



Introduction à la Radio cognitive

Marceau Coupechoux (1), Philippe Godlewski (1), Loutfi Nuaymi (2)

(1) Telecom ParisTech, Département Informatique et Réseaux

(2) Telecom Bretagne

Avec l'aide de Patrick Totelier (Orange Labs)

Plan de la présentation

- Introduction
- Classification des modèles de gestion du spectre
- Scénarios d'utilisations
- Conclusion

Introduction

- Besoins en spectre grandissants
 - WiFi, cellulaire (GSM, UMTS, LTE), Bluetooth, ...

- Fixed Spectrum Assignment (FSA)
 - Assignment (allocation) de spectre ... complexe et peu flexible
 - Le spectre est divisé en petites parties
 - Il n'est pas agnostique à la technologie
 - Forte régulation

- Le spectre est mal ou sous utilisé
 - L'occupation peu homogène
 - Des parties sont sous utilisées
 - D'autres sont congestionnées

- Spectrum hole
 - Utiliser les parties de spectre (momentanément) disponibles

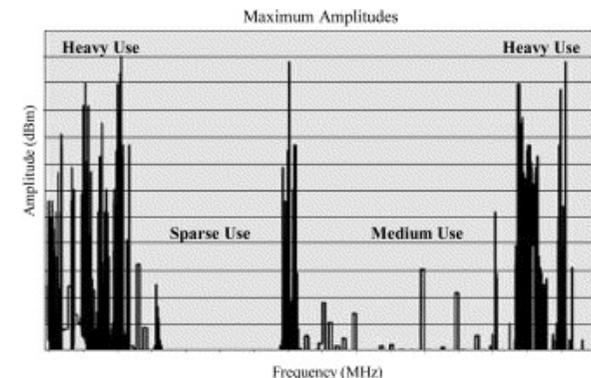


Fig. *Spectrum utilization (example)* [13]

Introduction

- **Explosion du trafic de données**
 - Alors que le trafic voix est en relative stagnation
 - Le trafic vidéo prend en essor considérable
- **La radio devient flexible**
 - Software Defined Radio
 - Cognitive Radio/Networks
 - Dynamic Spectrum Access/Allocation
- **Les technologies sont multi-porteuses**
 - OFDMA (LTE, WiMAX), SC-FDMA
 - Agrégation de porteuses (HSPA+, LTE, LTE-A)
- **On observe une grande hétérogénéité**
 - De réseaux: cellulaire (3G+, 4G), BLR (WiMAX), réseaux locaux (WiFi), courtes portées (Bluetooth, Zigbee)
 - D'usages: voix, vidéo, Internet, IoT
 - De terminaux: tablettes, smartphones, PCs, M2M.
- **Les régulateurs modifient les règles**
 - Le spectre devient agnostique
 - Des utilisateurs secondaires peuvent accéder au spectre (IEEE 802.22)

Introduction

De quelle ressource parle-t-on ?

- Ressource = spectre électro-magnétique
- C'est une ressource précieuse (cf. le coût des licences)
- L'atténuation s'accroît quand la fréquence porteuse augmente → plus la fréquence augmente plus la couverture est faible → augmentation du coût de l'infrastructure.
- Les « bonnes » fréquences sont en dessous de 6 GHz. Le spectre en dessous de 6 GHz n'est pas infini.
- Il y a la même quantité de ressource après utilisation (contrairement au pétrole ou au gaz par exemple).
- C'est une ressource immédiatement renouvelable (contrairement au bois, au poisson, etc.).
- Le problème vient de l'interférence (c'est-à-dire de l'utilisation concurrente de la même ressource)
- Nécessité d'avoir des schémas d'utilisation du spectre, de gestion de l'interférence et d'accès au spectre efficaces.

Plusieurs possibilités :

- Accroître l'efficacité spectrale (bits/s/Hz) grâce à des techniques avancées de traitement du signal : techniques multi-antennaires, schémas itératifs (turbo code), schémas tirant avantage de la diversité, détection multi-utilisateurs, annulation d'interférence.
- Protocoles MAC pour éviter de créer de l'interférence : Listen-Before-Talk, RTS-CTS pour résoudre le problème du terminal caché.
- **Allouer dynamiquement le spectre en profitant des variations géographiques et temporelles du trafic utilisateur (Dynamic Spectrum Access/Allocation).**

Différentes échelles de temps :

- Très court terme : adaptation de lien (changer la modulation et le codage en fonction des variations rapides du canal, on reste avec la même technologie)
- Moyen terme : adaptation aux changements lents du canal (handover, vertical handover entre différents RATs).
- Long terme : changement de politique d'accès au spectre ?

