

LAAS-CNRS
Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS


**Défis de la transition énergétique:
*vers des systèmes de gestion de l'énergie
plus intelligents***

Marise BAFLEUR
Directrice de recherche CNRS

  Laboratoire conventionné avec l'Université de Toulouse

ENOVA, 12 mars 2015



 **Sommaire**

- **Présentation du LAAS-CNRS**
- **Contexte & Défis**
- **Activités de recherche du LAAS**
 - **Véhicules électriques**
 - **Intégration des énergies renouvelables en milieu urbain**
 - **Bâtiment et énergies renouvelables**
 - **Technologies de stockage**
 - **Internet de l'énergie**
- **Conclusion**

12 Mars 2015

ENOVA

2

LAAS-CNRS
Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS-CNRS

LAAS-CNRS

l'intelligence des systèmes

ADREAM
SYNERGY
ALIVE

Computer Science Robotics Automatic Control Micro and Nano Systems

Laboratoire conventionné avec l'Université de Toulouse

LAAS-CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS-CNRS

ADREAM
SYNERGY
ALIVE

Computer Science Robotics Automatic Control Micro and Nano Systems

INFORMATIQUE CRITIQUE

- Tolérance aux fautes et sûreté de fonctionnement informatique
- Vérification des systèmes temporisés critiques
- Ingénierie système et intégration

RESEAUX ET COMMUNICATIONS

- Services et architectures pour les réseaux avancés
- Calcul distribué et asynchronisme

ROBOTIQUE

- Mouvement des systèmes anthropomorphes
- Robotique, action et perception
- Robotique et interactions

DECISION ET OPTIMISATION

- Diagnostic, supervision et conduite qualitatifs
- Méthodes et algorithmes en commande
- Recherche opérationnelle, optimisation combinatoire et contraintes

MICRONANOBIOTECHNOLOGIES

- Nanobiosystèmes
- Microsystèmes d'analyse
- Matériaux et procédés pour la nanoélectronique
- Micro et nanosystèmes hyperfréquences fluidiques

GESTION DE L'ÉNERGIE

- Intégration de systèmes de gestion de l'énergie
- Energie et systèmes embarqués

HYPERFRÉQUENCES ET OPTIQUE

- Micro et nanosystèmes pour les communications
- Microondes et opto-microondes pour systèmes de télécommunications
- Optoélectronique pour les systèmes embarqués
- Photonique

NANOINGÉNIERIE ET INTÉGRATION

- Nanoingénierie et intégration des systèmes

ADREAM: Architectures dynamiques reconfigurables pour systèmes embarqués autonomes mobiles

ALIVE: Analyse des interactions avec le vivant et l'environnement

SYNERGY: Systèmes pour une gestion intelligente de l'énergie

12 Mars 2015 ENOVA

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Plateformes de recherche

- **Bâtiment instrumenté ADREAM (7 IT)**
 - “Living lab” de 1700m²
 - 6000 capteurs et actionneurs
 - Energies renouvelables (100kWc PV)
 - Géothermie
 - Stockage
 - Gestion optimisée de l'énergie
- **Plateforme Technologique RENATECH (24 IT)**
 - Intégration des systèmes : RF, puissance & photoniques
 - Micro-nano-systèmes pour la biologie & l'environnement
- **Plateforme de caractérisation (6 IT)**



12 Mars 2015





ENOVA

5

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Défis de la transition énergétique

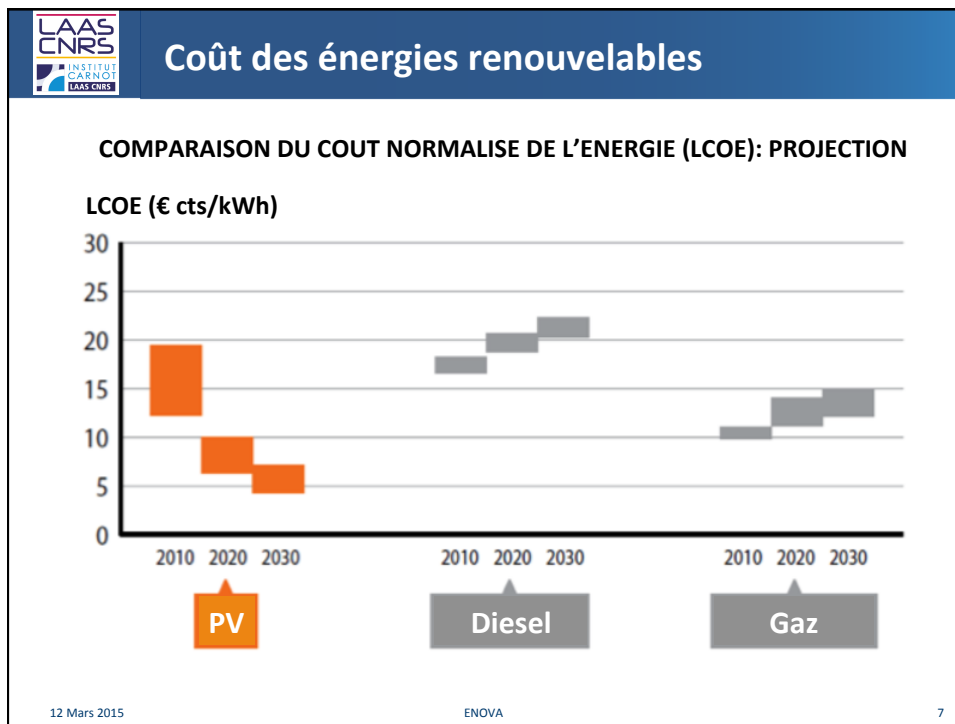



- **Horizon 2020:**
 - 20% réduction des gaz à effet de serre,
 - 20% amélioration de l'efficacité énergétique,
 - 20% augmentation de la part des énergies renouvelables.
- **Horizon 2030:**
 - 40% réduction des gaz à effet de serre,
 - 30% amélioration de l'efficacité énergétique,
 - 27% augmentation de la part des énergies renouvelables.

