

Réseaux de capteurs sans fil à multiples piles protocolaires

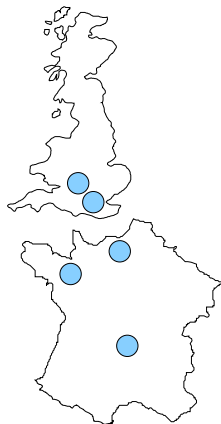
Alexandre GUITTON

Maître de conférences en informatique à l'Université Blaise Pascal
Enseignant à l'UFR Sciences et Technologies (département maths-info)
Chercheur au LIMOS

Soutenance d'habilitation à diriger des recherches
26 mars 2014



- 1997-2001 : Licence et M1 à l'Université de Rouen
- 2001-2002 : M2 recherche à l'Université de Rennes I
- 2002-2005 : Doctorat à l'Université de Rennes I
- 2005-2007 : Post-doctorats à *Birkbeck College, University of London* et à *Oxford University Computing Laboratory, University of Oxford*
- Depuis 2007 : Maître de conférences à l'Université Blaise Pascal



- Spécialité : réseaux (depuis 2001), réseaux de capteurs sans fil (depuis 2005)
- Application : surveillance automatique en conditions difficiles



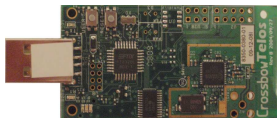
- Spécialité : réseaux (depuis 2001), réseaux de capteurs sans fil (depuis 2005)
- Application : surveillance automatique en conditions difficiles



- Spécialité : réseaux (depuis 2001), réseaux de capteurs sans fil (depuis 2005)
- Application : surveillance automatique en conditions difficiles



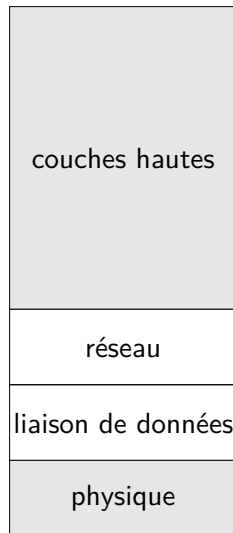
- Surveillance par un réseau de nœuds
 - chaque nœud est équipé de capteurs, d'un processeur, d'un module radio et d'une source d'énergie



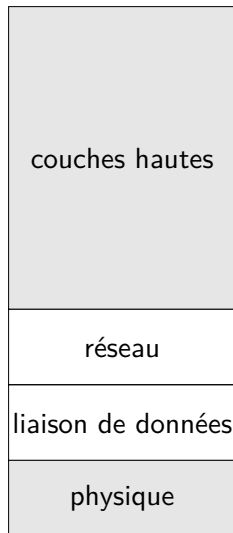
- Protocoles réseaux pour les couches basses
 - contraintes énergétiques fortes
 - capacités limitées (calcul, mémoire, débit)
- Environnements à propagation difficile

| |
|--------------------|
| application |
| présentation |
| session |
| transport |
| réseau |
| liaison de données |
| physique |

- Protocoles réseaux pour les couches basses
 - contraintes énergétiques fortes
 - capacités limitées (calcul, mémoire, débit)
- Environnements à propagation difficile



- Protocoles réseaux pour les couches basses
 - contraintes énergétiques fortes
 - capacités limitées (calcul, mémoire, débit)
- Environnements à propagation difficile
- Simulation réaliste (sous NS2)
[DCOSS 2008] [AHSWN 2009]
[ISWCS 2013]
 - modélisation des couches basses
 - prise en compte du temps
 - retour d'expérience des expérimentations



- Architectures multi-piles simples (projet OCARI et projet d'aparté)
- Architectures multi-piles locales
- Architectures multi-piles globales (projet Clervolc)
- Bilan et perspectives

