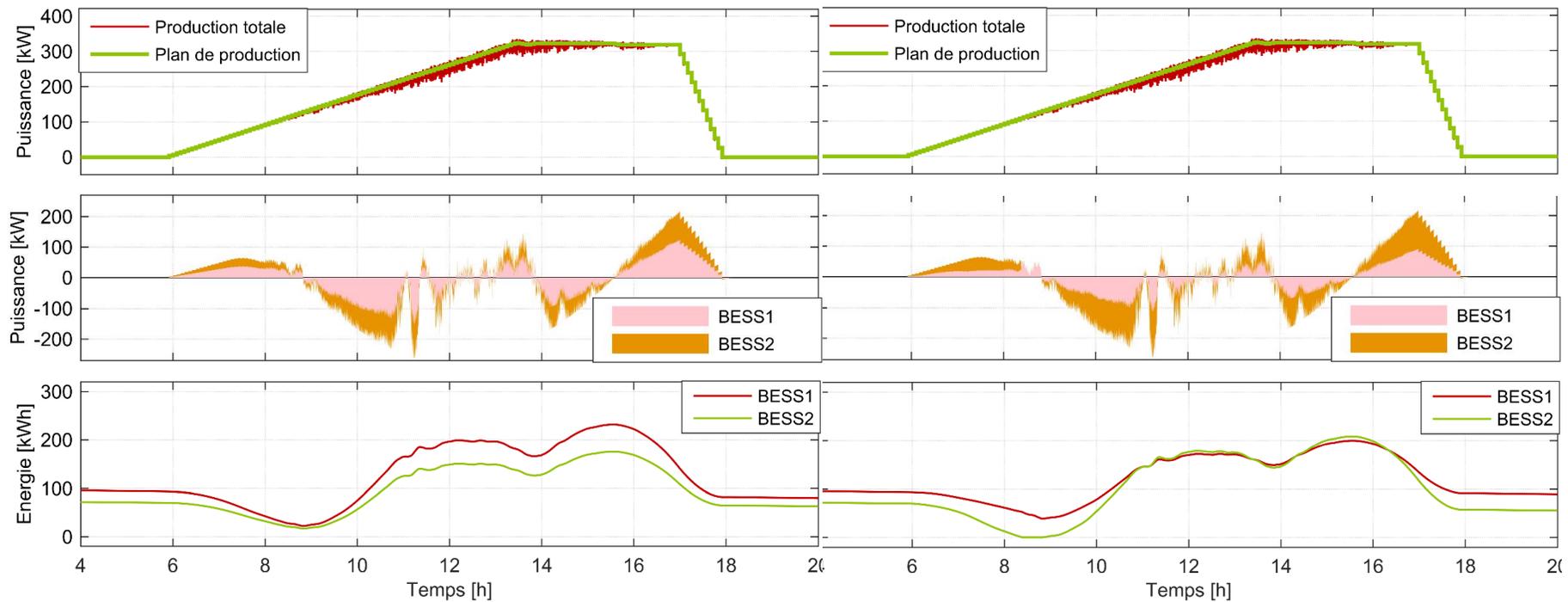
$$\sum_{i=1}^{N_B} \delta^{B,i} = 1$$



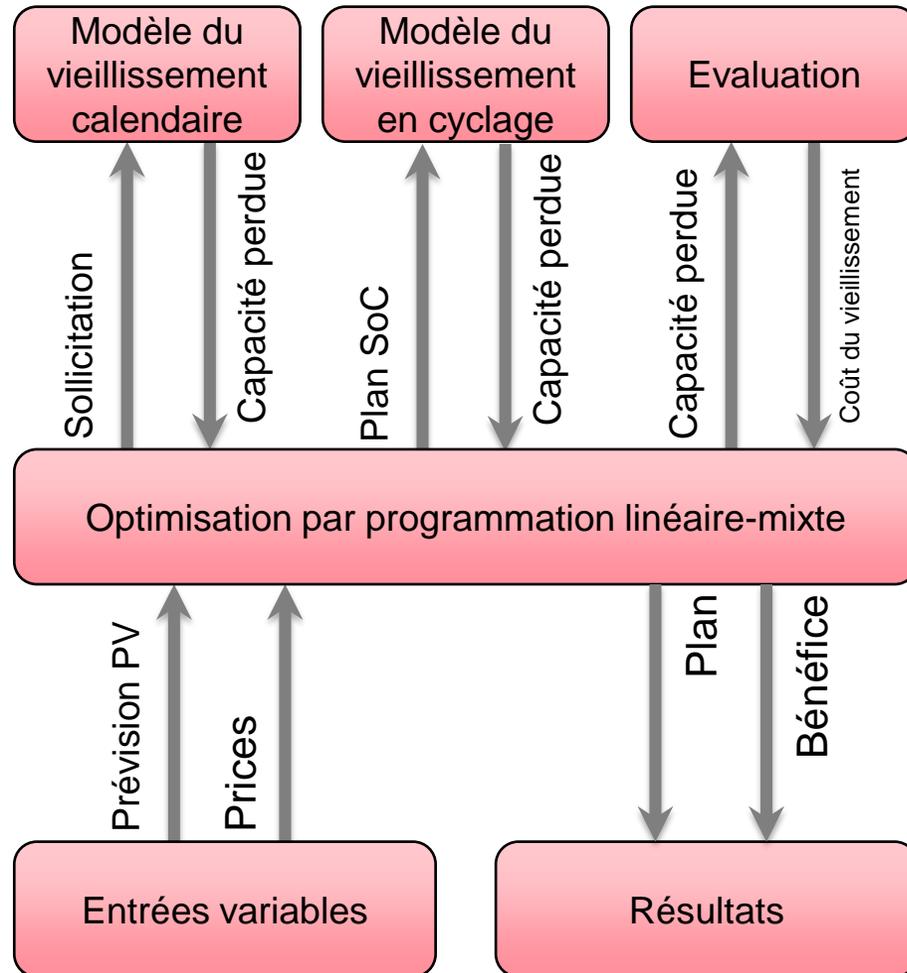
# OPTIMISATION DE LA RÉPARTITION DE PUISSANCE

## Répartition au prorata des puissance nominales

## Répartition optimisée

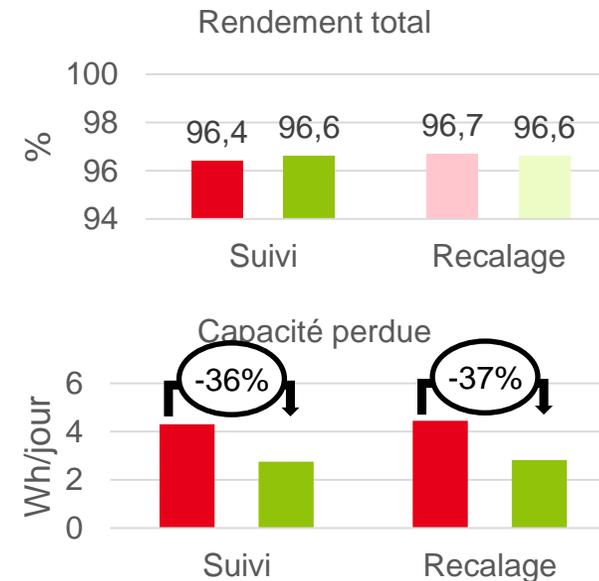


# OPTIMISATION POUR UN VIEILLISSEMENT MINIMAL



## Résultats

- ➔ Aucun impact négatif sur le rendement de la centrale
- ➔ Réduction de la capacité perdue par plus de 35%



## Conclusions

- **Un bel avenir pour le Li-ion**
  - baisse des coûts
  - amélioration de l'endurance
  - AMELIORATION DE L'INTEGRATION SYSTEME
  - Amélioration de la gestion

## Perspectives

- **Notre slogan: une batterie ne meurt pas elle est assassinée**
- **La connaissance de son comportement permet**
  - De dimensionner le système au plus juste
  - De maximiser sa durée de vie
  - De disposer d'indicateurs fiables pour l'exploitation
  - De disposer de modèles pour la commande optimale en exploitation

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Alternative Energies and Atomic Energy Commission  
17 av des martyrs 38000 GRENOBLE France  
<http://liten.cea.fr>

Établissement public à caractère industriel et commercial  
Public establishment with commercial and industrial character  
RCS Paris B 775 685 019

INES Site  
Institut National de l'Energie Solaire  
National Solar Energy Institute  
50 avenue du lac Léman  
73375 Le Bourget-du-Lac France  
+33 4 79 79 20 00