12 Mars 2015


ENOVA

6



LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Changement de paradigme



Trois conséquences majeures des énergies renouvelables:

- **Volatilité/intermittence de la production d'énergie**
- **Centrales de plus petite taille et plus décentralisées: changement de topologie du réseau**
- **Faible taille des centrales d'électricité renouvelable et coût d'investissement inférieur : transfert de la propriété des centrales électriques du service public vers le secteur privé**

Consommateur → consomm'acteur (prosumers)

12 Mars 2015

ENOVA

8

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Vers des réseaux électriques intelligents

Internet de l'Énergie: convergence des réseaux Internet et électriques

- Communication **bidirectionnelle** des données et de l'énergie
- Equilibrage en **temps réel** entre **génération, stockage et demande en énergie**

3^{ème} Révolution Industrielle

12 Mars 2015 9

ENOVA

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Piliers de la 3^{ème} Révolution Industrielle

3^{ème} Révolution Industrielle

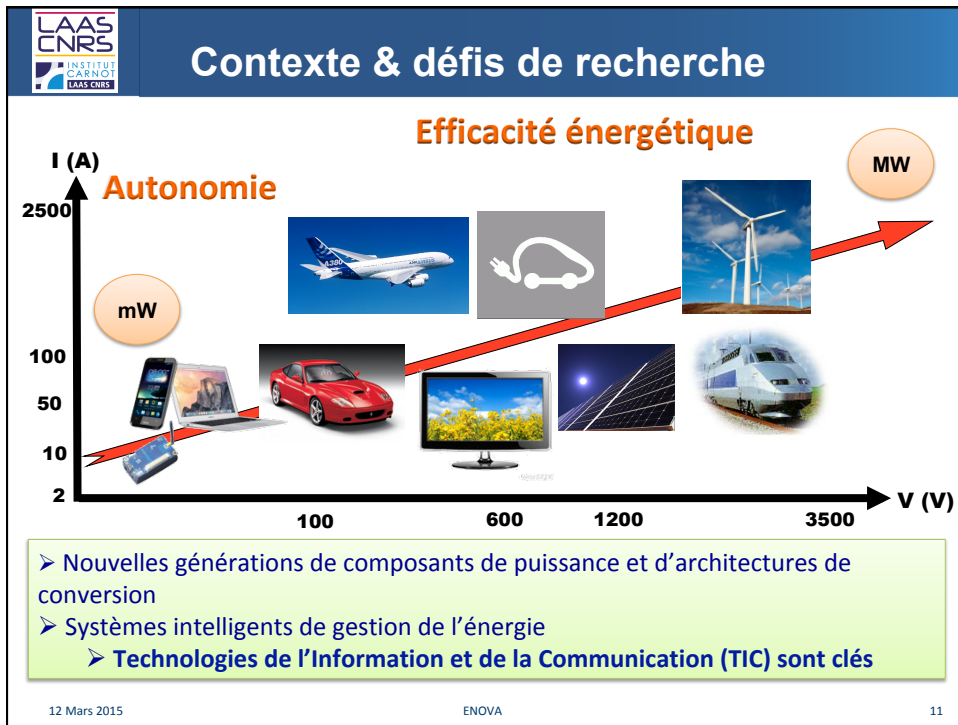
| | | | | |
|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Energies Renouvelables | Bâtiments Producteurs d'énergie | Technologies de Stockage | Véhicules Electriques | Internet de l'Énergie |
|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|

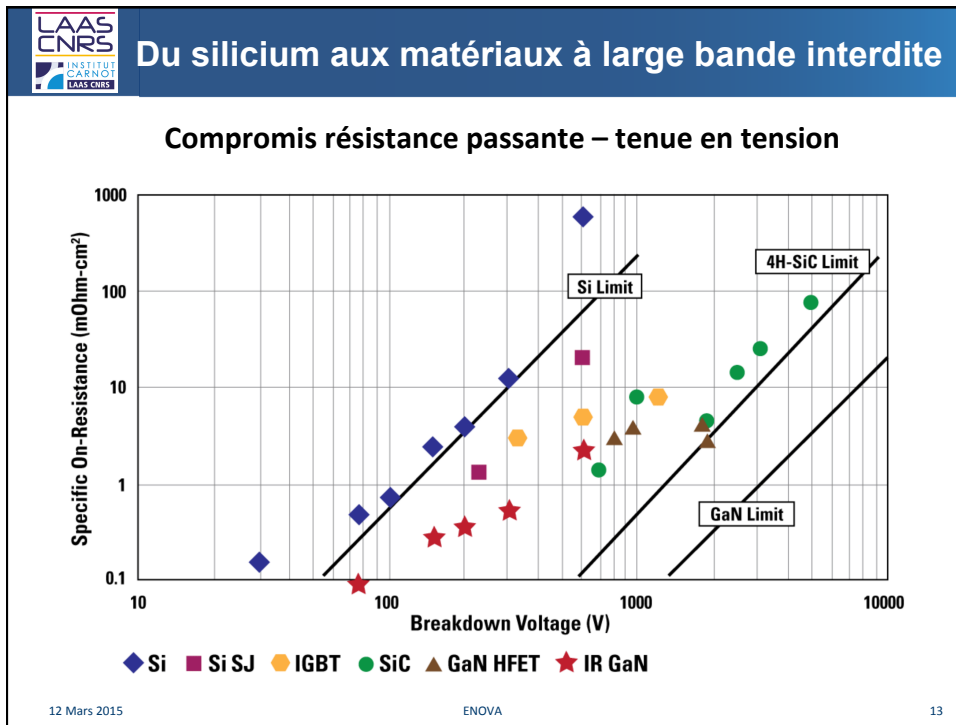
Synergies

mW **Efficacité Énergétique** **MW**

12 Mars 2015 10

ENOVA





Composants de puissance GaN sur silicium

1^{er} composant de puissance GaN HEMTs sur substrats silicium 6"

Source Drain Gate

ANR ToPoGaN1

Excellentes performances :

- $I_{dmax} = 0.5 \text{ A/mm}$
- $R_{on} = 2.5 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$
- $BV_{HEMT} > 600 \text{ V}$

$I_d \text{ (A/mm)}$ vs $V_{ds} \text{ (V)}$

$BV_{epi} \geq 900 \text{ V}$

$BV_{HEMT} = 620 \text{ V}$

Partenaires: CEA LETI, FREESCALE, CRHEA, IMN, SOITEC, Thales 3-5 Lab, LTM, G2ELAB

Prochains défis:

- Composant GaN HEMTs "normally-off"
 - Nouvelle architecture (2 brevets)
 - Verrous technologiques
 - Création d'une start-up

Source Gate Drain

AlGaN

UID-GaN P-GaN

Transition layers

Silicon substrate

EXAGAN
Accelerate Power Transition₁₄


12 Mars 2015 ENOVA

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Impact des matériaux à grand gap sur les performances

- **Objectifs:** *miniaturisation et augmentation des performances*
 - Exemple d'architecture optimisée

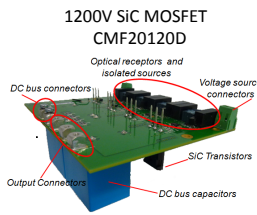
CRIGG Project



GaN EPC1001

Band Gaps vs Si:
27% réduction des pertes
~10% réduction du volume

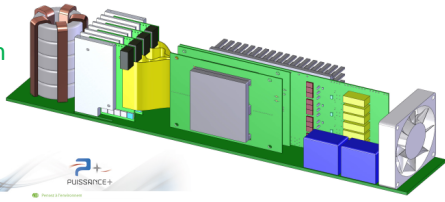
1200V SiC MOSFET
CMF20120D



Optical receptors and isolated sources
Voltage source connectors
DC bus connectors
Output Connectors
SiC Transistors
DC bus capacitors