Bref historique

- Plusieurs technologies actuelles ont leurs origines dans des projets financés par des agences gouvernementales américaines, notamment DARPA (Defense Advanced Research Project Agency). Exemples:
 - Internet, réseaux ad hoc, CDMA, UWB, etc
 - Software Defined Radio (SDR): SpeakEasy project
 - Cognitive Radio (CR): XG program (accès dynamique au spectre pour les communications militaires).
- Buts :
 - Réduire les coûts (CAPEX et OPEX) des systèmes de communication militaires en intégrant des composants disponibles commercialement.
 - Encourager l'utilisation civile et militaires de nouvelles technologies.

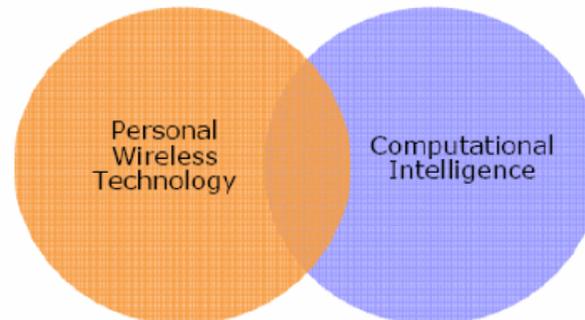
- J. Mitola a introduit le terme de Software Defined Radio au début des années 90 et le concept de radio cognitive dans sa thèse (1999).

Cognitive Radio History

Term coined by Joseph Mitola



- "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," Mitola and Maguire, IEEE Personal Communications, Aug. 1999.
- "Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," PhD dissertation, 2000.



Définitions

- Une radio cognitive est un dispositif
 - Au courant de son environnement radio et de sa position:
 - Capable de scruter son environnement,
 - Ou capable d'accéder à cette information en ayant par exemple accès à une base de données.
 - Capable d'apprendre de son expérience passée et de prendre des décisions.
 - Capable d'adapter son fonctionnement à son environnement radio et aux besoins de l'utilisateur (radio reconfigurable => SDR).
- La radio cognitive doit permettre l'utilisation intelligente de l'agilité permise par SDR (un terminal peut accéder à plusieurs réseaux, plusieurs bandes de spectre) pour un meilleur usage ou partage du spectre.

Définitions

Définition de l'ITU-R

- Une radio cognitive est un système radio employant une technologie permettant au système :
 - D'obtenir la connaissance de son environnement opérationnel et géographique, des politiques pouvant être établies, de son état interne,
 - D'ajuster dynamiquement et de manière autonome ses paramètres opérationnels et ses protocoles en se fondant sur la connaissance acquise dans le but d'atteindre des objectifs prédéfinis,
 - D'apprendre de l'expérience acquise.

Dynamic Spectrum Access \neq Radio Resource Management

- RRM = gestion du trafic pour un spectre et un RAT donné
- Joint RRM = gestion conjointe de deux spectres / deux RATs
- DSA = réallocation possible du spectre entre différents RATs

