

Sommaire

Présentation du LAAS	2
Les systèmes étudiés au LAAS.....	3

Autour d'Adream : énergie et systèmes cyberphysiques

Démo 1 - Le bâtiment intelligent Adream, pour la gestion et l'optimisation de l'énergie	4
Démo 2 - Robots assistants et équipiers de l'Homme	5
Démo 3 - Coopération entre drones et robots terrestres pour la surveillance d'environnement	7
Démo 4 - Conception et autonomie énergétique de nouveaux réseaux de capteurs sans fil : application à l'aéronautique	8
Démo 5 - Domotique médicale : surveillance multicapteurs pour la localisation et la détection de chute des personnes âgées	9
Démo 6 - Gestion autonome de la communication de machine à machine (M2M) : application à l'économie d'énergie	10

Energie

Démo 7 - Matériaux énergétiques - Récupération d'énergie ambiante pour l'alimentation des objets communicants connectés sans fil	11
---	----

Micro et nanosystèmes

Démo 8 - Introduction à la microélectronique et aux nanosystèmes.....	12
Démo 9 - Comment naissent les puces électroniques ? Fabrication de micro et nano composants dans la salle blanche	14

<i>Parcours jeunes</i>	18
------------------------------	----

Présentation du LAAS-CNRS

Le laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS) est l'un des plus importants laboratoires de recherche du CNRS (Centre national de la recherche scientifique). Associé à l'Université de Toulouse, il abrite 650 personnes. 22 équipes contribuent aux recherches en sciences et technologies de l'information, de la communication et des systèmes dans quatre grands domaines :

- **Les micro et nano systèmes**

Les travaux portent la modélisation, la conception et les technologies de micros et nano systèmes pour la transmission de l'information et la communication, pour la gestion l'énergie électrique, et pour la chimie et les sciences du vivant.

- **L'automatique, l'optimisation et le traitement du signal**

Les systèmes aéronautiques et spatiaux, biotechnologiques, de télécommunication, ou de production y sont étudiés.

- **Les systèmes informatiques critiques**

Les systèmes informatiques résilients et sûrs de fonctionnement sont concernés, ainsi que les architectures et protocoles de communication, les réseaux à qualité de service, leur métrologie et la coopération multimédia.

- **La robotique et l'intelligence artificielle**

La robotique et l'intelligence des machines de cet axe de recherche développent des fonctions sensori-motrice, de perception, d'interprétation, d'apprentissage, de décision et d'action, ainsi que l'intégration de ces fonctions en des architectures cognitives.

Le LAAS développe deux axes transdisciplinaires : les interactions avec le vivant (biologie et santé, interaction des systèmes avec les humains) avec le programme Alive et l'intelligence ambiante avec le programme Adream.

Applications

Aéronautique, espace, transports, énergie, services, santé, télécommunications, environnement, agronomie, production et défense.

Des recherches High Tech

Pour mener à bien ses recherches, le LAAS dispose de moyens technologiques de qualité :

- ▶ La Centrale de technologie du réseau nationale RTB avec sa salle blanche de 1.500 m² dédiée à la fabrication de micro et nano composants
- ▶ Une plate-forme de caractérisation pour tester ces composants
- ▶ Une plate-forme de conception assistée par ordinateur (CAO) pour concevoir les micro et nano systèmes
- ▶ Une plate-forme de robotique riche d'une dizaine de robots : humanoïde, robot assistant, robots d'extérieur terrestres et aériens, robots virtuels
- ▶ Une plate-forme de réseaux informatiques pour valider des architectures complexes, pour la métrologie, la modélisation et la sécurité
- ▶ Une plate-forme systèmes embarqués (bâtiment Adream) qui intègre logiciels, capteurs, actionneurs et modèles dynamiques.
- ▶ Une plate-forme Alive avec 400 m² dédiées à l'étude de micro et nanosytèmes pour la biologie, la santé et l'environnement.

Les différents métiers présents au LAAS

Parmi les 650 personnes travaillant au LAAS :

- 200 sont chercheurs et enseignants-chercheurs (ils donnent des cours à l'Université de Toulouse),
- 275 préparent une thèse en 3 ans après avoir obtenu un Bac+5, c'est la 1^{ère} étape de la carrière d'un chercheur,
- 45 sont post-doc : le titulaire d'une thèse occupe souvent des postes temporaires, fréquemment à l'étranger, avant d'être recruté, il est alors surnommé post-doc,
- 15 sont ingénieurs, techniciens et administratifs : ils assurent des fonctions de supports à la recherche (technique, informatique, gestion, personnel, documentation, communication...)

Partenariat

Le LAAS est impliqué dans plusieurs pôles de compétitivité dont les 3 présents en région Midi-Pyrénées : Aerospace Valley, Cancer-Bio-Santé, Agrimip Sud-ouest Innovation. Il fait partie du centre d'intégration NanoInnov de Toulouse ainsi que du réseau thématique de recherche avancée « Sciences et technologies de l'Aéronautique et de l'Espace ». Il anime un club d'entreprises de plus de 70 membres «le Club des Affiliés» et a inventé le concept de laboratoire commun l'associant à des entreprises.

Les systèmes étudiés au LAAS-CNRS

Micro et nano systèmes

Comme les micro capteurs pour mesurer gaz, liquide ou radiations ; micro et nano composants pour les télécommunications, la puissance électrique ou destinés à la biologie et à la santé.

Systèmes embarqués

comme l'électronique et les réseaux électriques et les logiciels « embarqués » dans une automobile, un avion, un satellite.

Systèmes intégrés

comme les capteurs, l'électronique de commande d'un moteur, ou dans un téléphone portable.

Systèmes répartis à large échelle

Internet, les grands réseaux de communication...

Systèmes biologiques

micro et nano systèmes destinés au vivant, biocapteurs, laboratoires sur puce, machines bioinspirées...

Systèmes mobiles

téléphone portable, PDA...

Systèmes robotiques et autonomes

robots d'intervention, robots aériens, robots de service, robots humanoïdes...

Systèmes informatiques critiques

la sécurité, la fiabilité et des performances des réseaux de communication, satellites, systèmes de contrôle des trains ; la protection de la vie privée.