Architectures multi-piles simples

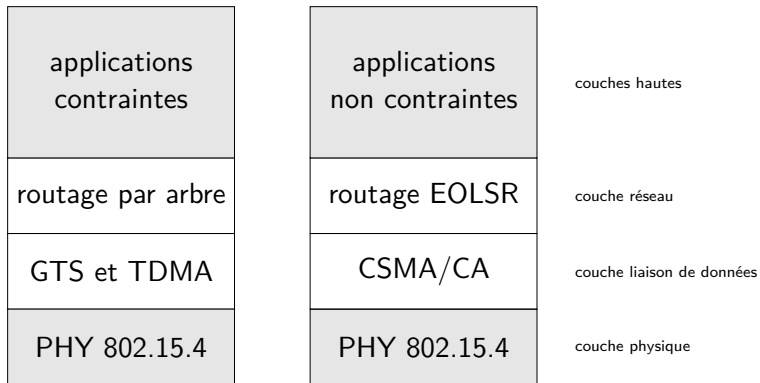
- Projet ANR de surveillance industrielle (2007-2010, sept partenaires)
 - surveillance de navires, de centrales nucléaires, etc.
[Dang+Devic 2008]
 - tâche du LIMOS : proposer un protocole MAC adapté
- Contraintes
 - économie d'énergie pour tous les nœuds
 - déterminisme et délai garanti pour certains paquets, *best-effort* pour d'autres

- Projet ANR de surveillance industrielle (2007-2010, sept partenaires)
 - surveillance de navires, de centrales nucléaires, etc. [Dang+Devic 2008]
 - tâche du LIMOS : proposer un protocole MAC adapté
- Contraintes
 - économie d'énergie pour tous les nœuds
 - déterminisme et délai garanti pour certains paquets, *best-effort* pour d'autres
- Solution
 - protocole MAC Macari [WSAN 2008] [Chalhoub 2009]
 - intervalles de temps dédiés par qualité de service (inspiré de IEEE 802.15.4)
 - synchronisation (selon une topologie arborescente)

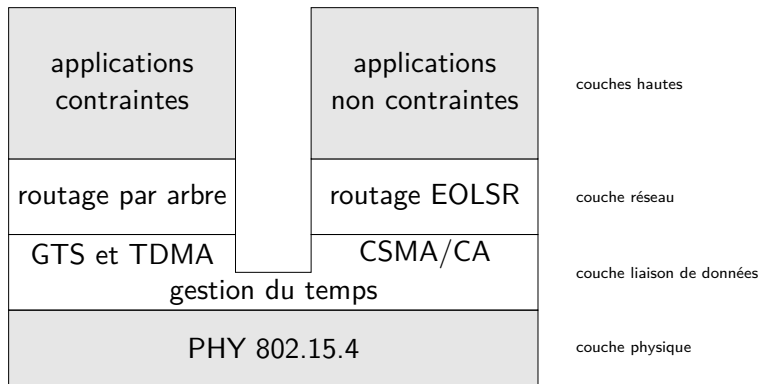
- Découpage du temps en quatre périodes
- $[T_0; T_1]$: synchronisation
 - certains nœuds économisent de l'énergie
 - optimisations de la durée : [AHWSN 2009] [Globecom 2011]
- $[T_1; T_2]$: collecte et communications selon un arbre
 - les nœuds sont activés par groupes (en fonction de l'arbre), et économisent de l'énergie hors de ces activations
 - le protocole de routage suit l'arbre
 - l'accès pour la collecte est fait selon CSMA/CA slotté et avec des GTS [Livolant+van den Bossche+Val 2008], et l'accès hors collecte est fait selon TDMA
 - intérêt : déterminisme et délai garanti

- $[T_2; T_3]$: communications libres
 - les nœuds feuilles sont inactifs
 - le protocole de routage est EOLSR [Mahfoudh+Minet 2008]
 - l'accès se fait selon CSMA/CA slotté
 - optimisation : l'accès se fait selon TDMA/CA [WCNC 2010]
 - intérêt : gestion du trafic *best-effort*
- $[T_3; T_0]$: inactivité