Définitions

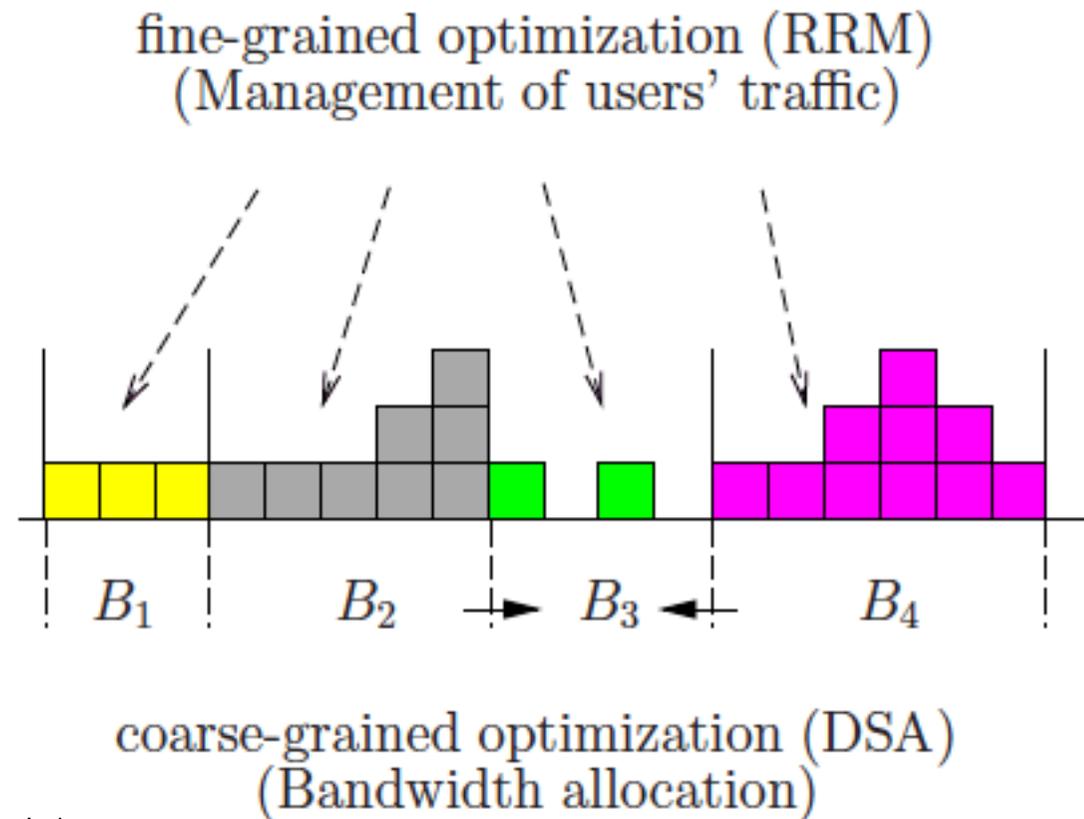
- **DSA vs. JRRM** (Joint Radio Resource Management)
- JRRM : utiliser au mieux et de manière conjointe les ressources radio allouées à différents réseaux d'accès (RAT).
- JRRM \neq DSA (Allocation) : les allocations de bandes entre RAT sont fixes.

- Fonctions du JRRM :
 - Sélection de RAT (partage de charge),
 - Sélection de cellule (hand-over vertical),
 - Allocation des ressources pour la QoS demandée,
 - Contrôle d'admission,
 - Ordonnancement joint.

- Deux grandes approches :
 - JRRM contrôlé par le réseau (« network centric »),
 - JRRM contrôlé par le terminal (« user centric »),
 - Méthodes hybrides...