Systèmes cyber-physiques

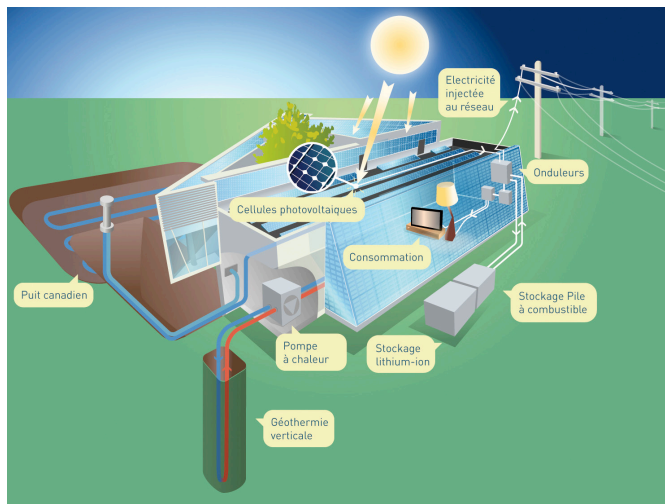
Intelligence ambiante, Internet des objets, objets communicants

Démo 1

Le bâtiment intelligent Adream, pour la gestion et l'optimisation de l'énergie

Correspondants : Corinne Alonso, Christelle Ecrepont, Bruno Estibals

Participants : Jean-Marie Dilhac, Bruno Estibals, Lionel Séguier



Bâtiment à énergie positive - Volet énergie du projet Adream.

© JB Meybeck pour le LAAS-CNRS

L'enjeu du projet Adream est d'imaginer un bâtiment à énergie positive capable de lier le monde virtuel informatique au monde réel des objets physiques.

Un bâtiment à énergie positive de 1 700 m² dédié à l'intelligence ambiante et aux systèmes cyberphysiques, c'est-à-dire capable de lier le monde virtuel informatique au monde réel des objets physiques tel est l'enjeu du projet Adream dont le bâtiment emblématique a été inauguré

par le LAAS en 2012. Ce bâtiment expérimental combine plusieurs sources d'énergie pour un total de 100 kWc : photovoltaïque (720 m² de panneaux dont une façade bi-verre/tri-verre remarquable), géothermie peu profonde associée à une pompe à chaleur, et géothermie de surface via un puits canadien. Le comportement global du réseau d'énergie pourra ainsi être évalué puis validé à l'échelle d'une infrastructure réelle. La gestion raisonnée des transferts d'énergie, avec renvoi éventuel sur le réseau électrique des surplus non consommés, permettra d'expérimenter la notion de Smart grid, terme qui désigne un réseau de distribution d'énergie incluant non seulement le transport mais aussi des capacités de télécommunication et de mesures via des capteurs ainsi que des capacités de gestion avancée. Avec une plateforme photovoltaïque unique en son genre à leur disposition, les chercheurs planchent sur la gestion et l'optimisation de l'énergie pour concevoir des réseaux de nouvelle génération, réactifs et adaptatifs, aux performances validées et sûres de fonctionnement. Pour obtenir un smart grid, ils vont élaborer des modèles intégrant les sources d'énergie et les besoins des différents utilisateurs, en l'occurrence les habitants du bâtiment. Des approches de gestion et d'optimisation de l'ensemble du système, intégrant les comportements possibles de toutes les entités de production et de consommation du réseau électrique, y compris du point de vue sociologique, seront proposées par un déploiement massif de réseaux de capteurs intelligents et autonomes en énergie. La question énergétique est en effet cruciale à l'échelle mondiale. En France, l'une des actions les plus visibles vient des producteurs d'énergie, EDF en tête, qui déploient des infrastructures de compteurs électriques intelligents dont seront équipés tous les foyers de consommateurs en 2015.

Démo 2

Robots assistants et équipiers de l'Homme

Correspondants : Rachid Alami, Thierry Siméon, Daniel Sidobre, Michel Devy, Félix Ingrand, Matthieu Herrb, Anthony Mallet

Participants : Mamoun Gharbi, Séverin Lemaignan, Jim Mainprice, Guido Manfredi, Amit Kumar Pandey, Julien Guillon, Mathieu Warnier, Wuwei He, Lavinda Da Silva

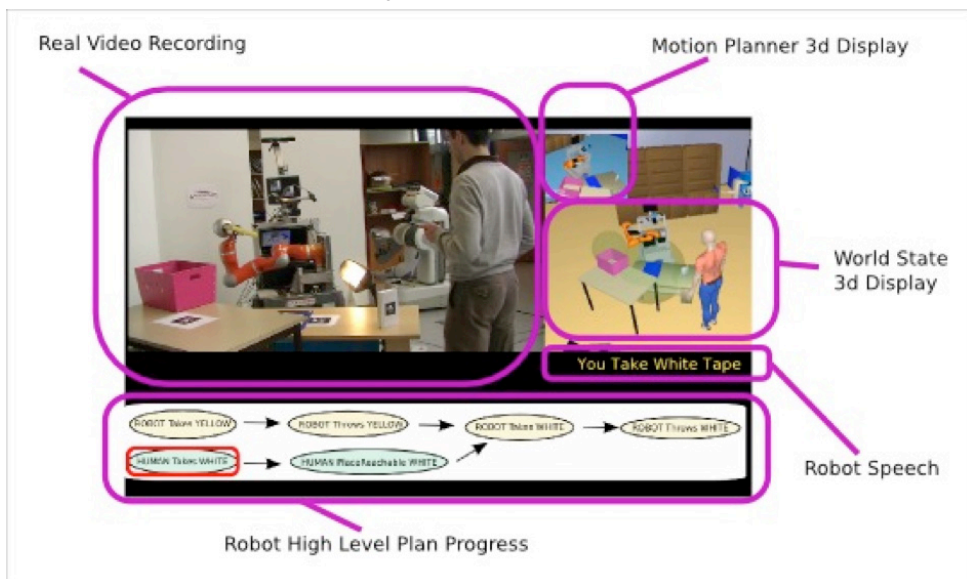
«Robot, apporte-moi la télécommande !» Planification et contrôle d'une tâche de recherche et livraison d'objet à une personne dans un environnement domestique.

Doctorants et Postdoc impliqués : Mamoun Gharbi, Séverin Lemaignan, Guido Manfredi, Jim Mainprice

Cette démo comprend une variante (Démo B) qui peut être exécutée de manière rapide et interactive : La planification et l'exécution du placement acceptable d'un robot par rapport à une personne.

