

Modélisations et Optimisation Multicritère de Réseaux

Katia Jaffrès-Runser

Soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches

le 11 juillet 2019, 10h30

Membres du Jury :

Marcelo Dias de Amorim, Directeur de Recherche, CNRS, LIP6 - Rapporteur
Christian Fraboul, Professeur, Toulouse INP ENSEEIHT, IRIT - Correspondant

Jean-Marie Gorce, Professeur, INSA Lyon, CITI

Isabelle Guérin Lassous, Professeur, Université de Lyon, LIP

Pascale Minet, Chargée de Recherche, INRIA Paris - Rapporteur

Ye-Qiong Song, Professeur, Université de Lorraine, LORIA - Rapporteur



Institut de Recherche en Informatique de Toulouse
CNRS - INP - UTS - UT1 - UT2J



I. Une vue d'ensemble de mes activités de recherches

- Parcours académique

- Thématiques de recherche

- Co-encadrements de thèse

II. Contributions choisies

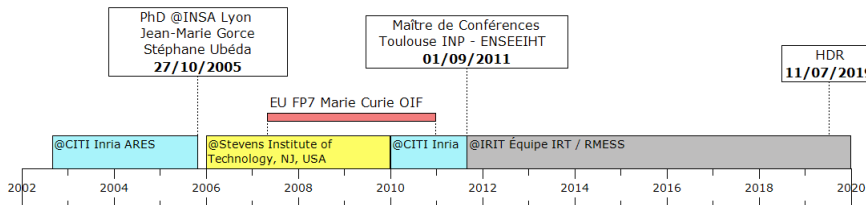
- Performances multicritère des réseaux maillés sans-fil

- Allocation temporelle dans les systèmes avioniques

III. Perspectives de recherche

- CLOcK : Vers la certification temporelle de réseaux sans-fil maillés

IV. Enseignement et responsabilités.

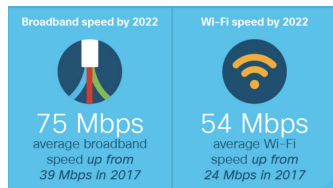


- Doctorat à l'INSA de Lyon sur la *planification de réseaux locaux sans-fil*, au laboratoire CITI, au sein de l'équipe projet Inria ARES.
- Post-doctorat au Stevens Institute of Technology, NJ, USA avec Cristina Comaniciu.
 - Contrat local Office of Naval Research.
 - Contrat FP7 Marie Curie Outgoing International Fellowship
- Maître de Conférences à Toulouse INP - ENSEEIHT, à l'IRIT dans l'équipe IRT sur un profil *Réseaux Embarqués*.

En croissance constante

Projections en 2022 :

- 60% de la population mondiale sera connectée.
- Il y aura 28.5 milliards d'équipements (soit 3.6 équipements par personne)
→ dont 12.3 milliards d'équipements mobiles.
- Ils transporteront 396 Exaoctets par mois (soit 3x plus qu'en 2017),
→ dont 77 Exaoctets par mois pour le trafic des équipements mobiles.

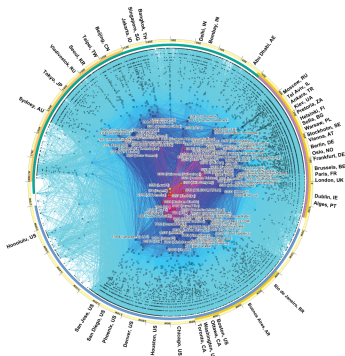


source : CISCO Visual Networking Index, 2018 et VNI Mobile 2019

Ces réseaux sont des systèmes complexes

Cette complexité peut s'exprimer par

- leur taille, leur topologie,
- leur dynamicité (mobilité des nœuds communicants),
- le volume et la nature des flux de données qu'ils doivent véhiculer,
- ou encore leurs contraintes opérationnelles.



Le réseau cœur IPv4 en 2017:

- 50M d'@ IPv4 et 36M de liens,
- Regroupés en 47610 Systèmes Autonomes reliés par 148,455 liens.

source: CAIDA http://www.caida.org/research/topology/as_core_network/historical.xml

La **conception, l'évolution et le déploiement des réseaux** présentent un enjeu clé pour notre société numérique.

Vu leur complexité, il est fondamental de les **modéliser mathématiquement** pour obtenir des modèles de calcul qui nous permettent de :

- Prédire et optimiser les performances du réseau avant de les déployer,
- Mieux comprendre leur fonctionnement,
- Anticiper l'effet d'une modification de leur structure ou de leur intelligence,
- Quantifier les conséquences d'un dysfonctionnement futur.

La **conception, l'évolution et le déploiement des réseaux** présentent un enjeu clé pour notre société numérique.

Vu leur complexité, il est fondamental de les **modéliser mathématiquement** pour obtenir des modèles de calcul qui nous permettent de :

- Prédire et optimiser les performances du réseau avant de les déployer,
- Mieux comprendre leur fonctionnement,
- Anticiper l'effet d'une modification de leur structure ou de leur intelligence,
- Quantifier les conséquences d'un dysfonctionnement futur.