Définitions

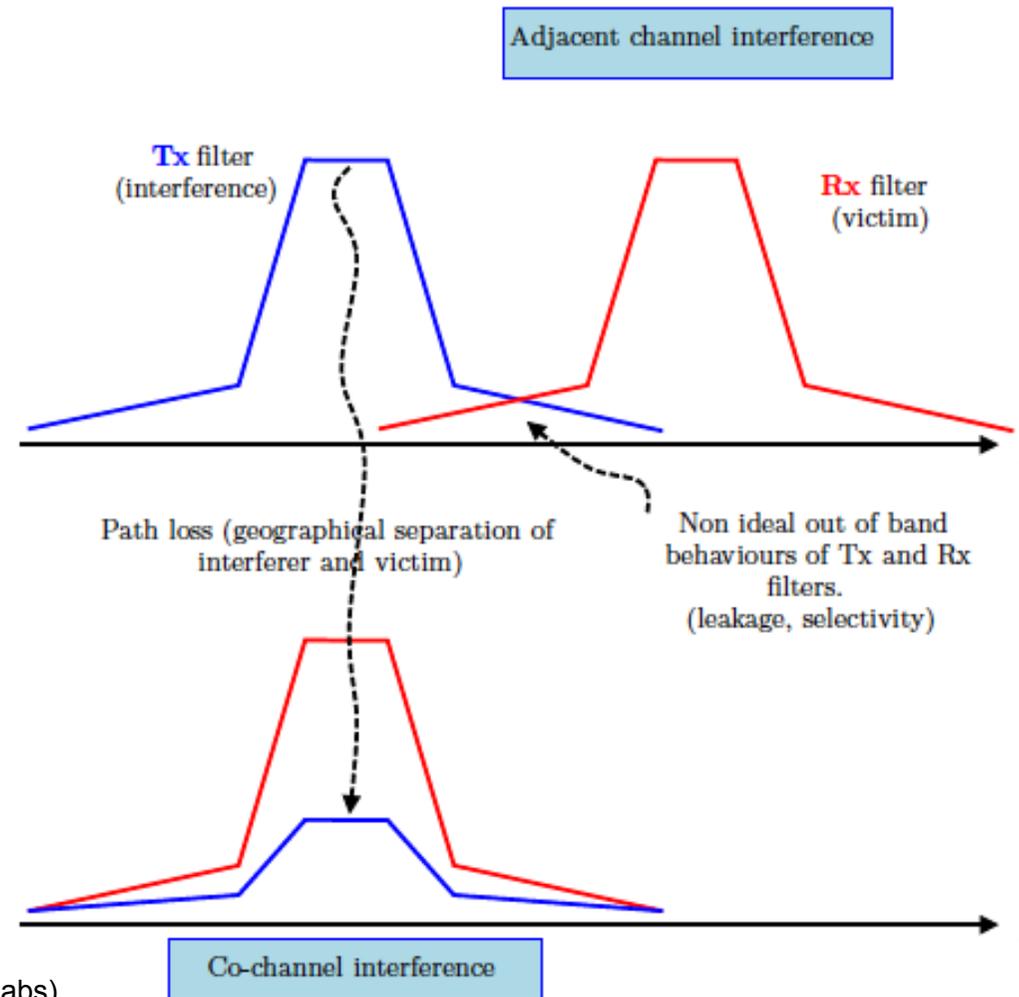
- Exemple de différence entre RRM et DSA : la bande B3 'dédiée au RAT3) peut être réduite et le spectre réalloué à B2 et B4 qui sont congestionnés.



Source: P. Tortelier (Orange Labs)

Définitions

- Interférence co-canal et canal adjacent :



Source: P. Tortelier (Orange Labs)

Définitions

- Le cycle cognitif :