Doctorants et Postdoc impliqués : Jim Mainprice, Wuwei Hei, Mamoun Gharbi

Cette démonstration utilise le robot PR2 qui se déplacera dans le séjour et la chambre à coucher de l'appartement. Elle illustre la capacité du robot de détecter la position et la posture de la personne puis de planifier le lieu où la tâche peut se réaliser. Ainsi le robot planifie pour lui-même mais aussi pour l'homme. Elle illustre également la capacité du robot d'identifier, de localiser et de manipuler (choix de prise, mouvement sans collision en environnement contraint) des objets. Le logiciel mis en œuvre intègre également, le dialogue, l'illustration au moyen d'une visualisation, des concepts ontologiques utilisés par le robot, la planification d'une tâche impliquant à la fois l'homme et le robot. En effet, le robot prend en compte non seulement le plan des lieux et l'emplacement des meubles mais également la position et la posture de l'homme.



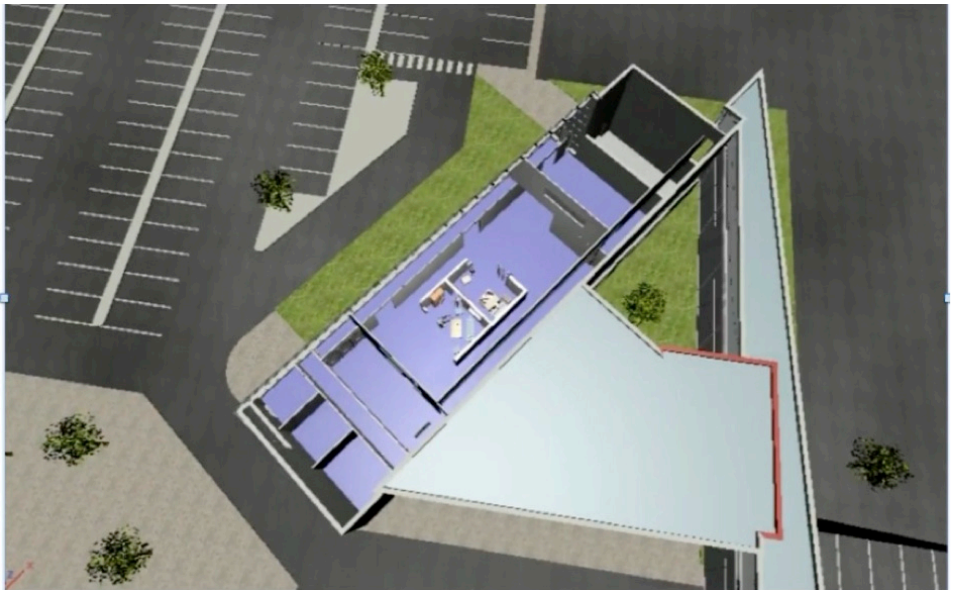
La demo 1.B illustre la capacité du robot de planifier en ligne un mouvement acceptable qui assure à la fois la sécurité et le confort de l'homme : prise en compte de distances de sécurité et approche en restant dans le champ de visibilité de l'homme. Exécution d'un mouvement souple avec limitation du jerk (dérivée de l'accélération).

«Nettoyons la table !»: Collaboration homme-robot : Manipulation interactive d'objets

Doctorants et Postdoc impliqués : Matthieu Warnier, Julien Guitton, Séverin Lemaignan, Wuwei Hei, Jim Mainprice, Vincent Barbaresì

Cette démonstration utilise le robot Jido équipé d'un bras Kuka LWR. Elle illustre la capacité pour le robot de conduire une tâche collaborative. Le robot est capable d'estimer l'accessibilité des objets par lui-même et par l'homme en effectuant une prise de perspective. A partir de là, le robot calcule et réalise des plans partagés (shared plans) dans lesquels l'homme peut être mis à contribution si nécessaire. La démonstration illustre le déploiement de nombreux composants logiciels :

1. le système SPARK qui permet de suivre en temps réel l'état de l'environnement, de la tâche et de l'homme,
2. ORO un système permettant de stocker et de raisonner sur des faits symboliques associés aux concepts ontologiques que le robot manipule et qui permet de gérer non seulement les croyances du robot mais aussi celles qu'il attribue à l'homme,
3. MHP un planificateur de tâches de déplacement et de manipulation,
4. HATP un planificateur de tâches qui intègre à la fois les actions du robot et celles de son partenaire humain
5. Softmotion, un contrôleur de mouvement souple avec limitation du jerk
6. et enfin, un superviseur qui contrôle l'ensemble de ces composants et permet au robot d'agir et d'interpréter les actions de l'homme.



Démo 3

Coopération entre drones et robots terrestres pour la surveillance d'environnement

Correspondant : Simon Lacroix

Participants : Simon Lacroix, Arnaud Degroote, Gilberto Echeverria, Cyril Roussillon, Cyril Robin, Matthieu Herrb

Un robot terrestre et un robot aérien coopèrent pour détecter et suivre une cible mobile. Ils exécutent un plan de patrouille préalablement établi, s'adaptent à des aléas d'exécution (le robot terrestre est bloqué ou perdu) et coopèrent pour assurer le suivi de la cible une fois détectée.



Les acteurs du scénario : l'hélicoptère Ressac de l'Onera et le robot terrestre Mana du LAAS

Contextes applicatifs considérés : surveillance de sites industriels ou militaires (détection d'incidents, de pollutions, d'intrusions...), surveillance environnementale, exploration scientifique, interventions après catastrophes...