Conception d'un convertisseur DC-DC pour applications avioniques

GaN
Basse tension



SiC
Haute tension

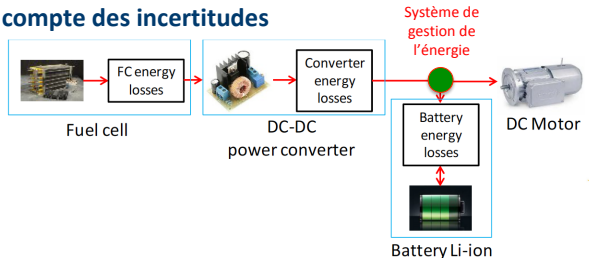
PHI POWER HYBRID INTEGRATION
Laplace
PUSSANCE+

15

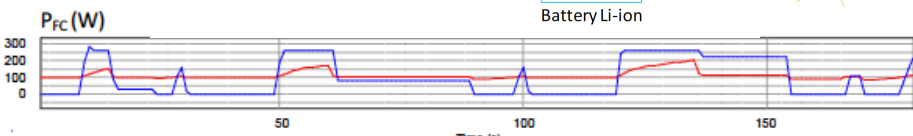
LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Gestion de l'énergie dans un véhicule électrique

- **Projets:** NEXTER 2012–2014. Partner: LAPLACE, ECOS-CONICYT
- **Problème:** allocation des sources d'énergie pour un profil de mission donné
 - Modèles combinatoires – linéaires par morceaux et non-linéaires
 - Prise en compte des incertitudes



Fuel cell → FC energy losses → DC-DC power converter → Convert energy losses → Système de gestion de l'énergie → Battery Li-ion → Battery energy losses → DC Motor



$P_{FC} (W)$ vs Time (s)

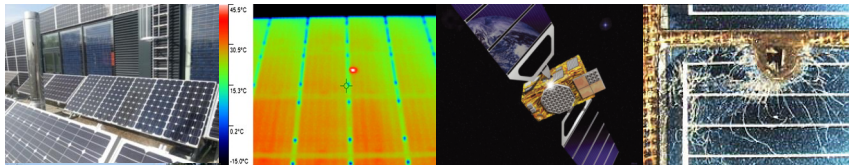
Puissance délivrée par la pile à combustible avec et sans système de gestion de l'énergie (24% de gain sur une journée)

12 Mars 2015 ENOVA **Contact: Pierre Lopez** 16

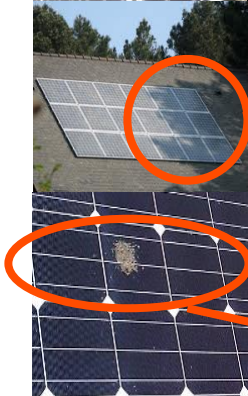
Intégration des énergies renouvelables en milieu urbain



Impact des défauts du générateur photovoltaïque



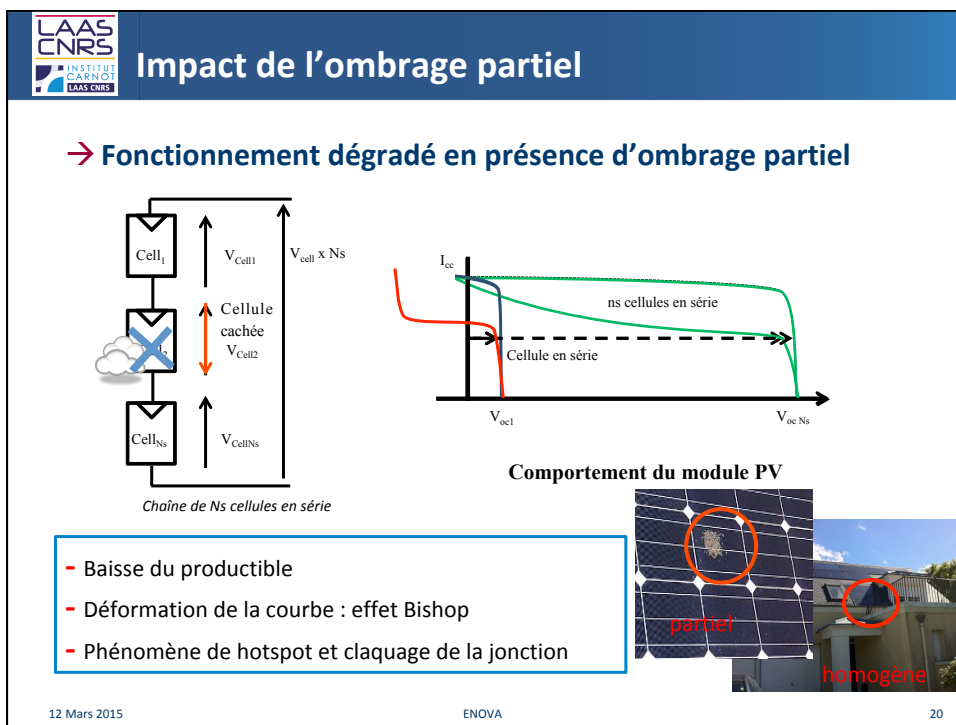
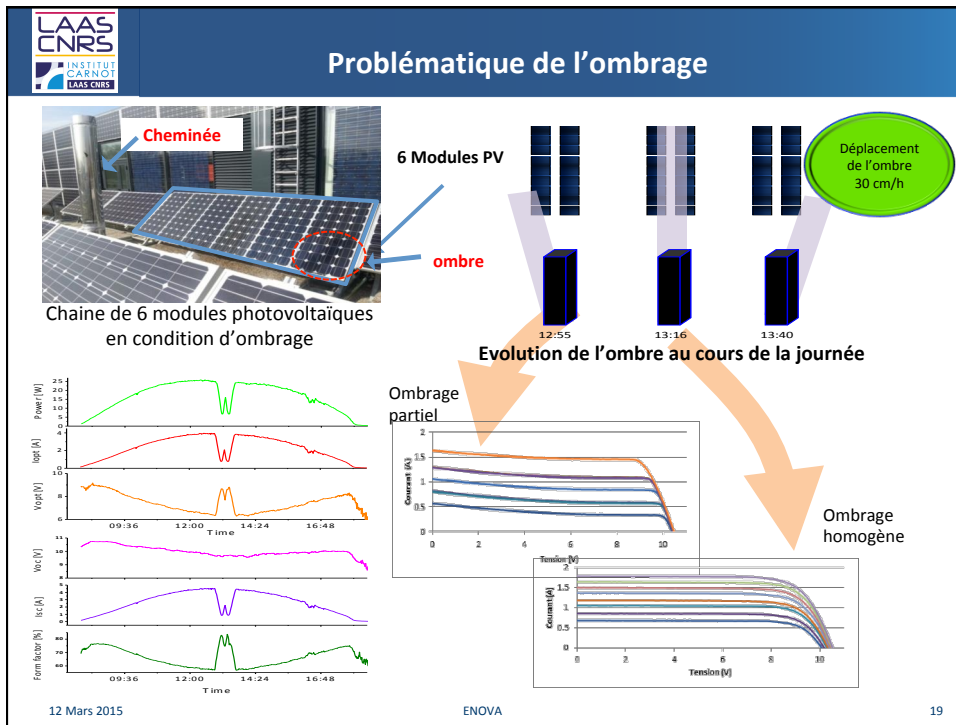
Gains de puissance estimés sur des sources PV par NREL LAB