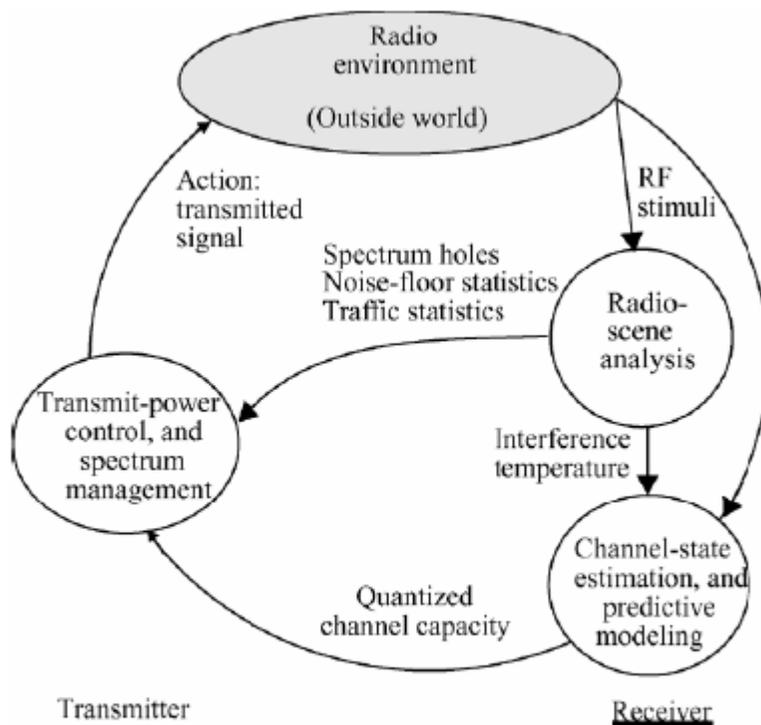


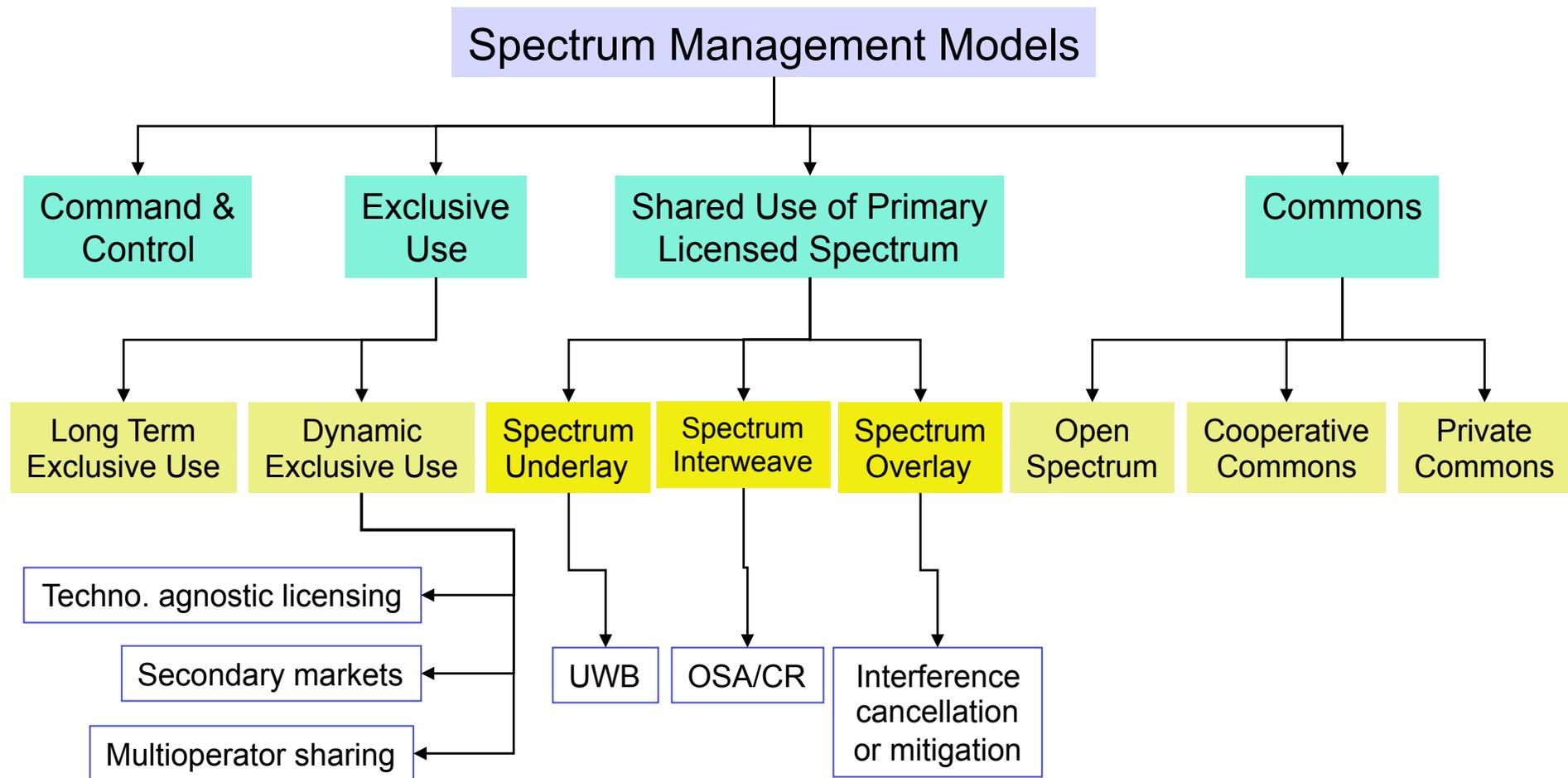
Fig.5 Basic cognitive cycle

Three cognitive tasks:

1. Radio-scene analysis
 - estimation of interference temperature
 - detection of spectrum holes
2. Channel identification
 - estimation of channel-state information
 - prediction of channel capacity
3. Transmit-power control and dynamic spectrum management
 - data rate
 - transmission mode
 - bandwidth of the transmission

Classification des modèles

- Plusieurs classifications existent [1-5], [1] semble être la plus claire.
- On utilise les caractéristiques de [2]. Les modèles peuvent coexister.