Modélisations et optimisation multicritère des réseaux

La modélisation d'un réseau

La modélisation de ces réseaux doit se baser sur **une méthodologie rigoureuse** :

- Etudier les caractéristiques du réseau à modéliser
 - La technologie de communication, l'empilement protocolaire et les algorithmes qui déterminent l'échange des données,
 - La topologie et la mobilité des nœuds,
 - Les caractéristiques des flux émis.
- Définir un modèle du réseau :
 - Choisir les critères de performance et les contraintes que l'on souhaite caractériser à l'aide de ce modèle.
 - Identifier les paramètres du réseau (e.g. paramètres et modèles de couche physique, le comportement des nœuds (mobilité, types de flux), des protocoles et algorithmes) qui influencent réellement ces critères et contraintes.
 - Exprimer les relations mathématiques qui existent entre les différents paramètres du réseau et les critères de performance.
- Valider son modèle et évaluer l'erreur :
 - A l'aide de simulations précises du réseau.
 - Par des campagnes de mesure

Modélisation pour l'optimisation des réseaux

Les modèles de réseaux présentent une complexité de calcul qui peut croître en fonction :

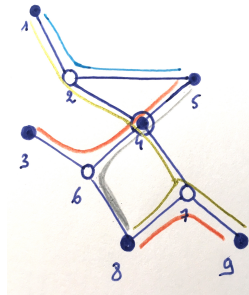
- du nombre de nœuds, de liens, de flux,
- de la nature des flux (unicast/multicast/broadcast, temps-réel, à débit garanti, etc.).

Il est important de définir des modèles qui réduisent cette complexité de calcul pour rechercher plus efficacement une solution optimale.

La fonction objectif

Plusieurs critères de performance peuvent être dérivés du modèle :

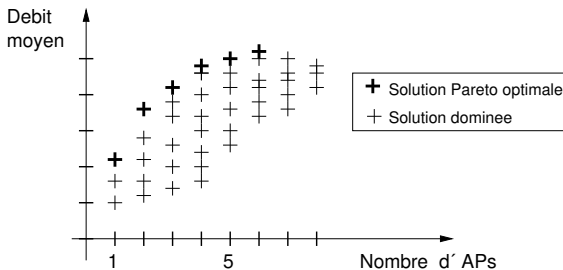
- La fiabilité moyenne,
- Le délai moyen de bout-en-bout,
- La consommation énergétique, etc.



Quelle fonction objectif définir ?

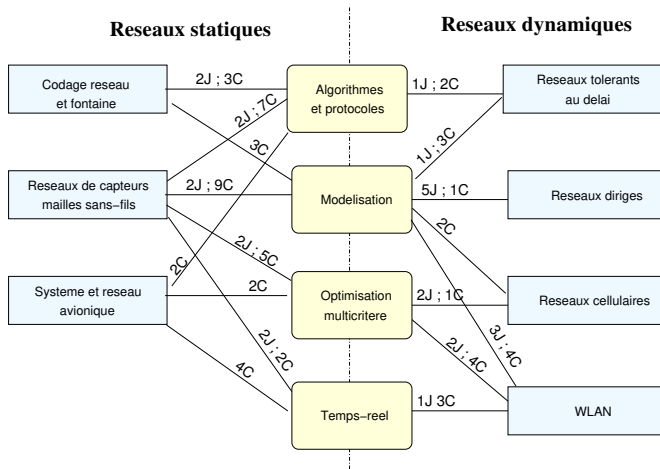
Une approche multicritère

Recherche des solutions Pareto-optimales qui optimisent conjointement plusieurs critères de performance.



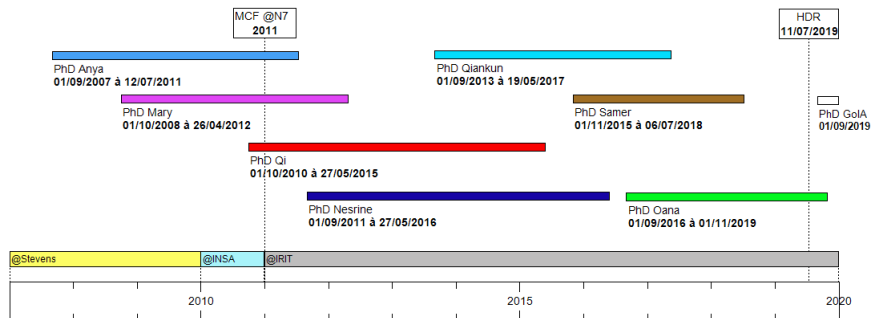
L'ensemble Pareto-optimal représente une borne multicritère sur les performances atteignables.