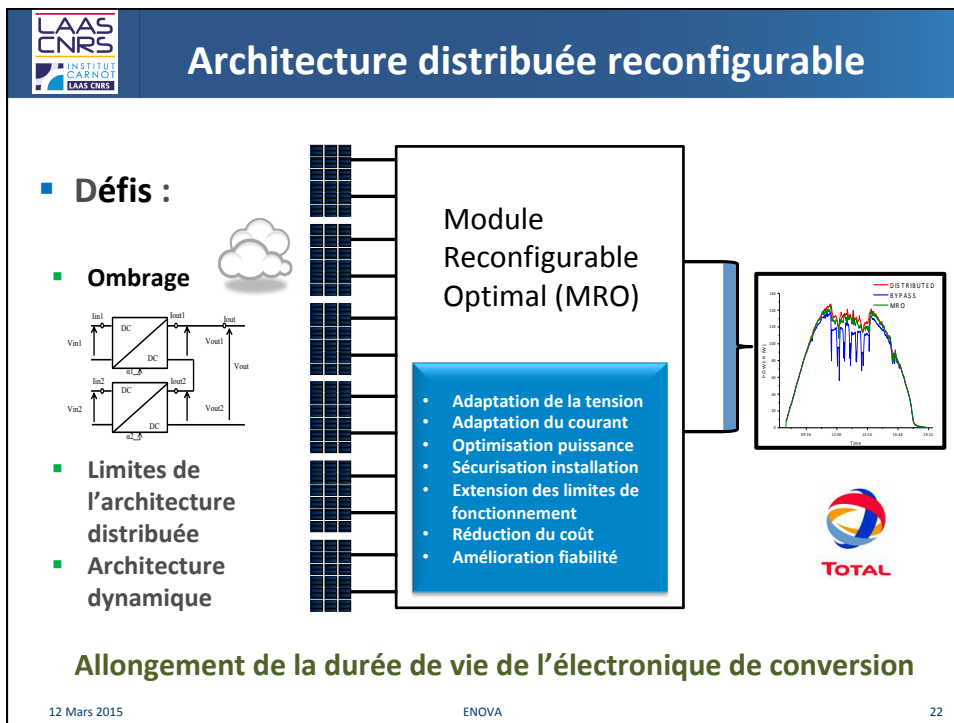
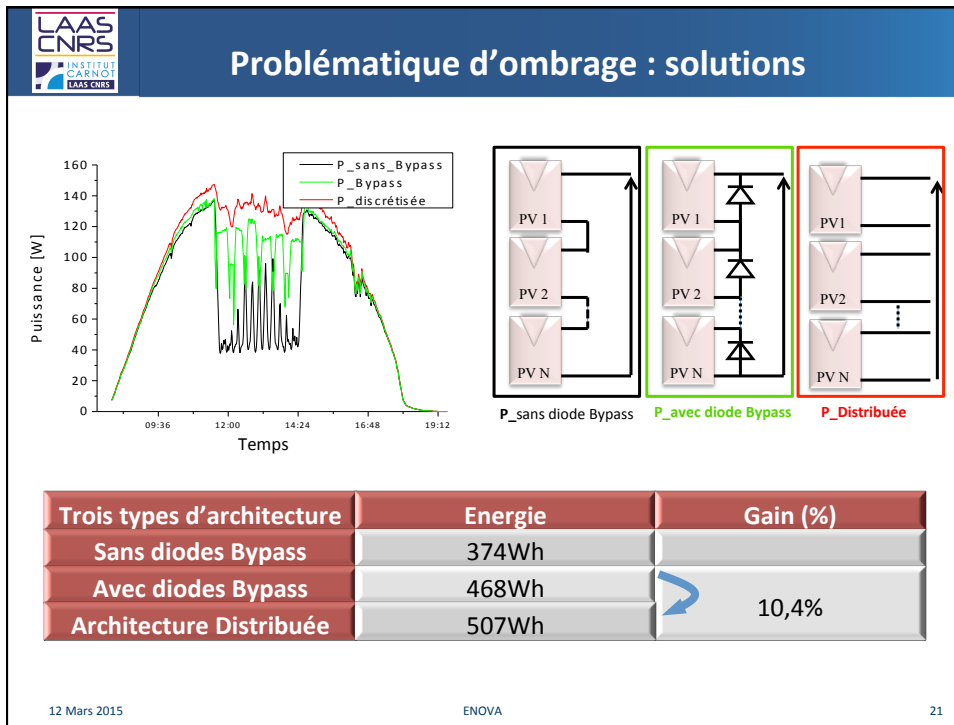



| Type de désadaptation | Pertes | Gain potentiel de rendement du DC-DC |
|----------------------------------------|----------|--------------------------------------|
| Ombrage résidentiel toit, un string | 5-15% | +15-20% de pertes |
| Ombrage résidentiel toit, multi-string | 5-20% | +20-30% de pertes |
| Système commercial | 1-5% | + 30-40% de pertes |
| Orientation | 5-20% | +100% de pertes |
| I_{opt} | 0,2-1% | +100% de pertes |
| Salissures | 1,5-6,2% | +15-40% de pertes |

Collaboration LAAS- TOTAL SA, Thèse de Youssef EL BASRI







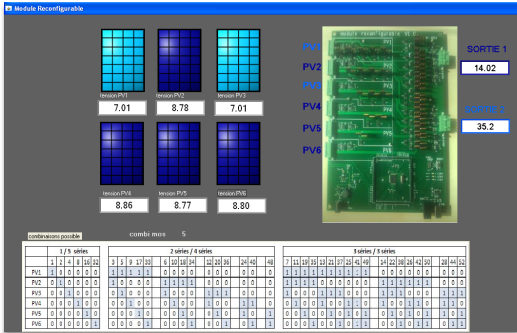


Architecture distribuée reconfigurable

Principe

- Discretisation des convertisseurs DC-DC
- Module de contrôle et de supervision (MRO)
- Reconfiguration dynamique des connexions entre entrées et sorties
- Optimisation de la configuration de la source PV en minimisant l'usage du nombre de convertisseurs
- Réduction globale du coût de la source d'énergie PV

Exemple de prototype de RM avec 6 entrées et 2 sorties





| | Connexion classique série | Architecture distribuée 6 DC-DC | Architecture distribuée 2 DC-DC |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Puissance | 237 W | 268 W | 262 W |
| Gain | | +11,5% | +9,58% |
| Coût | | 0,15€ | 0,10€ |