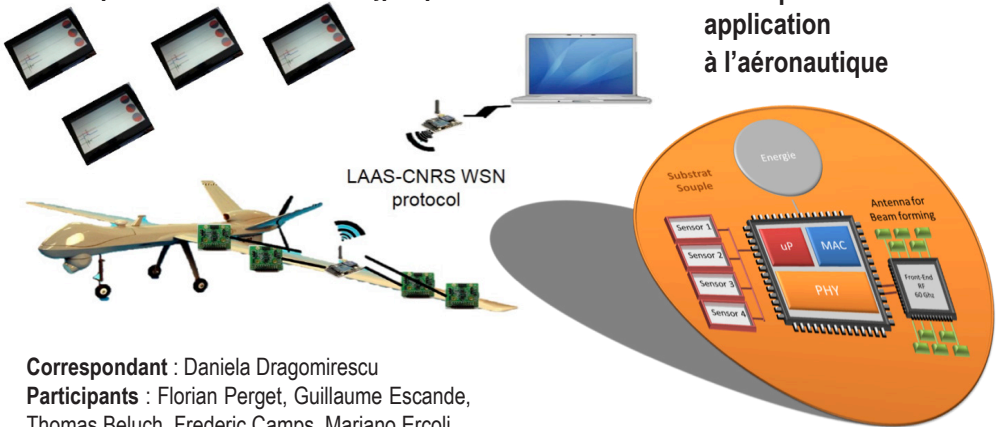
Démonstration : L'hélicoptère réel ne pouvant évoluer au laboratoire pour des raisons de sécurité, il est simulé. Le robot terrestre évolue lui réellement : une infrastructure de simulation développée au laboratoire permet de réaliser des «simulations hybrides», dans lesquelles des robots réels coopèrent avec des robots simulés.

Cette démonstration montre la capacité de navigation autonome d'un robot terrestre (modélisation de l'environnement, localisation sans GPS, génération et exécution des déplacements, suivi de cible...), et surtout la capacité qu'ont plusieurs robots hétérogènes de coopérer de manière autonome, sans intervention d'un opérateur. En partageant les informations qu'ils acquièrent sur l'environnement, les robots planifient conjointement leurs actions afin de réaliser au mieux la mission.

La démonstration illustre des travaux menés conjointement par le LAAS et l'Onera dans le Programme d'Études Amont «Action» financé par la DGA.

Démo 4

Conception et autonomie énergétique de nouveaux réseaux de capteurs sans fil : application à l'aéronautique



Correspondant : Daniela Dragomirescu

Participants : Florian Perget, Guillaume Escande, Thomas Beluch, Frederic Camps, Mariano Ercoli

La surveillance de structure aéronautique par des réseaux de capteurs sans fil a de multiples avantages, comme optimiser la maintenance des avions et réduire les coûts d'exploitation et donc des billets d'avion, prévoir d'éventuelles pannes et améliorer la sécurité des vols. Cependant, l'utilisation de ces réseaux de capteurs pose de nouveaux défis techniques. En effet, les communications sans fil demandent de nouvelles recherches sur des technologies haut débit, haute fiabilité, capables de localiser un défaut dans la structure et permettant de faire communiquer de nombreux nœuds. Des projets de recherche ont été conduits sur ce sujet en collaboration avec des industriels du secteur aéronautique et espace et du secteur de la microélectronique ainsi que avec la DGA.

La démonstration proposée résume en partie les résultats de ces recherches. Il s'agit ici de transférer des informations mesurées par les capteurs sans fils placés sur la structure de l'avion vers un routeur et ensuite un serveur de données. Les problématiques à résoudre se situent principalement au niveau de la quantité d'information à transmettre, ainsi que de la précision de la prise des mesures au même moment par tous ces nombreux capteurs, du déterminisme de l'information relevé et de la fiabilité de cette information.

Récupération de l'énergie ambiante pour alimenter les capteurs

Participants : Romain Montheard, David Pech, Magali Brunet, Paul Durand Estebe, Ty Mai Dinh, Vincent Boitier, Jean-Marie Dilhac, Marise Baffeur

Au sein des réseaux de capteurs sans fil, l'autonomie énergétique des nœuds constituant ces réseaux est une deuxième problématique importante. Pour éviter l'utilisation de batteries, dont la durée de vie est limitée, les équipes du LAAS travaillent sur la récupération et la gestion de l'énergie ambiante, c'est-à-dire récupérée dans l'environnement proche du capteur. Les diverses sources disponibles proviennent des variations de température, du solaire ou encore des vibrations mécaniques ou acoustiques.

La démonstration proposée est basée sur la récupération de l'énergie par thermogénération, c'est-à-dire génération d'énergie électrique grâce à une différence de température. Cette énergie récupérée doit être gérée et stockée pour alimenter le capteur. Les composants de stockage développés au laboratoire sont des micro-supercondensateurs sur puce qui ont fait l'objet d'un article dans la revue Nature Nanotechnology en 2010. Magali Brunet a obtenu la médaille de bronze du CNRS pour ses travaux.

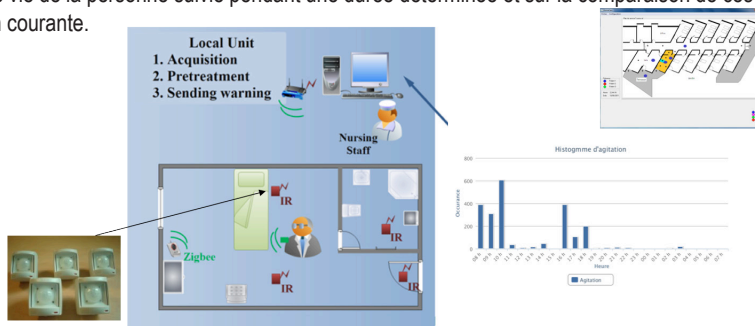
Démo 5

Domotique médicale : surveillance multicapteurs pour la localisation et la détection de chute des personnes âgées

Correspondant : Eric Campo

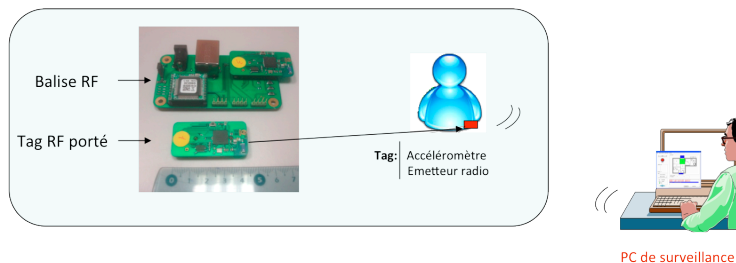
Participants : Eric Campo, Yoann Charlon, Walid Bourennane, Fehd Bettahar, Julien Cornier

Ce système permet de localiser une personne âgée et/ou dépendante dans son lieu de vie et de détecter tout signe de danger (situation anormale). Il est constitué d'un ensemble de capteurs infrarouges répartis dans l'environnement. Ces capteurs détectent les mouvements du corps, lors de déplacements par exemple, et envoient les données vers un ordinateur qui retranscrit sur un plan de l'habitation la position de la personne et qui donne une alerte (sonore et visuelle) lors d'une non-activité prolongée (chute, malaise, immobilité suspecte). La démonstration présentera en situation réelle la façon dont opère le système. Le concept sur lequel se base l'analyse des données et le calcul des seuils de détection repose sur l'apprentissage des habitudes de vie de la personne suivie pendant une durée déterminée et sur la comparaison de ces habitudes à la situation courante.