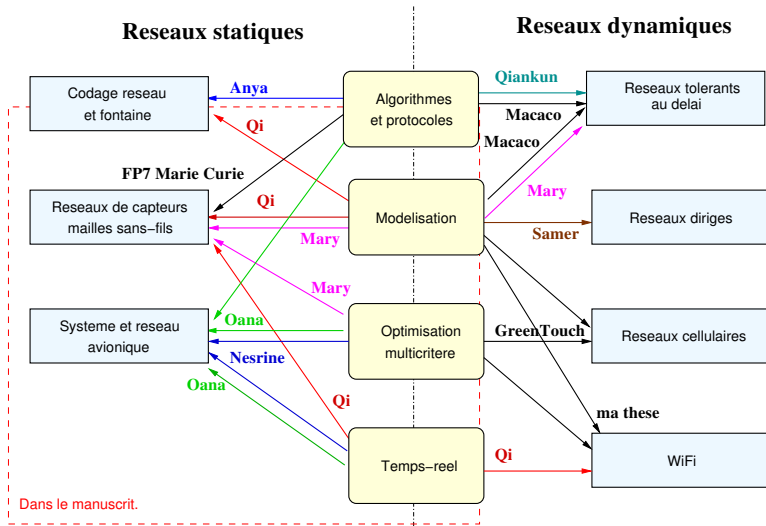
Modélisations et optimisation multicritère des réseaux



19 revues internationales, 37 conférences internationales
6 chapitres d'ouvrages, 17 rapports de recherche.

Chronologie des co-encadrements de thèse





I. Une vue d'ensemble de mes activités de recherches

Parcours académique

Thématiques de recherche

Co-encadrements de thèse

II. Contributions choisies

Performances multicritère des réseaux maillés sans-fil

Allocation temporelle dans les systèmes avioniques

III. Perspectives de recherche

CLOcK : Vers la certification temporelle de réseaux sans-fil maillés

IV. Enseignement et responsabilités.

Les communications machine à machine (M2M)

- transportent des données **générées par des machines** (e.g. calculateurs, systèmes embarqués, objets connectés, etc),
- utilisent des technologies de communication
 - filaires (e.g. Ethernet commuté, réseaux embarqués, etc.) ou
 - sans-fil (e.g. LTE-M, 5G V2X, IEEE802.11ax, BLE, LPWAN, etc..).

L'Internet des objets (IoT)

Des **objets communiquant simples** contraints :

- en énergie
- en capacité de traitement
- en mémoire.

Ces objets sont (en général) équipés de connexions sans-fil M2M.

Les contributions que j'ai choisies de vous présenter ici sont liées aux domaines de l'IoT et des communications Machine à Machine (M2M) :

- Performances multicritère des réseaux maillés sans-fil
 - IoT avec les réseaux de capteurs sans-fil maillés.
- Allocation temporelle dans les systèmes avioniques
 - M2M avec l'IMA et les réseaux embarqués avion.

I. Une vue d'ensemble de mes activités de recherches

Parcours académique

Thématiques de recherche

Co-encadrements de thèse

II. Contributions choisies

Performances multicritère des réseaux maillés sans-fil

Allocation temporelle dans les systèmes avioniques

III. Perspectives de recherche

CLOcK : Vers la certification temporelle de réseaux sans-fil maillés

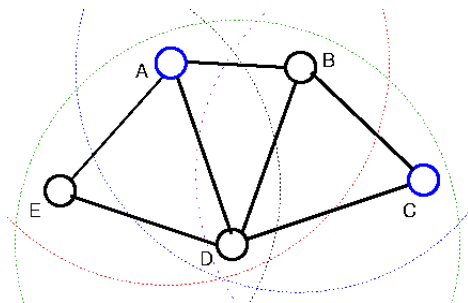
IV. Enseignement et responsabilités.

Réseau maillé sans-fil

C'est un réseau formé par :

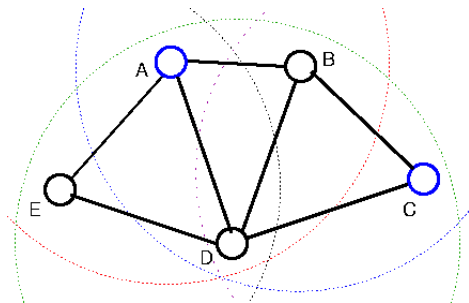
- des nœuds statiques
- équipés d'une interface de communication sans-fil.

Un nœud peut émettre un flux, mais aussi router du trafic provenant d'un autre nœud source.



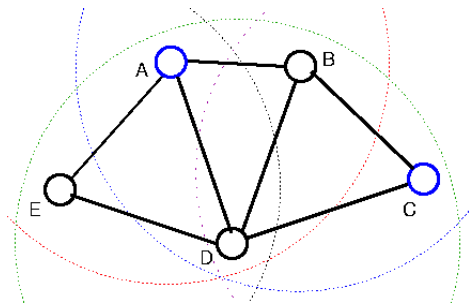
Quand la portée de communication ne permet pas la transmission directe d'un flux, un nœud sert de relais de communication.