Classification des modèles

- Command & Control :

Command & Control

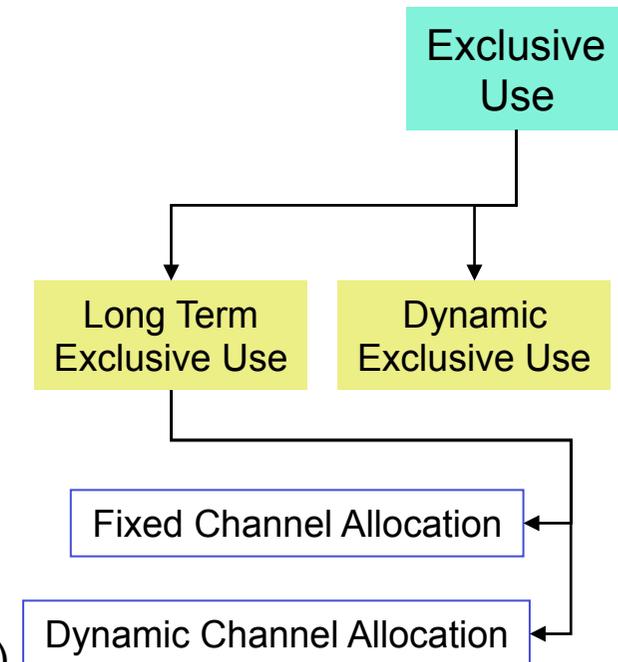
- **Non transférable** : l'accès ne peut être donné à un tiers
- **Usage exclusif** : pas de partage de bande entre opérateurs
- **Règles strictes** : le régulateur définit des règles strictes d'utilisation
- **Long terme** : l'allocation est quasi éternelle
- **Centralisé** : les mécanismes de gestion ou de contrôle du spectre sont centralisés

- Exemples : (pas de notion de marché)
 - Gouvernement
 - Défense
 - Radio astronomie
 - Opérations aéronautiques

- Peu d'intérêt pour la radio cognitive (trop statique, pas toujours efficace)
- Le plus sûr moyen d'éviter les interférences.

Classification des modèles

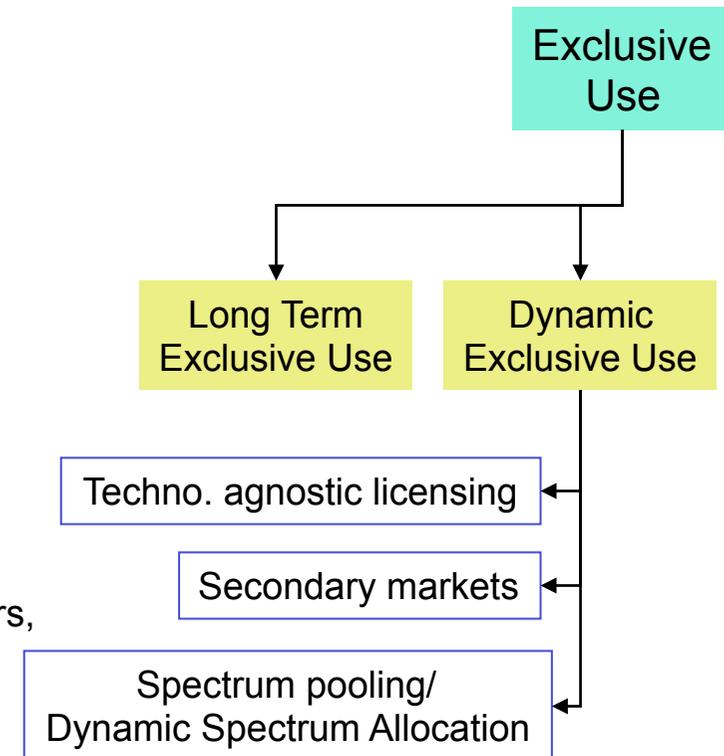
- Usage exclusif de long terme :
 - Non transférable
 - Usage exclusif : un seul opérateur
 - Règles strictes : une technologie
 - Long terme : licence pour 10-20 ans
 - Centralisé : l'opérateur gère ses ressources
 - Exemples :
 - GSM 900 : allocation fixe des fréquences (FCA)
 - UMTS : l'opérateur a trois porteuses (FCA)
 - LTE : l'opérateur dispose de bandes 800, 1800 et/ou 2600 MHz (en France)
 - DECT : DCA
 - Scénario actuel de référence pour les réseaux cellulaires