2 scénarios de suivi sont envisagés

- Géolocalisation indoor avec un suivi des déplacements temps réel d'une personne à partir de données collectées via un réseau de capteurs IR sans fil (+ détection des levers du lit).
- Visualisation des courbes d'évolutions du comportement.



3 scénarios de chute :

- Détection de chute et déclenchement d'alarmes visuelles et sonores (capteur porté).
- Immobilité prolongée (analyse par capteurs IR)
- Simulation chute => X, Y + message alarme chute => Envoi en reconnaissance d'un robot

Démo 6

Gestion autonome de la communication de machine à machine (M2M) : application à l'économie d'énergie

Correspondant : Khalil Drira

Participants : Khalil Drira, Thierry Monteil, Véronique Baudin, Mahdi Ben Alaya

Cette démonstration a pour objectif d'illustrer nos travaux de recherche dans le domaine de la gestion autonome des systèmes de communication machine-to-machine (M2M) à travers des scénarios de gestion intelligente des équipements pour une économie d'énergie.

Notre système collecte et analyse les données remontées par des capteurs de présence, de luminosité, de température et de pression, et des données d'un compteur d'électricité dit intelligent. Des actions de reconfiguration dynamique sont alors générées automatiquement par un raisonnement basé sur des modèles de connaissance. Ces actions sont soutenues par des techniques de découverte et de déploiement dynamiques des services logiciels pour l'exécution des actions de contrôle des actionneurs pour modifier l'environnement. Il s'agit par exemple d'allumer ou bien d'éteindre automatiquement une lampe ou un système de climatisation. Des dispositifs mobiles de type téléphone intelligent (smartphone) permettent à un utilisateur d'interagir avec le système et l'environnement pour une visualisation et un contrôle local ou à distance. D'autres scénarios utilisant des technologies de communication courte distance (RFID, NFC) seront démontrés et appliqués à des exemples illustratifs. Des scénarios d'applications M2M liées à la télésurveillance seront démontrés. Il s'agit par exemple de déclencher une caméra de surveillance et de l'orienter dynamiquement vers une personne dont la présence est détectée par des capteurs.

Contrôle automatique d'une caméra en fonction de la présence pour des scénarios de télésurveillance à domicile



Energie

Démo 7

Matériaux énergétiques - Récupération d'énergie ambiante pour l'alimentation des objets communicants connectés sans fil

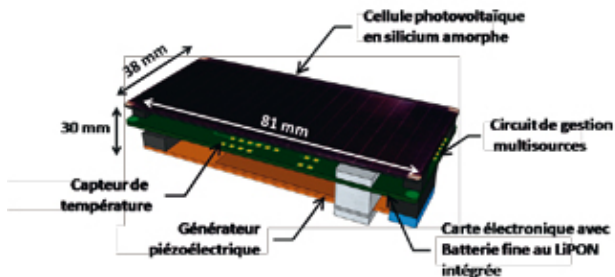
Correspondant : Carole Rossi

Une électronique adaptée renforce l'autonomie énergétique des objets de notre quotidien. Un champ d'applications presque illimité

Les objets intelligents connectés sans fil font aujourd'hui partie de notre quotidien. Ces objets sont confrontés au problème de leur autonomie énergétique : changement de pile, recharge périodique de la batterie... Seule une production et un stockage d'énergie électrique localement au niveau de l'objet pourront, à terme, permettre d'assurer un fonctionnement totalement transparent pour l'utilisateur. On parle de « récupération d'énergie ambiante ». Il s'agit d'exploiter des effets physiques bien connus, et déjà mis en oeuvre dans les applications capteur (piézoélectricité, effet Seebeck, effet photovoltaïque, induction électromagnétique...), pour produire de l'énergie électrique. L'idée n'est pas nouvelle. En effet déjà dans les années 80-90 un grand nombre de petits dispositifs électroniques (montres, calculatrices...) fonctionnaient déjà sur ce principe en s'alimentant grâce à l'énergie fournie par une petite cellule photovoltaïque. Depuis le début des années 2000 plusieurs équipes de recherche dans le monde ont conçu des solutions capables de produire de l'énergie électrique à partir de différences de température, de l'énergie mécanique des vibrations, ou encore des émissions électromagnétiques présentes dans l'environnement (RFID, GSM, Wifi...).

Une électronique adaptée

C'est dans ce contexte que nous avons développé une électronique adaptée capable de rendre exploitable l'énergie électrique récupérée par ces dispositifs en combinant leur utilisation avec une batterie fine au lithium de type LiPON. Grâce à une longue durée de vie, une très faible autodécharge, une bonne densité de puissance et d'énergie, c'est le candidat idéal pour les applications visées : l'habitat intelligent, le contrôle de santé des structures mécaniques (bâtiment, pont, avion...), la surveillance des réseaux de transport et de distribution (électricité, eau, données, transport ferroviaire, urbain, aérien...), la grande distribution et la gestion de la chaîne logistique, pour ne citer que les exemples les plus économiquement porteurs.



Démo 8

Introduction à la microélectronique et aux nanosystèmes

Participant : Marc Fouet

Les dimensions du monde du vivant et celles des produits fabriqués par l'homme nous donnent une bonne idée de l'échelle du nanomonde.