12 Mars 2015


ENOVA

Thèse de Y. El Basri
Deux brevets 2008 et 2013





Bâtiment et énergies renouvelables



12 Mars 2015

ENOVA

24

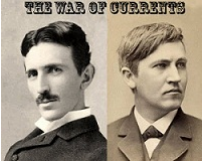
12

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

“The war of currents”: la revanche d’Edison

AC (courant alternatif) versus DC (courant continu)

- **Augmentation de la production d’électricité renouvelable en local et en site éloigné:** éolien off-fermes PV, installations PV privées, etc
 - Transport DC est le seul économiquement viable sur de longues distances
 - Le photovoltaïque fournit de l’énergie en courant continu
- **De plus en plus d’équipements fonctionnent en DC:** informatique, éclairage à LED, téléphones portables, etc
 - Elimination de la conversion AC/DC: réduction des pertes de **10-20%**
 - Transport en DC depuis la sous-station (MV): réduction supplémentaire des pertes → Verrou: disjoncteur DC
- **Batteries (véhicule électrique, stockage pour le PV) fonctionnent en DC**
- **Distribution DC:**
 - Meilleure capacité par ligne de puissance → plus faible coût
 - Contrôle moins complexe → meilleure stabilité et fiabilité du réseau



12 Mars 2015 ENOVA 25

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Avantages et défis d’un micro-réseau DC


Avantages

- Meilleure efficacité énergétique
- Meilleure qualité de l’énergie
- Equipements moins encombrants
- Contrôle moins complexe
- Coûts plus faibles

Défis

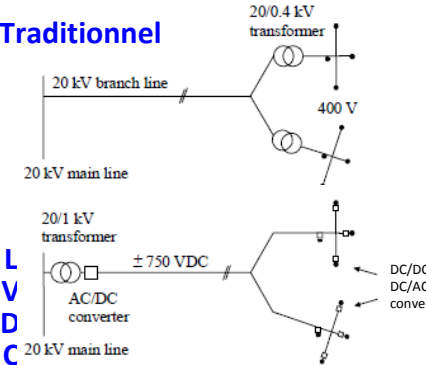
- Architecture (unipolaire/bipolaire, protection, retour de masse, etc)
- Convertisseurs bidirectionnels, compteurs DC
- Convertisseurs DC-DC usagers
- Normes et réglementations → Tension?
- Prises/connecteurs
- Disjoncteur DC
- Gestion associée

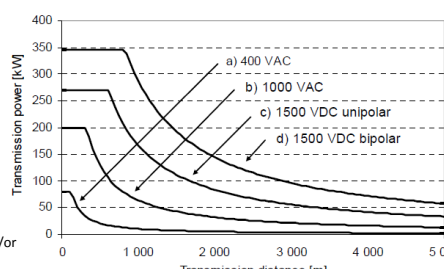
12 Mars 2015 ENOVA 26



Réseau traditionnel versus réseau LVDC

Traditionnel





Transmission powers using 3*35+50 mm² cable in AC and DC distribution systems. Maximum voltage drop 6%

LVDC

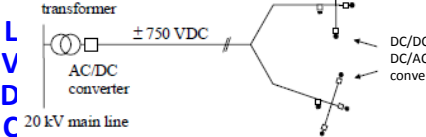



Table 3. Costs of the traditional 20/0.4 kV and ± 750 VDC bipolar distribution systems.

| Cost factor | Traditional 20/0.4 V distribution system | Bipolar ± 750 VDC distribution system | Cost difference |
|-------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Investments [k€] | 104 | 45 | 59 |
| Losses [k€] | 9 | 19 | -10 |
| Outages [k€] | 47 | 0 | 47 |
| Fault repair [k€] | 7 | 3 | 5 |
| Maintenance [k€] | 8 | 3 | 5 |
| Total [k€] | 176 | 70 | 106 |


Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi and Jarmo Partanen, An LVDC Distribution System Concept, NORPIE/2008, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 9-11, 2008

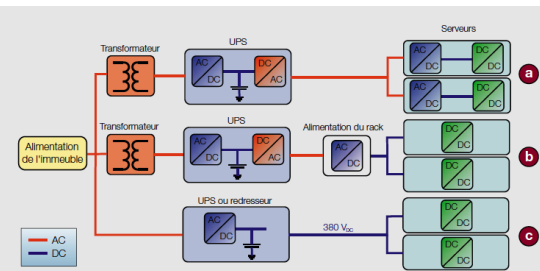
12 Mars 2015
ENOVA
27

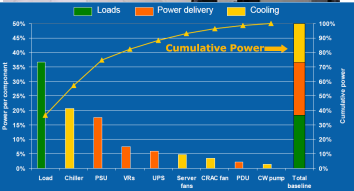


Réseau DC: application à un centre de calcul

- ~ 7,1 TWh/an consommés par les UPS (Uninterruptible Power Supply ou alimentations sans interruption) qui engendrent deux conversions : AC/DC et DC/AC en Californie*.







- Réseau DC: baisse potentielle de consommation de 7 à 28%****

* Fortenbery, Brian, Ecos Consulting EPRI, and William Tschudi. DC power for improved data center efficiency. (2008)
 ** Affolter, J. F., B. Chappuis, and L. Rigazzi. Réseaux de distribution basse tension en courant continu. Bulletin SEV/VSE (2014): 39-44.

ENOVA
29

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Réseau DC basse tension à haut rendement dans l'habitat

Energie solaire Storage ...

To/from mains

Command bus

DC power bus

Sensors (light, presence...)

General lighting (LEDs)

O-LEDs

Task lighting (OLEDs)

Daylight

Electrochromic window and PV production

Controlle Naturel Lumière

Centralized Command

neCampus

UNIVERSITÉ TOULOUSE III PAUL SABATIER

SH&AD

Laplace

30

LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Projet ADEME ABCDE (2014-2017)

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

- **Cadre**
Rénovation d'un bâtiment patrimonial à **AUCH**
100% autonome en énergie
- **Objectifs**
 - **Création d'un bus courant continu appliqué à de l'éclairage et de l'informatique:** *optimisation des transferts d'énergie et des puissances d'éclairage en fonction de l'heure, la date et la présence des habitants*
 - Eclairage à LED/OLED
 - Alimentation directe en DC des processeurs informatiques
 - Source photovoltaïque + stockage
 - Système de supervision