Architecture multi-piles dans OCARI



Architecture multi-piles dans OCARI



Architectures multi-piles

- Plusieurs piles protocolaires
- Avantage : prise en charge de qualités de service variées
- Inconvénients : augmentation de la taille du code, de la mémoire utilisée, inter-opérabilité des protocoles, dimensionnement des périodes

Architectures multi-piles

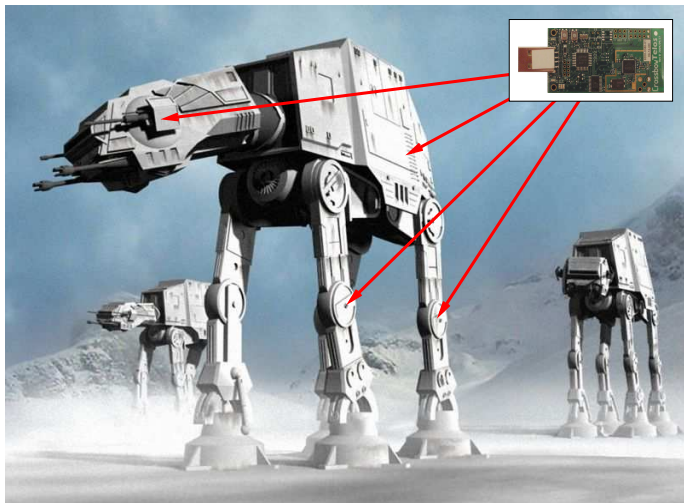
- Plusieurs piles protocolaires
- Avantage : prise en charge de qualités de service variées
- Inconvénients : augmentation de la taille du code, de la mémoire utilisée, inter-opérabilité des protocoles, dimensionnement des périodes

Architectures multi-piles simples

- Pour chaque paquet, la pile protocolaire est déterminée par l'application du nœud source et ne change pas

Un deuxième exemple : les communications en aparté (1/2)

Un deuxième exemple : les communications en aparté (1/2)



(photo non contractuelle)

- Chaque robot est équipé d'un réseau de capteurs qui contrôle son activité (thèse de Nassima HADID [Hadid 2011])
 - le réseau de chaque robot fonctionne sur un canal propre
 - pour pouvoir communiquer entre différents robots, les nœuds doivent basculer sur un canal d'aparté [ISCC 2010]

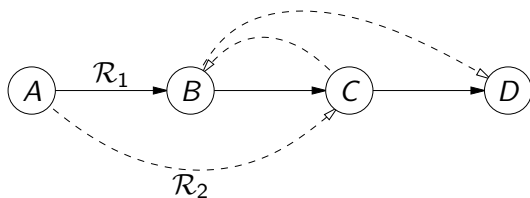
- Chaque robot est équipé d'un réseau de capteurs qui contrôle son activité (thèse de Nassima HADID [Hadid 2011])
 - le réseau de chaque robot fonctionne sur un canal propre
 - pour pouvoir communiquer entre différents robots, les nœuds doivent basculer sur un canal d'aparté [ISCC 2010]
- Architecture multi-piles simple [JNCA 2011]
 - communications intra-robot : accès au médium par CSMA/CA slotté et routage par arbre
 - communications inter-robots : accès au médium par CSMA/CA non slotté et routage tolérant au délai (DTN)

- Au niveau MAC
 - IEEE 802.15.4 en mode suivi de balises [IEEE 2011] : accès en CSMA/CA slotté ou en GTS
 - IEEE 802.11e [IEEE 2005] : accès en CSMA/CA (DCF et HCF avec contention) ou en TDMA (PCF et HCF avec accès contrôlé)
- Au niveau réseau
 - pile duale IPv4-IPv6 [IETF 2005] : cohabitation de protocoles différents
- Au niveau applicatif
 - réseaux de capteurs sans fil multi-usages [Steffan+Fiege+Cilia+Buchmann 2005]