Classification des modèles

- Usage exclusif dynamique :

- **Transférable** : pour *secondary markets* et *pooling*
- **Usage exclusif** : à un instant et en un lieu donnés
- **Règles moins strictes** :
 - Un opérateur et plusieurs technologies
 - Ou une technologie et plusieurs opérateurs
 - Ou plusieurs opérateurs et plusieurs services
- **Moyen terme** : journée, jours, mois
- **Centralisé** : coordination éventuelle entre opérateurs, présence d'un *spectrum manager* ou *broker*

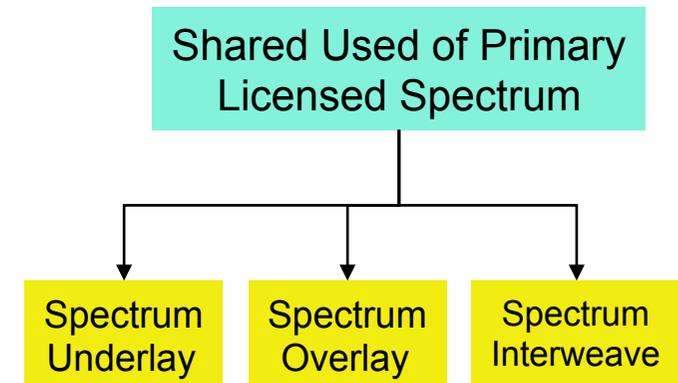


- *Techno. agnostic licensing* : un opérateur et plusieurs technos
- *Secondary markets* : un opérateur peut louer une partie de sa bande
- *Spectrum pooling* : partage d'une bande entre plusieurs opérateurs, nécessité d'un broker qui alloue dynamiquement le spectre aux opérateurs

Classification des modèles

- Usages primaire et secondaire :
 - **Non Transférable** : ne s'applique pas
 - **Usage non exclusif** : possibilité d'un usage secondaire
 - **Règles strictes** :
 - Usage primaire vis-à-vis du régulateur
 - Usage secondaire vis-à-vis de l'utilisateur primaire
 - **Court terme** : ms ou s
 - **Décentralisé** : accès opportuniste de l'utilisateur secondaire

- *Spectrum underlay* : niveaux de puissance très faibles, e.g. UWB
- *Spectrum interweave* : accès opportuniste (*opportunistic spectrum access OSA*), *listen-before-talk*, *cognitive radio*, *dynamic spectrum access*, etc
- *Spectrum overlay* : annulation d'interférence



Classification des modèles

- **PU: Primary User (Licensed User)**
 - Utilisateur ayant un droit exclusif sur une partie du spectre (“propriétaire de la license”)
 - Il n’a pas besoin d’être au courant de la présence des utilisateurs cognitifs (utilisateurs secondaires)
 - Pas de fonctionnalités cognitives
 - Exemple : un ensemble d’émetteurs DTV qui n’émettent pas tous sur toutes les fréquences disponibles (TV White Spaces = TVWS)
- **SU: Secondary User (Unlicensed User)**
 - Ce sont les utilisateurs cognitifs
 - Ils doivent laisser les utilisateurs primaires utiliser le spectre à leur convenance sans les perturber (réutilisation spatiale des fréquences, opportunités temporelles ou transmissions à faible puissance)
- **Problématiques classiques :**
 - Problèmes de terminaux cachés
 - Ecoute du spectre, détection de PU (*spectrum sensing*)
 - Partage des ressources entre SU

Classification des modèles

Un exemple d'accès opportuniste au spectre

- Des radars météo opèrent dans la bande UNII 5 GHz (prédictions à court terme, utilisés par exemple pour les atterrissages et décollages). Certains radars militaire également.
- → Interférences mutuelles avec IEEE 802.11a
- Exemple de politique (ETSI standard 301 893) :
 - Les WLAN doivent scruter le canal pour détecter la présence d'un radar
 - Si un radar est détecté, il doit libérer le canal sous 10 s et ne pas y revenir avant 30 min.
- Problème : certains radars sont difficiles à détecter (saut de fréquence, courtes impulsions)