**Monde
du vivant**



molécule



protéine



ADN



cellule

0,1 nm

1 nm

10 nm

100 nm

1 μ m

Nanomonde

**voie
descendante**



atome



**agrégat
d'atomes**

**laser
à boîte
quantique**

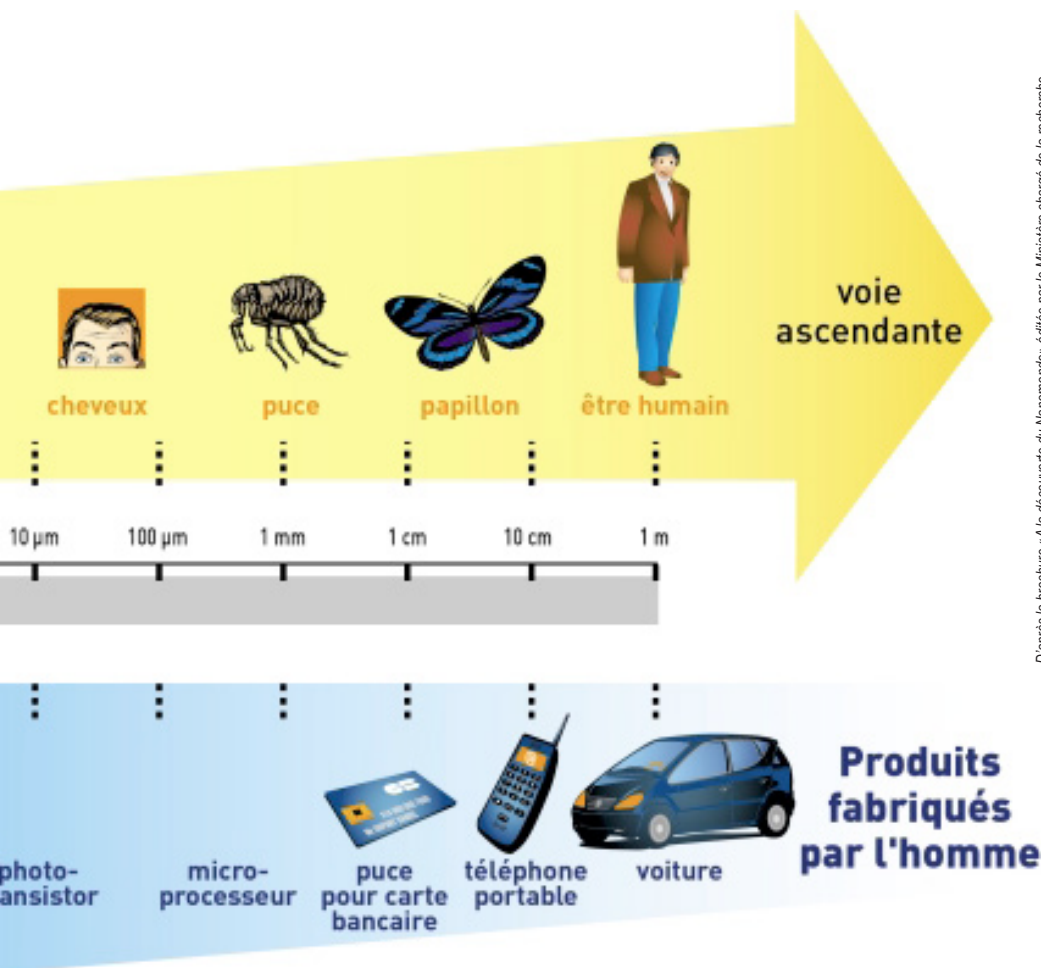
**nano-
transistor**

Qu'est-ce que le nanomètre ?

Le préfixe «nano» vient du grec et signifie très petit. Les scientifiques l'utilisent comme préfixe dans les unités de mesure pour exprimer le milliardième de l'unité de base : le nanomètre est le milliardième de mètre, soit 0,000 000 001 mètre.

Il est d'usage de l'écrire en abrégé «nm». Un nanomètre, c'est environ :

- 500 000 fois plus fin que l'épaisseur du trait de stylo à bille ;
- 30 000 fois plus fin que l'épaisseur d'un cheveu ;
- 100 fois plus petit que la molécule d'ADN ;
- 4 atomes de silicium mis l'un à côté de l'autre.



Comment fabriquer des nanocomposants ?

- en adoptant une voie descendante (en anglais «top-down») : on part d'un matériau, on le «découpe» et on le «sculpte» pour réduire le plus possible les dimensions de l'objet ou du composant que l'on veut fabriquer. C'est la voie qu'a suivie l'électronique depuis 30 ans, provoquant une révolution technologique dont l'ordinateur est le résultat le plus remarquable. L'effort de miniaturisation a d'abord conduit à des composants de dimensions micrométriques et est maintenant descendu en dessous des 100 nm.
- en adoptant une voie ascendante (en anglais «bottom-up») : on assemble la matière atome par atome pour construire des molécules que l'on intègre ensuite dans des systèmes plus grands. Cette voie est similaire à celle suivie par la nature : à partir des molécules d'ammoniac, de dioxyde de carbone, d'eau et de sels minéraux, elle a formé durant 4 milliards d'années d'évolution le monde du vivant si riche et si complexe d'aujourd'hui.

Démo 9

Comment naissent les puces électroniques ? Fabrication de micro et nano composants dans la salle blanche

Correspondant : Hugues Granier

Participants : Pierre-François Calmon, Laurent Mazenq, Monique Dilhan, Véronique Conédéra, Stéphane Aouba

Description : Cette visite exceptionnelle vous permettra de découvrir les différentes étapes et les équipements utilisés pour la fabrication des circuits intégrés encore appelés puces électroniques présentes dans de multiples appareils de la vie courante (voitures, ordinateurs, consoles de jeu vidéo, téléphones mobiles, etc.)

Après avoir enfilé la tenue réglementaire, vous allez parcourir les différentes zones de la salle blanche, un environnement strictement contrôlé (poussière, température, humidité, lumière) afin d'éviter toutes contaminations particulaire et lumineuse.

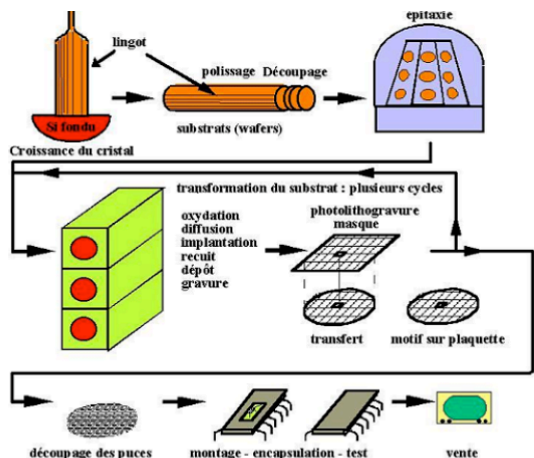
Fabriquer une puce électronique, c'est réaliser sur quelques centimètres carrés de surface et quelques microns d'épaisseur un assemblage d'une multitude de composants interconnectés ; simultanément, pour des centaines d'exemplaires identiques. A l'échelle d'une puce, un minuscule grain de poussière représente un rocher qui bouche les chemins dédiés à la circulation des électrons qui transmettent le signal donc l'information. C'est pour cela que la fabrication a lieu en « salle blanche ». L'air est constamment renouvelé et filtré. Il contient 100 000 à 1 million de fois moins de poussières que l'air extérieur. Les opérateurs portent en permanence une combinaison qui les couvre presque des pieds à la tête, et retient les particules qu'ils génèrent naturellement.