Architectures multi-piles locales

- Problème : le dimensionnement des périodes est complexe
 - dépend du trafic global du réseau
 - impacte significativement les performances

- Problème : le dimensionnement des périodes est complexe
 - dépend du trafic global du réseau
 - impacte significativement les performances
- Solutions : échange de files d'attente [PE-WASUN 2011] [InTech 2011] (thèse de Nancy El Rachkidy [El Rachkidy 2011])
 - lorsque le trafic d'une période est épuisé, on utilise le trafic de l'autre période
 - introduit la possibilité de boucles de routage

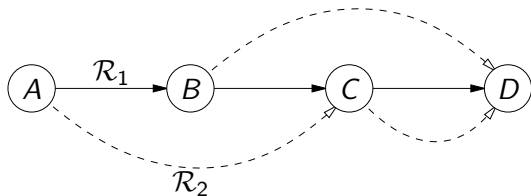


Boucles de routage dans les architectures locales

- Comment éviter les boucles de routage si les protocoles de routage sont quelconques ?

Protocoles compatibles

- Chaque nœud peut décider arbitrairement de la pile à utiliser sans causer de boucle [VTC 2011]



- Fonction de décision f
 - un nœud n est autorisé à acheminer un paquet p selon un protocole \mathcal{R}_i si et seulement si $f(\mathcal{R}_i(n)) < f(n)$
- Théorème de compatibilité [JCM 2013]
 - si il existe une fonction de décision f telle que $\max\{f(\mathcal{R}_1(n)), f(\mathcal{R}_2(n))\} < f(n)$
 - alors \mathcal{R}_1 et \mathcal{R}_2 sont compatibles
- Remarques
 - trouver la fonction de décision f du théorème est NP-difficile [ICC 2013]
 - certains couples de protocoles ne sont pas compatibles

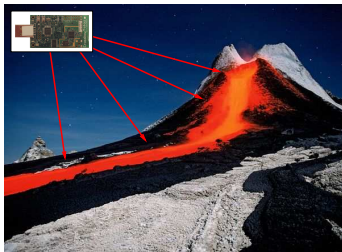
Protocoles retardables

- Un nœud s'interdit (temporairement) d'envoyer un paquet s'il y a un risque de boucle (quitte à le conserver)
- Fonction de décision f : si un nœud n'est pas autorisé à transmettre un paquet par \mathcal{R}_i , il le conserve
- Théorème de retardabilité
 - si il existe une fonction de décision f telle que $\min\{f(\mathcal{R}_1(n)), f(\mathcal{R}_2(n))\} < f(n)$
 - alors \mathcal{R}_1 et \mathcal{R}_2 sont retardables
- Remarques
 - on peut rendre retardable tout couple de protocoles (tout en les utilisant tous les deux)
 - on peut (parfois) augmenter les performances en ignorant aléatoirement certains risques de boucles

Architectures multi-piles globales

Un troisième exemple : le projet Clervolc

- Labex autour du suivi des volcans (depuis 2011, huit partenaires)
 - surveillance de volcans actifs
 - tâche du LIMOS : proposer une architecture de réseau de capteurs sans fil adaptée



- Contraintes
 - environnement agressif (intempéries, climat, gaz, tremblements de terre, etc.)
 - économie d'énergie, passage à l'échelle

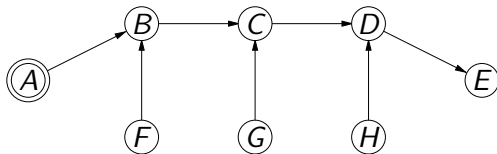
- Solution envisagée
 - deux phases (une phase d'attente et une phase d'alertes) avec des protocoles très différents
 - le changement de phase est déclenché par un évènement extérieur
- Protocole MAC pour la phase d'activité
 - protocole synchronisé similaire à IEEE 802.15.4 avec suivi de balises
- Protocole de routage pour la phase d'activité
 - approche par gradient
 - avantage : efficace, adapté à une topologie statique