Problématique



Quel est le meilleur relais pour le flux émis par A en direction C ?

Problématique



Quel est le meilleur relais pour le flux émis par A en direction C ?

Tout dépend du critère de performance choisi :

- la fiabilité du chemin, i.e. la probabilité de transmission avec succès (à maximiser),
- délai de communication de bout-en-bout (à minimiser),
- l'énergie consommée pour les transmissions (à minimiser).

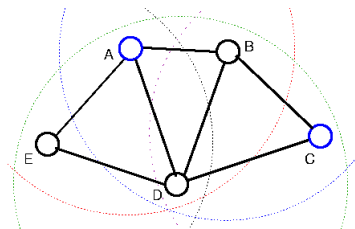
Objectif

Déterminer l'ensemble des routages Pareto-optimaux qui optimisent conjointement ces critères quand un ou plusieurs flux sont diffusés dans le réseau :

- la fiabilité du réseau (à maximiser),
- délai de communication de bout-en-bout (à minimiser),
- l'énergie consommée pour les transmissions (à minimiser).

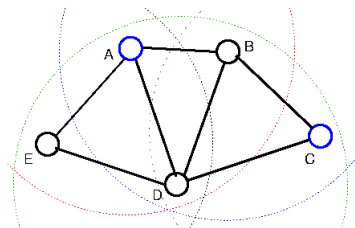
Modélisation du lien sans-fil

Un lien sans-fil n'est pas binaire !



Modélisation du lien sans-fil

Un lien sans-fil n'est pas binaire !



On a une probabilité de transmettre une trame avec succès sur un lien qui dépend :

- du rapport signal sur bruit plus interférences (SINR) au récepteur,
- de l'environnement de propagation,
- des caractéristiques de la chaîne de communication numérique (modulation, codage, etc.).

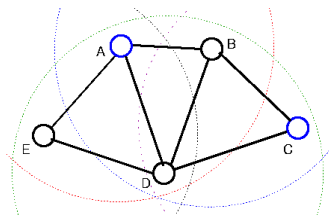
Si on connaît les nœuds actifs en même temps, on peut modéliser le lien radio par une **probabilité de succès de transmission d'une trame** qui est fonction du SINR au récepteur.

$$P_{AD} = f \left(\frac{P_r(A \rightarrow D)}{N_0 + \sum_{k, k \neq A} P_r(k \rightarrow D)} \right)$$

Modélisation de la décision de routage

On utilise la **diffusion naturelle** d'une trame à tous les nœuds de sa zone de couverture.

- Quand A émet vers C, les nœuds B, D et E reçoivent la trame.
- B, D et E doivent décider s'il est intéressant pour eux de relayer la trame. On représente la décision de routage de B, D et E par **une probabilité de relayage x** , que l'on détermine par optimisation.



→ Ce relayage probabiliste est **très simple** à implanter dans un contexte IoT.

Une modélisation “cross-layer”

La décision de routage d'un nœud influence la probabilité de succès des liens.

Comment modéliser cette propriété ?

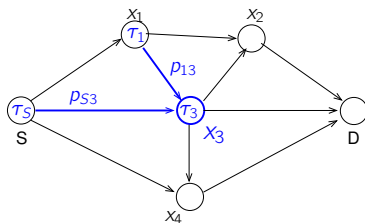
Une modélisation “cross-layer”

La décision de routage d'un nœud influence la probabilité de succès des liens.

Comment modéliser cette propriété ?

- On introduit le **taux d'émission** τ qui représente la probabilité d'émission d'une trame par un nœud.
- Connaissant les taux d'émission de tous les nœuds, on peut calculer la distribution des SINR et en déduire un SINR moyen, et donc une probabilité de succès sur un lien.
- Et bien entendu, il faut lier les décisions de routage aux taux d'émission.

Contrainte de flot



Une contrainte de conservation de flot permet de lier la probabilité de relayage aux taux d'émission :

$$x_j = \frac{\tau_j}{\sum_{k \in \mathcal{N}_j^{in}} \tau_k \cdot p_{kj}}$$

- Le taux d'émission en sortie du nœud est égal x_j fois les flots entrants en j .
- \mathcal{N}_j^{in} représente l'ensemble des liens dirigés qui appartiennent au graphe dirigé acyclique entre S et D .

Ressources radio

Ce modèle a en fait été défini pour l'utilisation de R ressources radio orthogonales (e.g. **time slots**, fréquences, codes) :

- Un taux d'émission τ_i^r par ressource r ,
- La probabilité p_{ij}^r de succès le lien (i,j) à la ressource r .

Un nœud possède alors une file d'attente avec discipline FIFO de taille R .