LABORATOIRE PHASE

SH&AD

Laplace

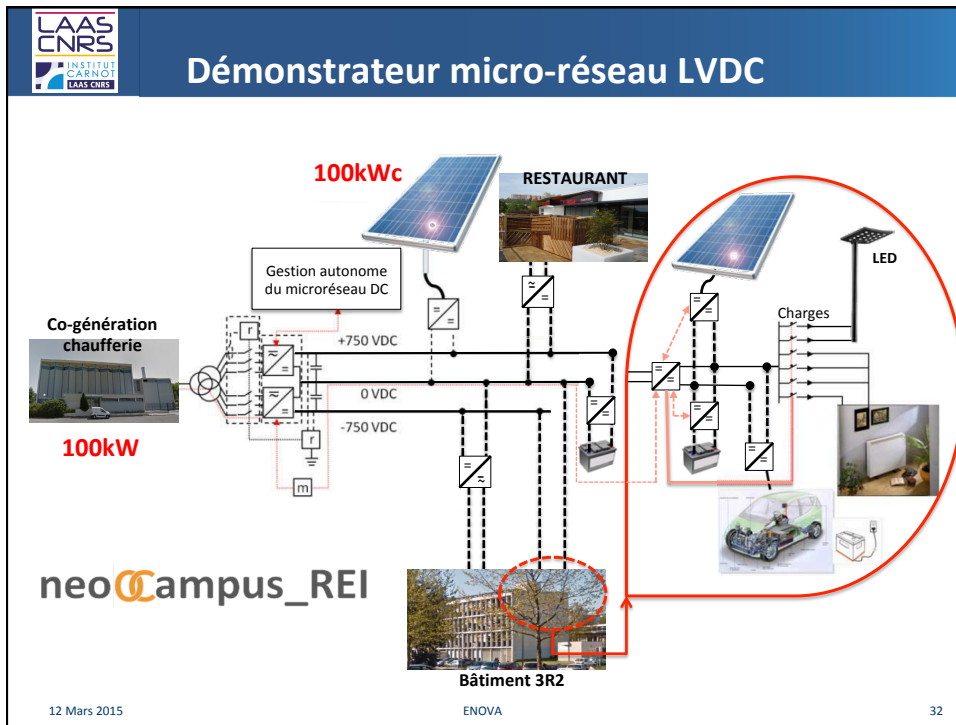
ADDENDA

CERTOP

grand AUCH AGGLOMERATION

12 Mars 2015

31



Stockage

- **Couplage indispensable avec les énergies renouvelables**
- **Quel rôle?** Effacement court (lissage production PV), stockage de masse
- **Batteries/H₂ mais aussi stockage froid/chaud**
- **Coût (≠ loi de Moore)**
- **“Killer application”**: véhicule électrique
- **Gros enjeux matériaux**: Li-air (1000Wh/kg), Na-ion (stockage réseau), Li-S (600Wh/kg)

Internet de l'énergie



LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS

Réseau électrique intelligent : *Smart grid*

Infrastructure TIC

Infrastructure électrique

“Intégration et convergence de l’infrastructure électrique avec de l’intelligence embarquée (logiciels, automatismes, traitement de l’information) et des moyens fiables de communication” – SmartGrids, JC. Sabonnadière, N. Hadjsaïd, EGEM, 2012

12 Mars 2015 ENOVA 36

LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS

Domaines de l’Internet de l’énergie

Electricity Generation

- Wind Turbine
- Solar Panel

Communication Ecosystem

- Contact
- Contactless
- Back-end
- Cloud
- Grid

Building Energy Manager

- Electric Vehicle
- Storage
- Charging Station
- Appliances
- Temperature

Energy Displays

- TV, Data Display
- Energy Displays


Heat

Electric Appliances


Gas

Water

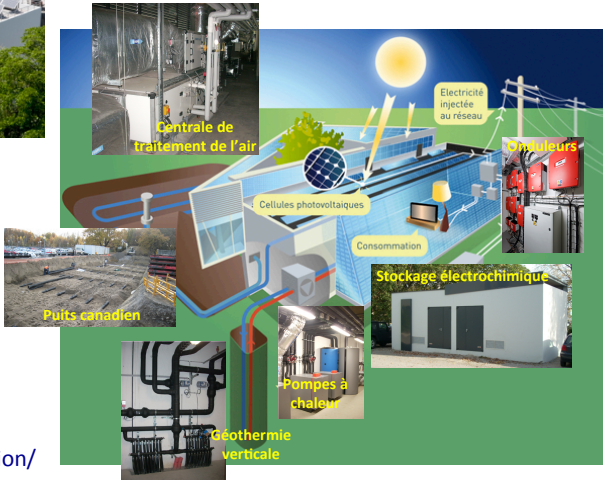
Valves



Micro-réseau du LAAS



- **100kWc photovoltaïque**
- **Géothermie:**
 - Puits canadien
 - Géothermie verticale
 - Pompes à chaleur
- **Stockage:**
 - Batteries plomb
 - Batteries Li-ion
 - Supercondensateurs
- **Trois automates:**
 - Éclairage, CTA, production/consommation d'énergie



ENOVA

12 Mars 2015
38



Micro-réseau du LAAS

| Date | Événement | Libellé | Équipement |
|----------------------|---------------------------|--------------------|----------------|
| 09/01/15 11:56:43 | Alarme disparite non acq. | Absence réseau EDF | Onduleur SMA 1 |
| 03/01/15 23:50:19 | Alarme disparite non acq. | Absence réseau EDF | Onduleur SMA 2 |
| 03/01/15 23:50:19 | Alarme disparite non acq. | Absence réseau EDF | Onduleur SMA 3 |



Station météo

12.5 °C

81.1 %Hr

1022.9 mBar

364.2 W/m²

Synthèse production:

Puissance: 51904 W

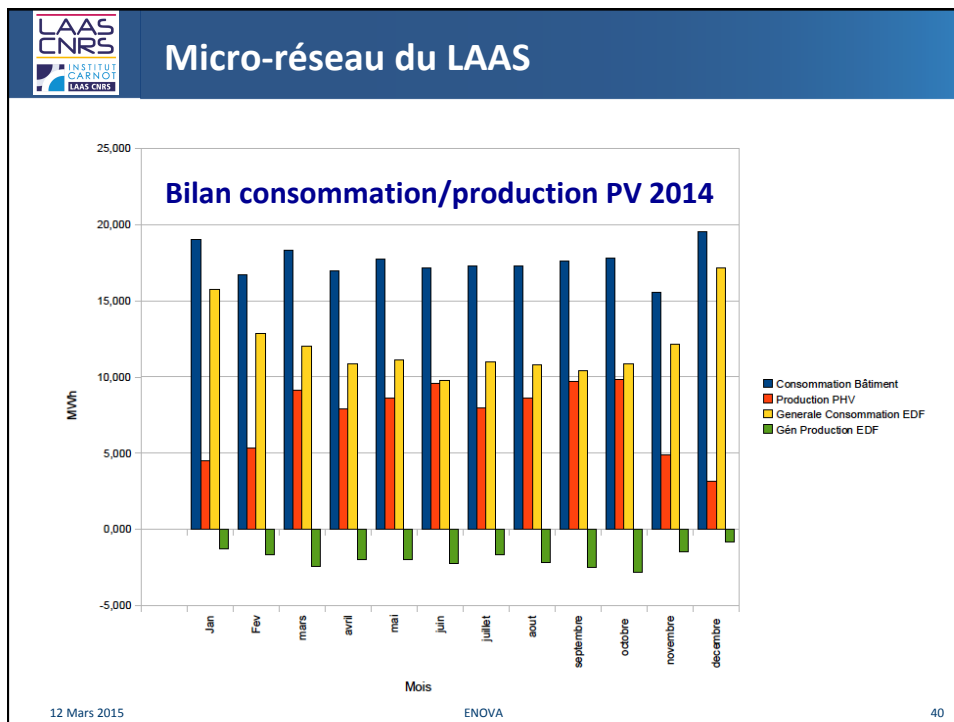
Energie Totale: 260.47 MWh

CO² Evités : 23.14 Tonnes

58190 W

51904 W

12 Mars 2015
ENOVA
39

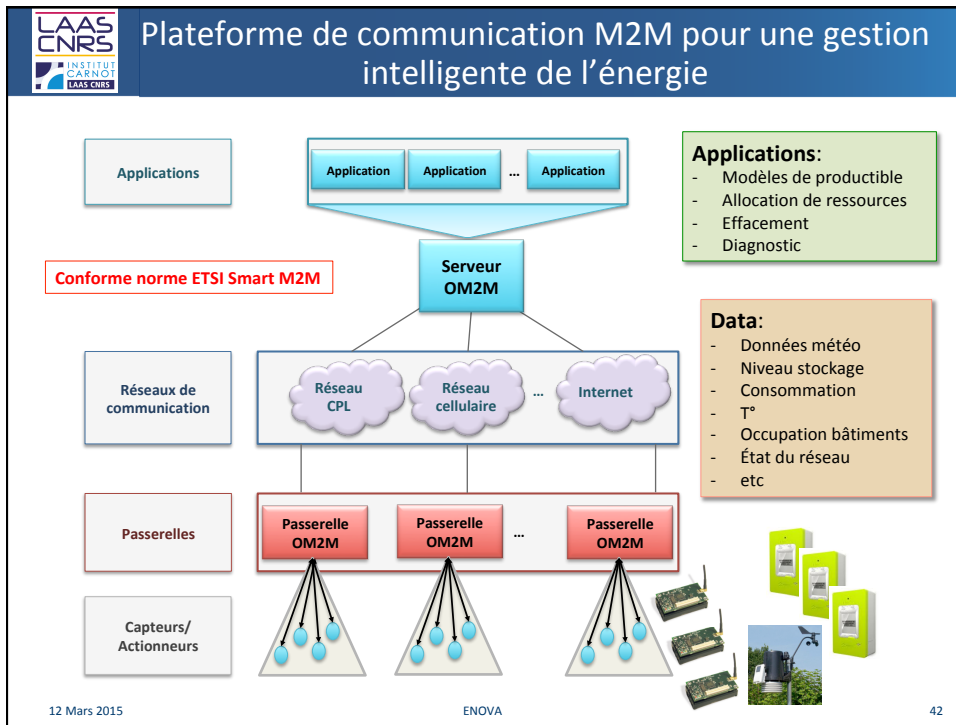


LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Gestion d'un micro-réseau ou d'un smart grid

- **Automatisation**
 - Données traduites en informations **en temps réel** pour **diagnostiquer** des problèmes instantanément et identifier les **actions correctives** à exécuter dynamiquement. **Boucles de retour** vérifient que l'action a produit l'effet désiré.
- **Caractéristiques:**
 - Auto-cicatrisation
 - Flexibilité
 - Prédiction
 - Interactivité
 - Optimisation
 - Sécurité

12 Mars 2015 ENOVA 41

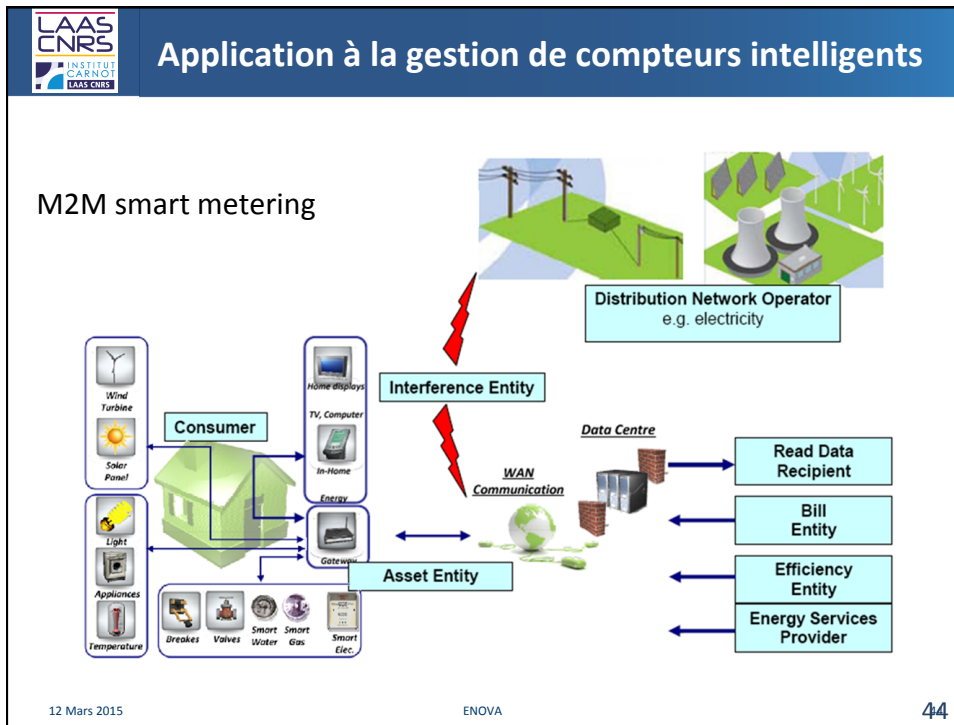


LAAS CNRS
INSTITUT CARNOT
LAAS CNRS

Plateforme OM2M et bâtiment ADREAM

- **Déploiement dans l'appartement de démo**
 - Boucle autonome d'optimisation de l'énergie et amélioration du confort des usagers
 - Système d'alerte sur le parking pour la gestion de camions de livraison

12 Mars 2015 43



LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS

Application à la gestion de compteurs intelligents

- **Scénarios d'usage d'un compteur intelligent:**
 - Obtention des données
 - Installation, Configuration & Maintenance du système d'information du compteur
 - Support d'une fonctionnalité de pré-paiement
 - Gestion du réseau de distribution à l'aide du système d'information fourni par les compteurs intelligents
 - Gestion de la mise en oeuvre des tarifs
 - Interaction avec des équipements dans le bâtiment
 - Optimisation de la consommation
 - Affichage de messages sur la consommation, conseils
 - Etc
- **Machine to Machine: M2M est la capacité pour des machines des communiquer en temps réel sans intervention humaine pour rationaliser des processus, optimiser la gestion de ressources et réinventer les procédures de fonctionnement.**

The diagram shows the Linky system architecture. It starts with **Linky** meters connected to a **Concentrator**, which then connects to a **Supervision** system. The system also includes **OPES** and **OPFL** components.