- Phase d'attente : les nœuds sont très peu actifs (thèse de Thérèse ABY)
- Protocole MAC [VTC spring 2014]
 - activités aléatoires et non synchronisées
 - accès en CSMA/CA non slotté avec acquittements
 - avantages : passage à l'échelle, peu de compétition
 - inconvénients : délai de rencontre élevé, temps de rencontre court
- Protocole de routage : par inondation
 - avantages : pas de topologie (ou de voisinage) à maintenir, adapté à une topologie dynamique (due à la rareté des liens)
 - inconvénient : surcharge de messages de données

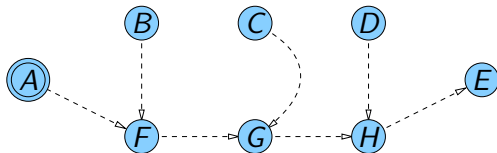
Architectures multi-piles globales

- La pile protocolaire à utiliser est choisie par un nœud distant

- Avant la détection



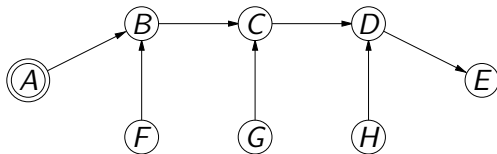
- Après la détection et après la notification



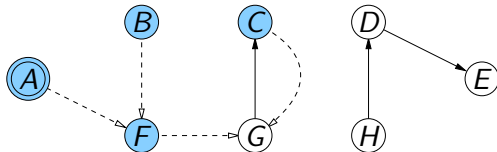
Architectures multi-piles globales

- La pile protocolaire à utiliser est choisie par un nœud distant

- Avant la détection



- Après la détection et pendant la notification



- Est-ce qu'un nœud dans l'ancien état peut communiquer avec un nœud dans le nouvel état ?



- Est-ce qu'un nœud dans l'ancien état peut communiquer avec un nœud dans le nouvel état ?



- problématique MAC : format de trames compatibles, activités communes, accès au canal compatible

Propriété de p -rejoignabilité

- probabilité p que deux nœuds exécutant des protocoles MAC différents puissent communiquer

- Est-ce qu'un nœud dans l'ancien état peut communiquer avec un nœud dans le nouvel état ?

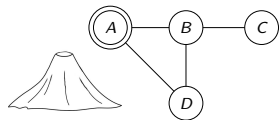


- problématique MAC : format de trames compatibles, activités communes, accès au canal compatible

Propriété de p -rejoignabilité

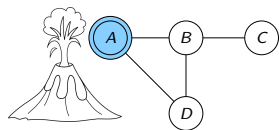
- probabilité p que deux nœuds exécutant des protocoles MAC différents puissent communiquer
- Évitement des boucles
 - protocoles compatibles (mais pas retardables)
 - protocole \mathcal{R}_2 interne

- Surveillance

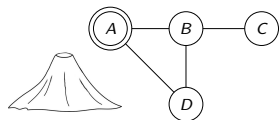


Évolution du réseau dans une architecture globale (1/3)

- Détection

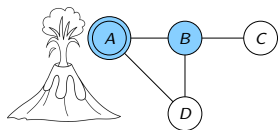


- Surveillance

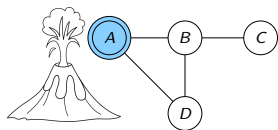


Évolution du réseau dans une architecture globale (1/3)

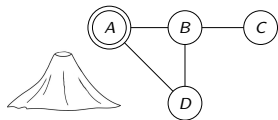
- Notification de *A* à *B*



- Détection

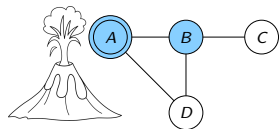


- Surveillance

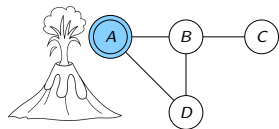


Évolution du réseau dans une architecture globale (1/3)