Problème d'optimisation multicritère

On cherche alors à optimiser la probabilité de relayage¹ x_i qui :

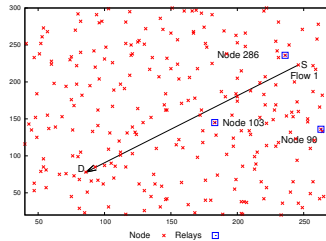
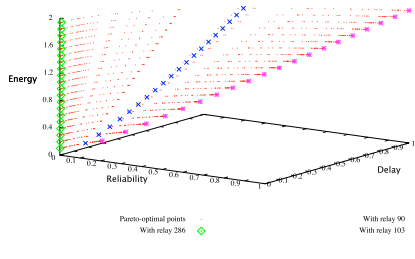
- Maximise la fiabilité de la communications.
- Minimise le délai de bout-en-bout
- Minimise l'énergie consommée.

Ces critères sont calculés pour un nombre de sauts maximum H_M .

¹à travers les τ_i^r et la contrainte de conservation de flot

Cas d'un flux unique.

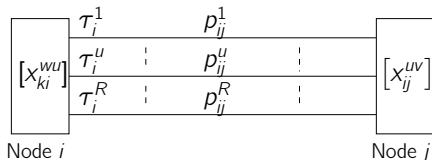
Compromis Pareto-optimaux pour un flux, $H_M = 1$



K. Jaffrès-Runser, M. Schurgot, Q. Wang, C. Comaniciu and J.-M. Gorce, "A Cross-layer Framework for Multiobjective Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc Networks", in *Elsevier Ad Hoc Networks Journal*, Volume 11, Issue 8, November 2013, pp. 2147-2171

Pour la transmission de plusieurs flux

Dans la thèse de Qi, la notion de relayage a été raffinée pour être en mesure d'envoyer plusieurs flux sur le réseau.



Le routage est représenté par une matrice stochastique M qui représente une chaîne de Markov absorbante :

$$M = \left[\begin{array}{c|c} Q & D \\ \hline 0 & I \end{array} \right]$$

avec Q la matrice de routage et D la matrice d'arrivée. On a $\ell = N.R$ états transitoires et $m = |D|R$ états absorbants.

Pour le transport de plusieurs flux

L'optimisation multicritère de la matrice de routage a été réalisée en calculant les critères :

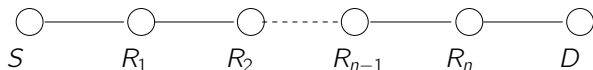
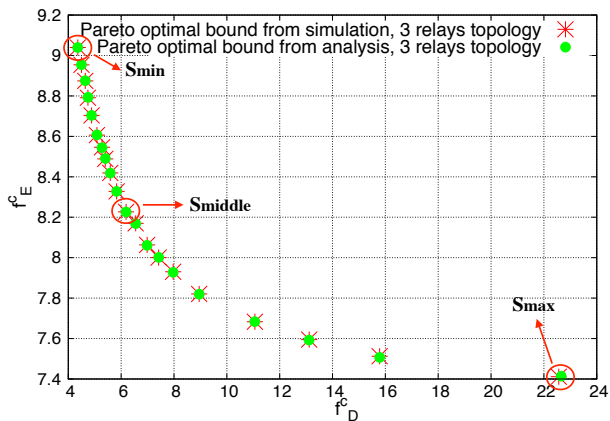
- de délai moyen $f_D^c(S_i, D_d) = f_D(S_i, D_d)/f_R(S_i, D_d)$
- d'énergie moyenne $f_E^c(S_i, D_d) = f_E(S_i, D_d)/f_R(S_i, D_d)$

à partir de l'état stationnaire de la chaîne de Markov absorbante.

Ces critères sont multipliés par $1/f_R(S_i, D_d)$,

→ le nombre moyens de ré-émissions jusqu'à réception (\sim métrique ETX).

Illustration pour un réseau linéaire avec 3 relais.



Résultats et extensions

Ces modèles ont été exploités pour extraire différents résultats liés à différents problèmes :

- Cas d'un seul flux (PhD Mary)
 - Sélection des noeuds relais pour la remontée de données vers un puits de collecte,
 - Comparaison des solutions Pareto-optimales avec la solution générée par des algorithmes de routage standard (AODV, DSR),
- Cas de plusieurs flux (PhD Qi)
 - Recherche de bornes énergie/délai
 - Comparaison de la performance d'algorithmes de codage réseau et fontaine à ces bornes
 - Mise en avant de l'effet bénéfique de l'écoute passive avec ré-émission aléatoire
 - Calcul du **délai pire-cas** à partir de la distribution des délai.
 - Comparaison avec le délai pire-cas d'une méthode d'accès CSMA/CA.