C'est principalement sur des plaquettes de silicium que ces puces électroniques sont réalisées. Mais on travaille également sur d'autres matériaux comme les métaux, des polymères, du diamant, des matériaux qui émettent de la lumière, etc.

Etapes préliminaires (avant la salle blanche)

– Fabrication des plaquettes de Silicium

Extrait du sable par réduction, le silicium est cristallisé sous forme de barreaux de 20 ou 30 cm de diamètre, ensuite sciés en tranches de moins d'un millimètre d'épaisseur qui sont polies jusqu'à obtenir des surfaces lisses à 0,5 nanomètre près. C'est sur cette tranche de silicium appelée substrat (ou wafer) que des centaines de puces sont fabriquées simultanément, grâce à la répétition ou la combinaison d'opérations élémentaires : traitement thermique, dépôts, photolithographie, gravure et dopage... Au total ce sont peut-être plus de 200 opérations qui se succèdent pour aboutir à la naissance de la puce électronique. Cette étape est réalisée par des industriels spécialisés.



– Fabrication des plaquettes de matériaux par épitaxie

Une autre technique de croissance est utilisée pour des matériaux très spécifiques, l'épitaxie. L'épitaxie est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal. Etymologiquement, «épi» signifie «sur» et «taxis», «arrangement». La technique va donc consister à utiliser le substrat obtenu dans l'étape précédente comme germe cristallin de croissance et à faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche.

Il existe plusieurs techniques permettant d'obtenir cette épicoche, celle utilisée pour les wafer est l'épitaxie par jet moléculaire. Cette technique consiste à envoyer des ions à la surface d'un substrat dans un vide très poussé afin d'éviter tout choc ou contamination sur le parcours. Le principe est l'évaporation sous vide par chauffage. Par le contrôle des cellules d'évaporation, on crée un jet de molécules en direction du substrat. On obtient ainsi une très grande précision de croissance, des jonctions très abruptes, mais cette opération est très lente. La vitesse de croissance est de l'ordre de 1 nano mètre par minute. Cette technique est donc très coûteuse et ne concerne que des dispositifs à très forte valeur ajoutée.

Etape 1 – Fabrication des masques

Classiquement, la fabrication d'un circuit électronique utilise une série de masques, support en verre sur lequel sont réalisés des motifs opaques. Selon la complexité du circuit intégré, il peut y avoir jusqu'à une vingtaine de couches. Le masque de chaque couche est identique à un négatif photographique, il est obtenu en «taillant» au laser une couche de chrome déposée préalablement sur une plaque de quartz d'une extrême pureté. Chaque couche correspond à un schéma électronique

Ensuite le substrat enduit avec une résine sensible à des rayonnements est exposé (rayonnement ultraviolet, rayons X, électrons, selon les méthodes) à travers chacun de ces masques. Le puissant rayonnement dégrade le matériau, reproduisant le motif du masque, comme une véritable gravure. Cette technique, appelée lithographie, permet ainsi de dessiner en plusieurs étapes le circuit à réaliser.

Etape 2 – Photolithographie

Etape-clé, elle consiste à reproduire dans une résine photosensible le dessin des circuits à réaliser. Cette résine est déposée sur le silicium. La lumière d'une source lumineuse de très faible longueur d'onde (UV ou inférieure) y projette l'image d'un masque. Avec cette technique nous atteignons des résolutions de l'ordre du micron ou inférieures au micron selon la nature de l'équipement utilisé.

Etape 3 – Lithographie électronique

La technique est identique à la photolithographie mais le rayonnement optique est remplacé par un faisceau électronique et les résines photosensibles par des résines électro sensibles. Par cette technique nous pouvons atteindre des résolutions nanométriques.

Etape 4 – Croissance et dépôt de films minces

Dans des fours portés à très haute température, nous injectons des gaz spécifiques. Par réactions chimiques entre les gaz et les substrats, réactions activées par la haute température, nous faisons croître de nouveaux matériaux tels l'oxyde ou le nitrure de silicium. Les équipements permettent également de « recuire » des matériaux déposés par ailleurs.

Etape 5 – Electrochimie

Par cette technique nous faisons croître des couches épaisses (jusqu'à plusieurs dizaines de microns) d'or, de cuivre et d'alliages magnétiques.

Etape 6 – Métallisation

Il s'agit du dépôt de couches fines (inférieures à 2 micromètres) de matériaux ultra purs. Ces dépôts se font dans des machines maintenues constamment sous vide. Le principe du dépôt repose sur la condensation sur le substrat d'un matériau préalablement évaporé. Réservé pendant longtemps au dépôt des métaux cette technique s'ouvre maintenant à de nouvelles applications (matériaux piezo électriques, polymères, etc.)

Etape 7 – Gravures plasma et humide

A l'inverse du dépôt, la gravure enlève de la matière à la plaquette, toujours dans le but de réaliser un motif. Deux voies principales : la gravure dite «humide», qui utilise des réactifs liquides, et la gravure sèche (ou gravure plasma) qui emploie des réactifs gazeux.

Etape 8 – Chimie

La zone de chimie permet des nettoyages de très haute pureté des plaquettes. Il est également possible de réaliser des opérations de gravure humide spécifiques ; ou de faire des traitements qui vont permettre l'adhérence des futurs matériaux qui vont être déposés.