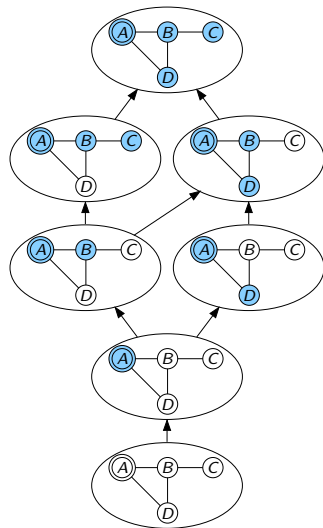
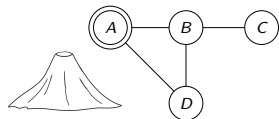
- Notification de *A* à *B*



- Détection



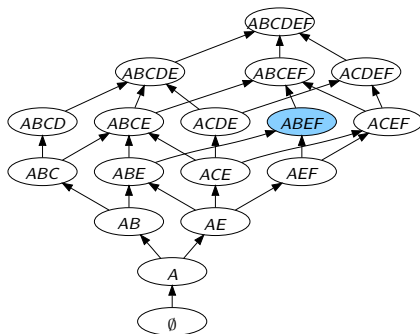
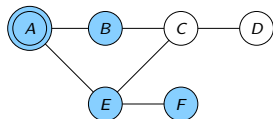
- Surveillance



Évolution du réseau dans une architecture globale (2/3)

Théorème [Kezdy+Seif 1996]

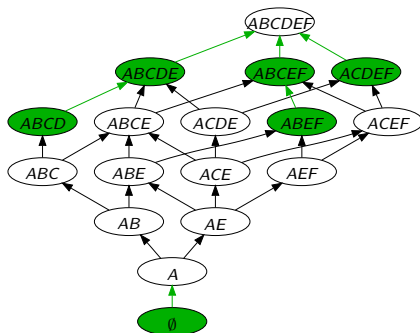
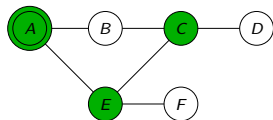
- Le graphe d'évolution d'un réseau (statique) est un treillis



Évolution du réseau dans une architecture globale (2/3)

Théorème [Kezdy+Seif 1996]

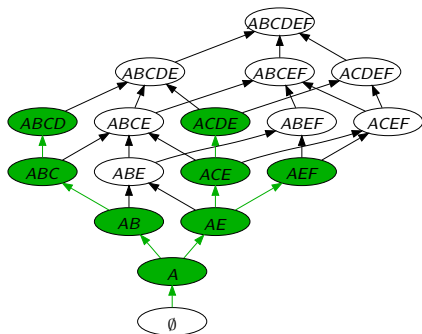
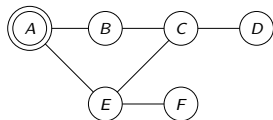
- Le graphe d'évolution d'un réseau (statique) est un treillis
- Lien entre les états significatifs du treillis et la topologie
 - inf-irréductibles (un seul successeur)



Évolution du réseau dans une architecture globale (2/3)

Théorème [Kezdy+Seif 1996]

- Le graphe d'évolution d'un réseau (statique) est un treillis
- Lien entre les états significatifs du treillis et la topologie
 - inf-irréductibles (un seul successeur)
 - sup-irréductibles (un seul prédécesseur)