12 Mars 2015 ENOVA 45

LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS

M2M/IoT Services and Networks

ITEA2 A2NETS: Autonomic M2M Networks applied to smart metering

OM2M Connecting things

Projects: ECLIPSE OM2M.org (since 2013), ITEA2 A2NETS Project (2011-2014)

12 Mars 2015 ENOVA 46

LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS

Ordonnement de production avec contraintes de coûts énergétiques

- **Cas d'étude:** Fonderies / acieries: minimiser les coûts de dépassement et/ou suivre une courbe de consommation négociée
- **Approche hybride:** modèles mixtes de programmation linéaire en nombres entiers à temps continus (ordo) et périodes discrètes (prise en compte de l'énergie)

Projet CNRS PIE Energie 2008-2010
Collab. : LGC, ISAE

12 Mars 2015 ENOVA 47

LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS

Smart grid et cybersécurité

- *«La superposition de l'infrastructure du réseau électrique et des systèmes d'information et de communication modernes augmente considérablement les vulnérabilités et les points d'accès que les criminels et les terroristes peuvent utiliser pour attaquer le système électrique»*

(source: http://www.css.drdc-rddc.gc.ca/pstp/proj-prop/call-appel/security-securite/security-securite_02-fra.asp)

- *«La cyber-sécurité devrait représenter un marché de \$21 milliards entre 2010 et 2015 avec un revenu annuel de \$3,7 milliards en 2015. Les investissements relatifs à la sécurité devraient correspondre à 15% de l'investissement total dans le Smart Grid.»*

(source: <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/64468.htm>)

12 Mars 2015 ENOVA 48

LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS


Smart grid et cybersécurité

Le système SCADA










- **Exemple des vers stuxnet:**
- *C'est le premier ver découvert qui espionne et reprogramme des systèmes industriels, ce qui comporte un risque élevé. Il a été écrit spécifiquement pour attaquer les systèmes SCADA qui sont utilisés pour le contrôle commande .*
- *«Un porte-parole de Siemens a indiqué que le ver avait été trouvé sur 15 systèmes dont 5 sont situés en Allemagne dans des usines abritant des systèmes de contrôle de processus industriels»*

12 Mars 2015 ENOVA 49



CRUTIAL: Critical Utility InfrastructurAL resilience


- **Projet FP6 : 2006-2009** 
- **Focus sur les infrastructures électriques et de l'information et leurs interdépendances**
 - Contrôle résilient distribué de l'énergie malgré les menaces sur les infrastructures d'information et de contrôle
- **Contributions du LAAS**
 - Approches de modélisation de la résilience
 - Interdépendances liées à des défaillances (cascade, escalade, ...)
 - Menaces accidentelles et malveillantes
 - Architectures Distribuées assurant un contrôle et une gestion du réseau électrique fiable
 - Contrôle d'accès collaboratif (PolyOrbac)

12 Mars 2015

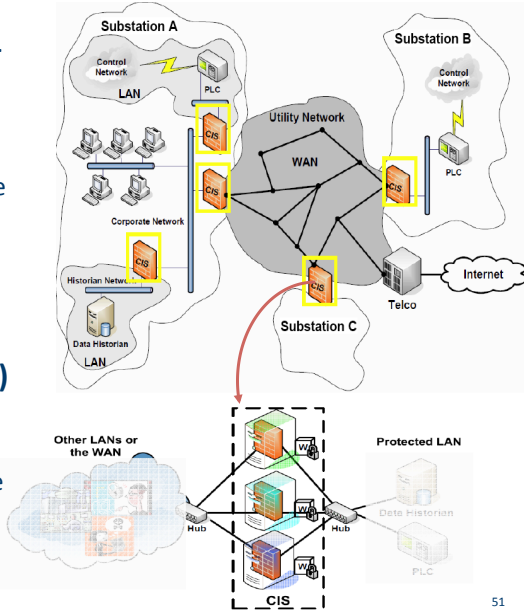
ENOVA

50



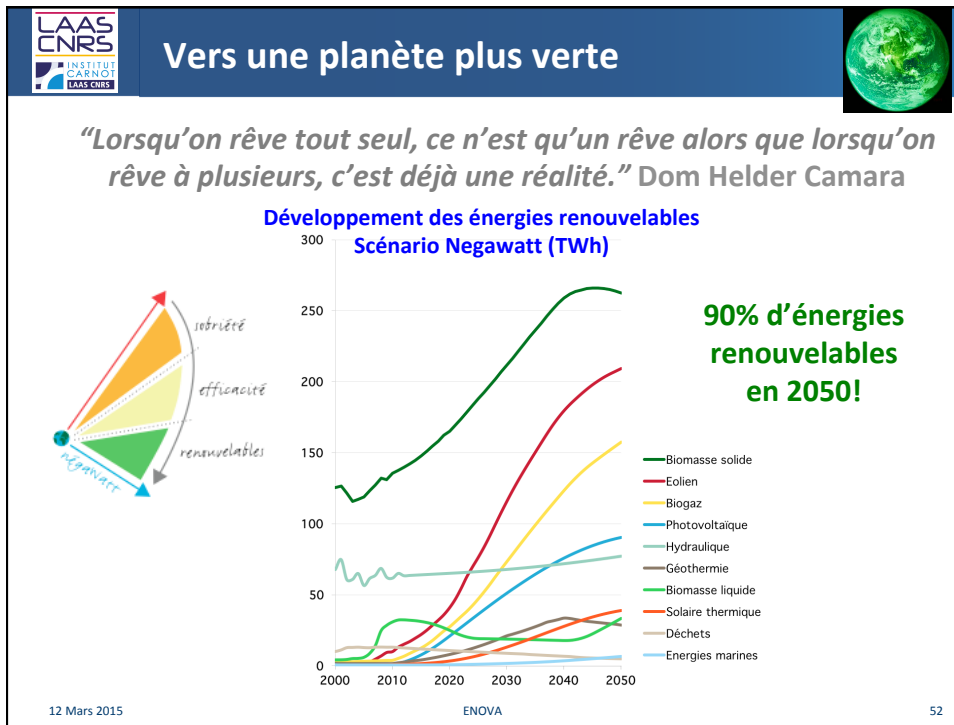
Cybersécurité

- **Architecture basée sur des réseaux de réseaux (WAN-of-LANs)**
 - Chaque LAN représente une facilité d'infrastructure critique
 - Un WAN non-fiable interconnecte tous les LANs
- **Chaque LAN protégé par une passerelle intelligente CIS (CRUTIAL Information Switch)**
 - Politiques de sécurité grain fin (PolyOrBac)
 - Mécanismes de protection contre les fautes et tolérants aux intrusions



12 Mars 2015

51



LAAS CNRS INSTITUT CARNOT LAAS CNRS

Remerciements

- **Corinne Alonso, Christian Artigues, Christelle Ecrepont, Youssef El Basri, Mohamed Kaaniche, Thierry Monteil, Samir Medjiah, Frédéric Morancho, Pierre Lopez, Henri Schneider, Lionel Séguier**



12 Mars 2015 53