Etape 9 – Implantation ionique

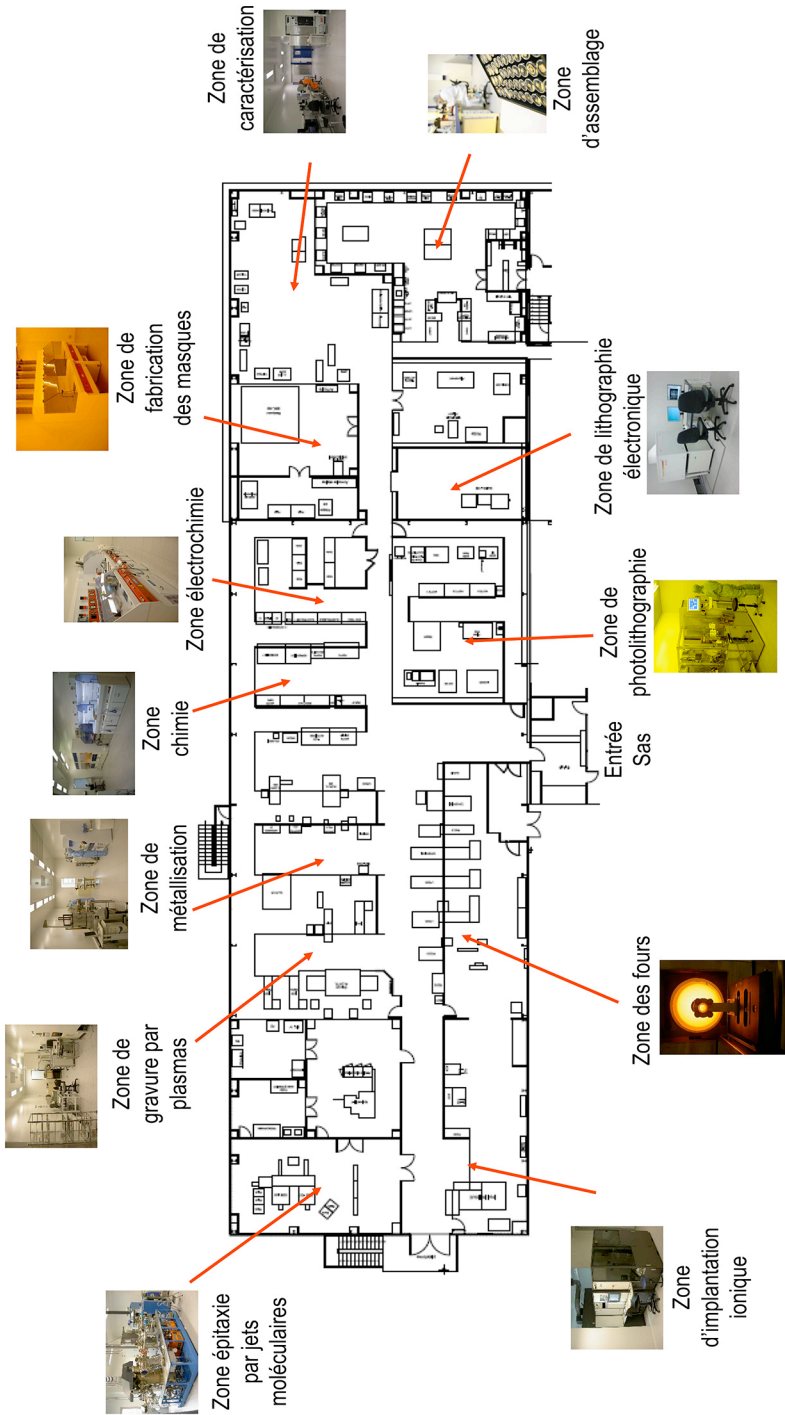
Cette étape a pour but de charger électriquement des zones très localisées de matériau semi-conducteurs on parle de «dopage». Les ions de dopant sont implantées verticalement dans la surface du silicium par un faisceau d'ions de haute pureté accéléré par des tensions pouvant atteindre 200 000 Volts...

Etape 10 – Assemblage

Après l'ensemble des opérations de création de couches actives, un substrat comportant de nombreux circuits identiques doit être découpé. Ensuite chaque puce élémentaire sera montée sur un support (boîtier). Enfin, après soudure des liaisons composant - pattes de sortie, le composant sera encapsulé.

Etape 11 – Caractérisation : inspection du wafer

Il s'agit d'une étape critique du processus global de fabrication du wafer. En effet à chaque étape du processus de fabrication, il doit être inspecté minutieusement à l'aide de d'appareils particulièrement coûteux comme par exemple des MEB (microscope électronique à balayage).



L'énergie en s'amusant

- Photovoltaïque
- Photovoltaïque organique
- Piles naturelles

La physique en s'amusant

- Optique et imagerie
- Frise des dimensions
- Ondes
- Electrostatique

La chimie en s'amusant

- Comment sculpter la coquille d'un oeuf grâce à la chimie

Le photovoltaïque organique

Correspondantes : Eléna Bedel-Pereira, Isabelle Séguy

L'un des défis technologiques de notre siècle est de produire de l'électricité avec la lumière du soleil et ce, à partir de cellules souples de petite taille (1 à 20 cm²) s'intégrant dans notre quotidien.

Les panneaux solaires, ces grandes plaques bleutées apposées sur nos toits, transforment l'énergie solaire en électricité. Leur couleur est due au matériau actif qui les compose : le silicium. Mais dès 1986 l'intérêt de certaines molécules organiques pour la fabrication de panneaux solaires a été démontré. Elles peuvent être déposées sur des supports souples en très fines couches



Molécules actives : elles peuvent être isolées sous forme de cristaux (à droite) ou d'huile (à gauche).

(100 nanomètres), comme de l'encre sur du papier, avec en vue des applications nomades, telles que des chargeurs solaires pliables et transportables. Les cellules photovoltaïques organiques sont élaborées à partir de polymères ou de petites molécules qui sont capables de transporter les électrons sous l'action de l'énergie solaire. Elles associent deux matériaux (l'un qui donne des électrons, l'autre qui les attire) disposés de façon à faciliter le passage du courant, c'est pourquoi l'architecture de ces cellules est cruciale.

Effet photovoltaïque

Des techniques empruntées aux nanotechnologies permettent de déterminer la structure intime des matériaux ainsi que leurs propriétés électriques à cette échelle. Nos travaux concernent la synthèse de nouvelles molécules et la modélisation théorique, qui rendent possible la caractérisation structurale et électronique des matériaux, et s'étendent jusqu'à la mise au point d'un prototype de cellule performante. Depuis une vingtaine d'années, les chimistes ont proposé un nombre incroyable de composés organiques ayant en commun des propriétés de semi-conducteurs. De nombreux verrous, notamment sur le choix et l'optimisation des matériaux ou sur l'architecture des composants ont ainsi été levés.