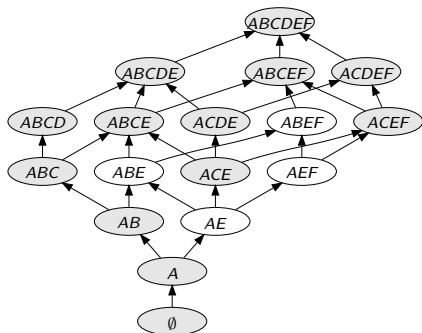
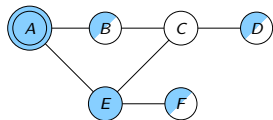
Évolution du réseau dans une architecture globale (3/3)

- Le graphe d'évolution donne des informations réseaux

- Le graphe d'évolution donne des informations réseaux
 - ensemble des historiques (ou des évolutions) d'une situation
 - aide au déploiement

Évolution du réseau dans une architecture globale (3/3)

- Le graphe d'évolution donne des informations réseaux
 - ensemble des historiques (ou des évolutions) d'une situation
 - aide au déploiement
 - ensemble des situations possibles à partir d'une connaissance partielle (qui se calcule en temps polynomial)



Bilan et perspectives

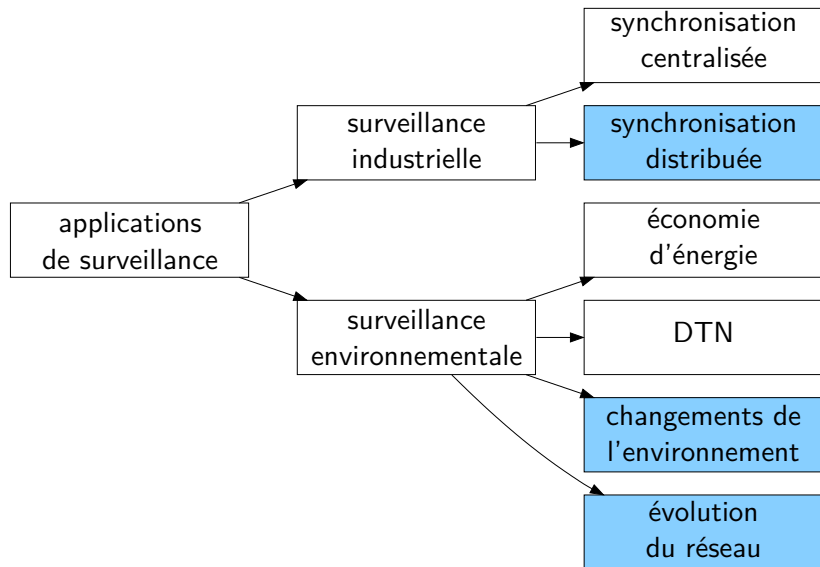
- Prise d'ampleur des architectures multi-piles
 - une seule pile protocolaire ne permet pas de fournir toutes les qualités de service (même en optimisant les protocoles ou en faisant du *cross-layering*)
- Classification des architectures multi-piles
 - simples, locales, globales
- Proposition de propriétés de couples de protocoles
 - au niveau réseau : compatibles, retardables, internes
 - au niveau MAC : p -rejoignables