I. Une vue d'ensemble de mes activités de recherches

Parcours académique

Thématiques de recherche

Co-encadrements de thèse

II. Contributions choisies

Performances multicritère des réseaux maillés sans-fil

Allocation temporelle dans les systèmes avioniques

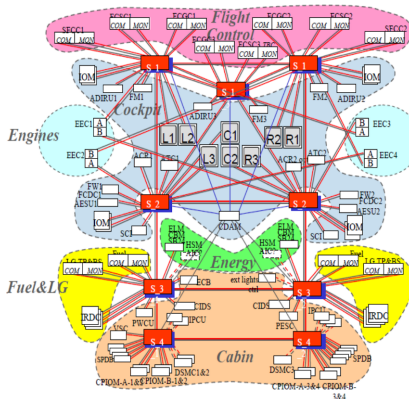
III. Perspectives de recherche

CLOcK : Vers la certification temporelle de réseaux sans-fil maillés

IV. Enseignement et responsabilités.

IMA: Avionique Modulaire Intégrée

Nouvelle architecture distribuée à la fin des années 90 avec l'A380 :



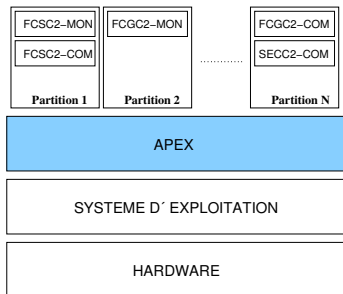
- ~ 100 modules de calcul,
- ~ 1000 flux temps-réel durs.

Le système est **asynchrone** pour des raisons de sûreté.

Module et fonctions avioniques

L'ordonnancement des fonctions avioniques est assuré par l'hyperviseur APEX (APlication EXecutive) qui héberge des conteneurs appelés **partitions**. Une partition :

- Exécute des fonctions avioniques développées par un même équipementier,
- S'exécute périodiquement pour une durée constante,
- Possède une zone mémoire dédiée,
- Accède à des ports de communication vers le réseau.

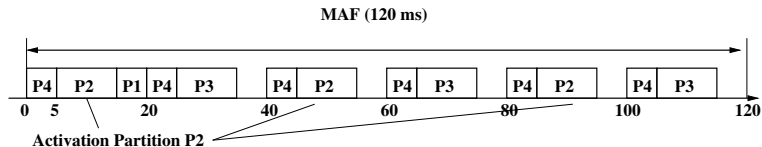


Ordonnancement des partitions

Les partitions sont caractérisées temporellement par :

- Une durée d'exécution C
- Une période d'exécution T

Elles sont ordonnancées statiquement dans une **MAjor time Frame (MAF)** qui se répète indéfiniment.

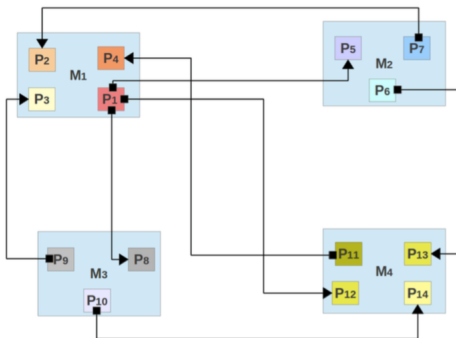


A chaque fin d'exécution d'une partition, les données produites sont émises sur le réseau vers une partition destination.

→ Chaque partition émet un **flux périodique** (au pire cas).

Communication entre 2 partitions

Les données d'une partition source (P_7) sont émises sur un lien virtuel AFDX (VL) vers une partition destinataire (P_2).



La donnée est reçue par P_7 uniquement quand P_2 est active sur son module.

Modélisation du délai de transmission de bout-en-bout

Le délai que met une donnée émise par P_i pour arriver en P_j dépend :

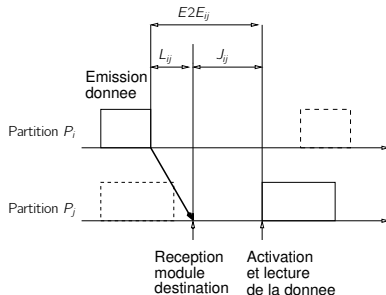
- du délai réseau : $L_{ij} \in [L_{min}, L_{max}]$, avec L_{max} le délai pire-cas
- du délai d'attente d'activation J_{ij} de la partition P_j sur le module destination.

La donnée est enregistrée sur le module dans un buffet de taille 1 (mode *sampling*).

Echéance et perte d'une trame

Les flux sont temps-réel durs. Il faut donc garantir :

- La non-perte de donnée par écrasement dans un buffer,
- Le non-dépassement de l'échéance $E2E_{ij}^{max}$.



Garantir temporellement une architecture avionique

Connaissant :

- une allocation des partitions sur les modules de calcul,
- une allocation des communications APEX aux VLs AFDX,

On cherche à **garantir les contraintes temporelles sur le délai de communication de bout-en-bout** pour toutes les paires de partitions communicantes.

Que faire si une ou plusieurs échéances ne sont pas respectées ?

- ⊕ Re-calculer une nouvelle allocation des partitions, des flux aux VLs et vérifier toutes les contraintes,

Que faire si une ou plusieurs échéances ne sont pas respectées ?

- ⊕ Re-calculer une nouvelle allocation des partitions, des flux aux VLs et vérifier toutes les contraintes,
- ⊕ Partir de l'allocation courante et modifier les paramètres temporels des partitions pour trouver une configuration admissible.