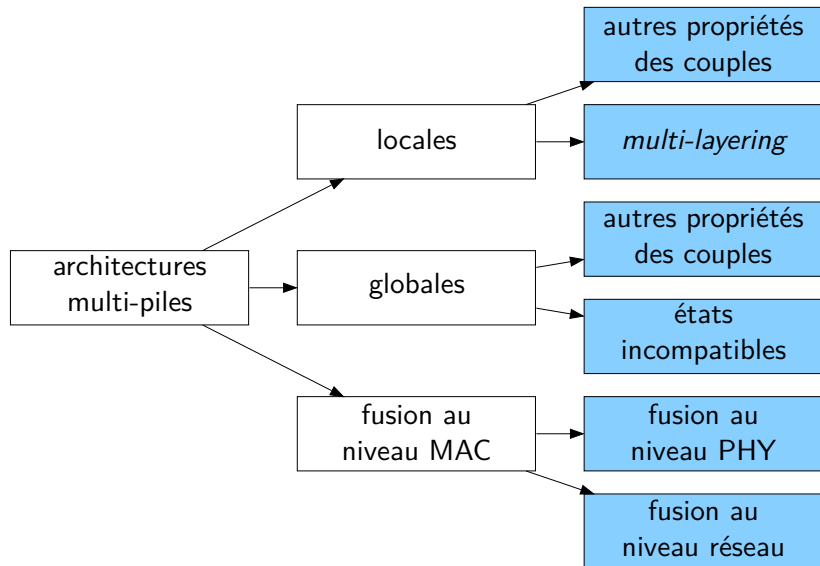
- Encadrement de doctorants
 - Nassima HADID (10/2007-07/2011) : utilisation d'un canal d'aparté pour des applications de réseaux de capteurs embarquées
 - qualifiée en section CNU 27
 - 7 publications communes
 - Nancy EL RACHKIDY (02/2008-12/2011) : *cross-layering* et routage dans un réseau ad-hoc
 - qualifiée en sections CNU 27 et 61
 - maître de conférences à l'UBP
 - 13 publications communes
 - Thérèse ABY (depuis 10/2012) : réseaux de capteurs sans fil étendus dédiés aux collectes de données environnementales
 - 3 publications communes
- Encadrements de stages de master recherche
 - Hamid ATTALAH (2008), Hani MAHMOUDI (2009), Michael ABDALLAH (2011), Rezzag ABDERRAHMEN (2013)

| Année | Revue | Chapitres | Conférences | Total |
|-------|-------|-----------|----------------------------|-------|
| 2014 | | | 2B | 2 |
| 2013 | 1 | | 1A+1B(+2) | 5 |
| 2012 | 1 | 2 | | 3 |
| 2011 | 1 | 1 | 2B+1 | 5 |
| 2010 | | | 1A+2B(+1) | 4 |
| 2009 | 1(+2) | | 2A+2(+2) | 9 |
| 2008 | | | 2B+3 | 5 |
| 2007 | | 1 | 1B | 2 |
| 2006 | (1) | | 1A+1B+(1A ⁺ +2) | 6 |
| 2005 | | | 1+(1A+2) | 4 |
| 2004 | (1) | | 1B+1 | 3 |
| 2003 | | | 1(+6) | 7 |
| Total | 8 | 4 | 43 | 55 |

- Organisation de manifestations scientifiques
 - journées L2I 2009 : co-organisateur
 - *workshop* HeterWMN 2011 (en conjonction avec Globecom 2011) : co-organisateur
 - conférence ICWCUCA 2012 : comité de pilotage, co-responsable du TPC, interlocuteur auprès de l'IEEE
- Comités de programme en 2014 : Algotel, ICCCN, IEEE ICIT, IEEE ISCAIE, IEEE PMECT, IEEE VTC fall, WINSYS
- Depuis 2008 : membre du comité d'experts du LIMOS en section 27
- Depuis 2014 : membre de la commission recherche de l'UFR Sciences et Technologies

- Parcours : maître de conférences depuis 2007, vacataire de 2005 à 2007, moniteur de 2002 à 2005
- Pôle réseau et système : réseaux (L3, 3 ans), systèmes d'exploitation (L3, 3 ans), administration réseau (M2, 6 ans), architecture réseau (M2, 7 ans), réseau avancé et virtualisation (M2, 2 ans), sécurité (M2, 5 ans)
- Pôle programmation : informatique (L1, 2 ans), algorithmique (L1, 5 ans), programmation fonctionnelle (L1, 5 ans), architecture des systèmes (L2, 2 ans), programmation impérative (L2, 3 ans), programmation orientée objets (L2, 5 ans), *mobile computing* (M2, 2 ans)
- Autres pôles : représentation des données (L1, 4 ans), bureautique (L3, 3 ans), vulgarisation (collégiens et lycéens, 14 évènements)





Merci