Que faire si une ou plusieurs échéances ne sont pas respectées ?

- ⊗ Re-calculer une nouvelle allocation des partitions, des flux aux VLs et vérifier toutes les contraintes,
- ⊗ Partir de l'allocation courante et modifier les paramètres temporels des partitions pour trouver une configuration admissible.

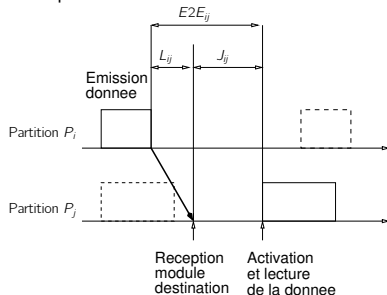
Période des partitions destination

Seules les partitions source ont une période P fixée par le modèle fonctionnel.

→ On peut **réduire la période des partitions destination** !

$$T_j \leq T_j^{max}$$

Il existe une valeur maximale T_j^{max} qui assure une transmission admissible depuis toutes les partitions source.



Réduire les périodes des partitions destination

- Augmente la charge des modules de calcul,
- Requier un nouveau calcul de MAF.

La nouvelle période en destination doit respecter la contrainte $T_j \leq T_j^{max}$, et prendre une valeur harmonique avec les autres partitions présentes.

→ On calcule un ensemble N_{MAF} de MAF candidates pour chaque module.

Problème d'optimisation multi-critère

On cherche dans l'espace produit cartésien des ensemble des MAF candidates, la combinaison qui

- Minimise la charge des modules,
- Maximise la marge sur les délais de bout-en-bout ($E2E_{ij}^{max} - E2E_{ij}$)

Algorithmes d'optimisation

- Sélection locale aux modules des MAFs Pareto-optimaux
- Recherche globale
 - Exhaustive avec réduction
 - Tabou

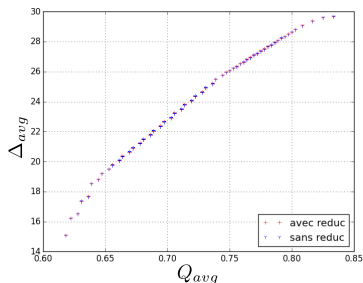
Illustration des résultats

Les résultats sont donnés pour 15 modules, avec par module

- 3 à 5 partitions
- 1 à 4 communications entrantes

Performance des algorithmes de recherche

- La recherche exhaustive avec réduction ne dure que 3 minutes environ,
- Il faut à peine 300 itérations à Tabou pour trouver le front en ne testant que 22% de l'espace des solutions.



I. Une vue d'ensemble de mes activités de recherches

Parcours académique

Thématiques de recherche

Co-encadrements de thèse

II. Contributions choisies

Performances multicritère des réseaux maillés sans-fil

Allocation temporelle dans les systèmes avioniques

III. Perspectives de recherche

CLOcK : Vers la certification temporelle de réseaux sans-fil maillés

IV. Enseignement et responsabilités.

Perspectives présentées dans le mémoire

- Transport de flux additionnels dans les réseaux avioniques
 - **asynchrones** (e.g. AFDX) : vidéo, audio. Etude de l'ordonnement des flux à l'émetteur.
 - **synchrones** (e.g. TSN) : vidéo, audio. Etude de l'ordonnement des flux à l'émetteur et dans les commutateurs.
- GoIA : Construction de vues thématiques dans les grands graphes orientés dynamiques.
 - Analyse des interactions entre les sommets appartenant à une vue thématique du grand graphe à l'aide de la matrice réduite de Google.
 - Construction / augmentation de la vue thématique.
- CLOcK : Vers la certification temporelle de réseaux de capteurs sans-fil maillés.

Vers la certification temporelle de réseaux de capteurs sans-fil maillés

Le déploiement de réseaux de capteurs sans-fil dans les systèmes embarqués présente des avantages certains :

- Réduction du poids : diminution de la consommation énergétique,
- Réduction de l'encombrement des câbles : maintenance et fabrication simplifiée.



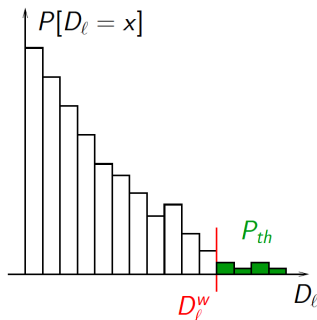
Certification temporelle d'un réseau embarqué

Un avion commercial ne peut voler sans avoir obtenu de certification d'une agence de sécurité aérienne.

Pour le réseau embarqué, il faut calculer **une borne supérieure sur le délai de communication de bout-en-bout**.

- Pour un réseau AFDX, on utilise le calcul réseau pour obtenir une borne déterministe.
- Pour un réseau sans-fil, il faut définir une borne probabiliste :

$$D_\ell^w = \max D_\ell \text{ s.t. } P[D_\ell \geq D_w] < P_{th}$$



Vers la certification temporelle de réseaux de capteurs sans-fil maillés

Proposer un cadre complet permettant de calculer un délai pire-cas de communication dans un réseau maillé sans-fil.

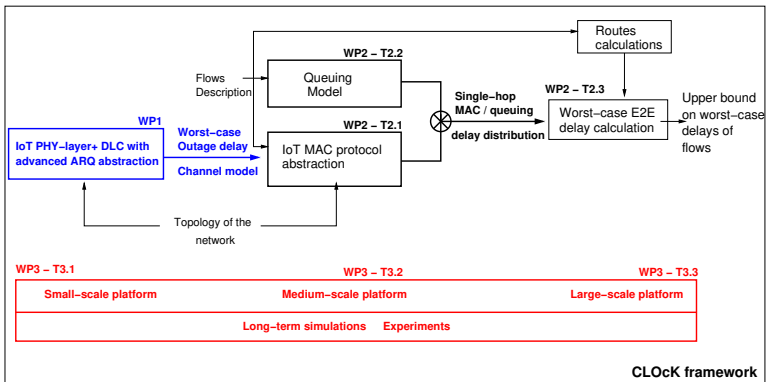


Figure: CLOcK certification framework.

I. Une vue d'ensemble de mes activités de recherches

Parcours académique

Thématiques de recherche

Co-encadrements de thèse

II. Contributions choisies

Performances multicritère des réseaux maillés sans-fil

Allocation temporelle dans les systèmes avioniques

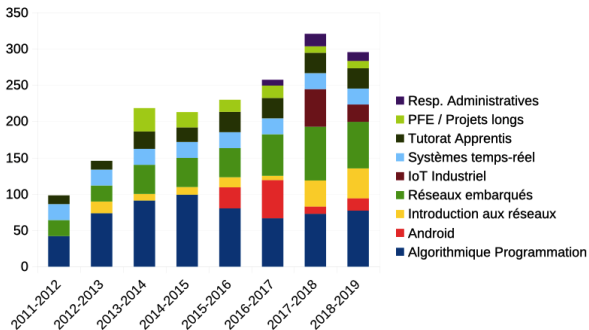
III. Perspectives de recherche

CLOcK : Vers la certification temporelle de réseaux sans-fil maillés

IV. Enseignement et responsabilités.

Responsabilités

- Parcours 3SN "Systèmes Embarqués et IoT Industriel" (SEmblIoT) depuis 2017.
- Parcours "Réseaux Embarqués et Objets Connectés" (REOC) de M2 avec l'INSA depuis 2017.
- Création du DU "Concepteur de Solution IoT", ouverture à la rentrée 2019.
- Co-gestion Vivier 26-27
- Correspondante de la mission handicap ENSEEIHT



Collaborations scientifiques

- Jean-Luc Scharbarg, Christian Fraboul, Jérôme Ermont, Gentian Jakllari, Charly Poulliat, Adrien van den Bossche, Thierry Val, Sandrine Mouysset à l'IRIT ;
- Dima Shepelyansky, Klaus Frahm, au Laboratoire de Physique Théorique ;
- Claire Goursaud, Hervé Rivano, Cédric Lauradoux, Frédéric le Mouël, Aline Carneiro Viana, en France ;
- Marco Fiore (CNR, Italie), Silvia Giordano (SUPSI, Suisse), Mirco Musolesi (UCL, UK), Julinda Stefa (Sapienza, Italy), Stefano Mei (Sapienza, Italy), en Europe ;
- Cristina Comaniciu (Stevens, USA), Tracy Camp (Mines, CO, USA), Damla Turgut (UCF, USA), Lotzi Bölöni (UCF, USA), Yi Sun (ICT-CAS, Chine), Antonio Loureiro (UFMG, Brésil) à l'international ;

(Co-)Encadrements

- Anya Apavatjrut, Mary Schurgot, Nie Nie, Hassan Mahmood, Qiong (Janet) Shi, Qi Wang, Pedro Olmo Vas de Melo, Nesrine Badache, Abdelaziz Ahmed Nacer, Qiankun Su, Samer El Zant, Oana Hotescu, Adriano di Luzio avec qui j'ai travaillé **au cours de leur thèse** ;
- Tao Peng, François Despaux, au cours **de leur post-doc** ;
- Seyhun M. Futaci, Fadel Abdallah, Santiago Gonzalez, Vlad Nitu, Alex Millet, Samy Ouachiah, Aiman Elhaimer, Wafa Alouini, François Pedurand, Alexandra Rautu, Julien Schrive, Eliès Jurquet, Romain Lafont, Aurélien Aubry, Estelle Jezequel, **lors d'un stage**.

3 Mars 1923

INITIATION A LA T. S. F.

no 4018 — XXVII



LE CONDUCTEUR EMBARRASSÉ. — Le recours, par T. S. F., aux conseils du mécanicien de la villa
Composition de L. SARATILIA.