Classification des modèles

- *Spectrum sensing* :
 - Détecter la présence d'un utilisateur primaire (PU)
 - Les PU peuvent avoir des seuils de sensibilité différents
- Trois approches:
 - Filtre adapté (Matched Filter)
 - Détection d'énergie (Energy Detector), test d'hypothèse Neyman-Pearson
 - Exploiter la cyclo stationnarité des signaux (balises répétitives, pilotes)
- Scrutation (*sensing*) autonome
 - Chaque SU (utilisateur secondaire) utilise ses propres mesures pour détecter la présence d'un PU
- Détection coopérative (*cooperative spectrum sensing*)
 - Des informations sont échangées entre SU voisines pour détecter un PU (échange de mesures, décision collective)

Classification des modèles

- Fausse alarme : on croit détecter un radar alors qu'il n'y en a pas
- Non détection : on ne détecte pas un radar pourtant présent (plus grave que la fausse alarme)
- La probabilité de fausse alarme P_{FA} et la probabilité de non détection P_{ND} ne sont pas indépendantes → Receiver Operating Characteristic (ROC) curve.

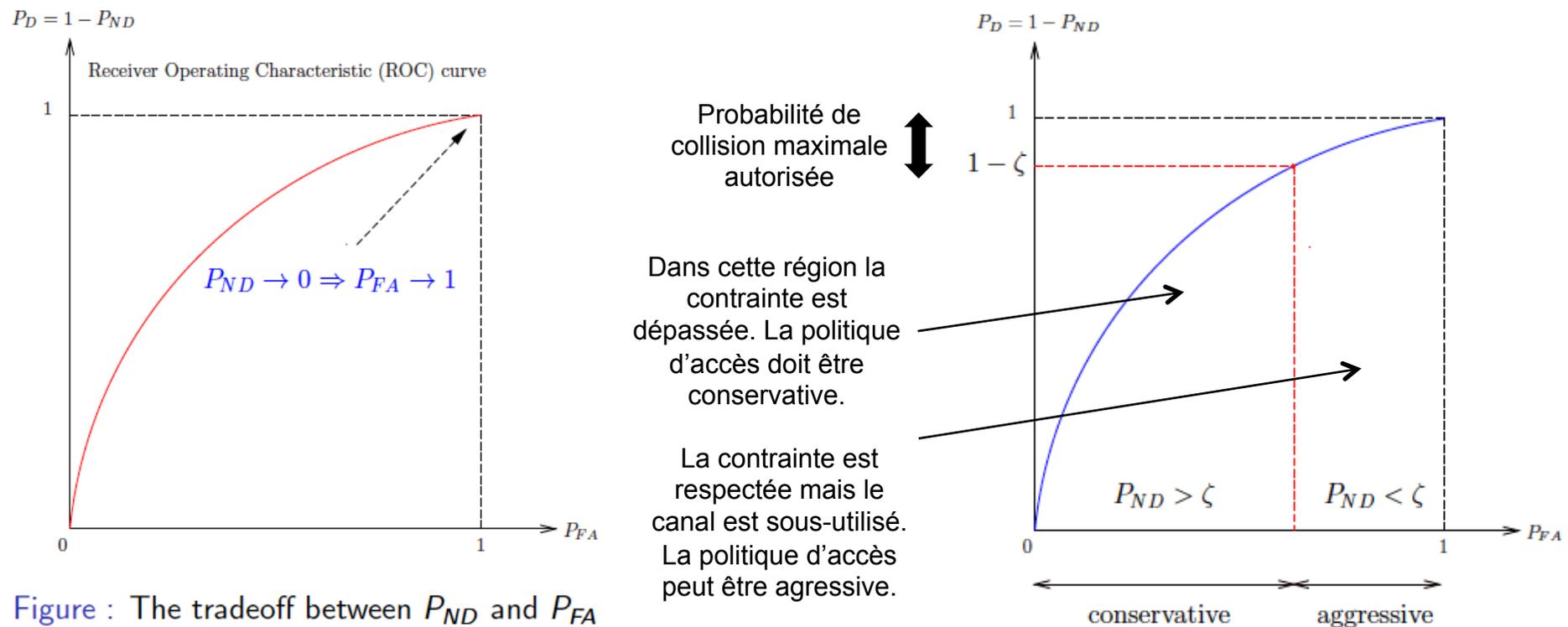
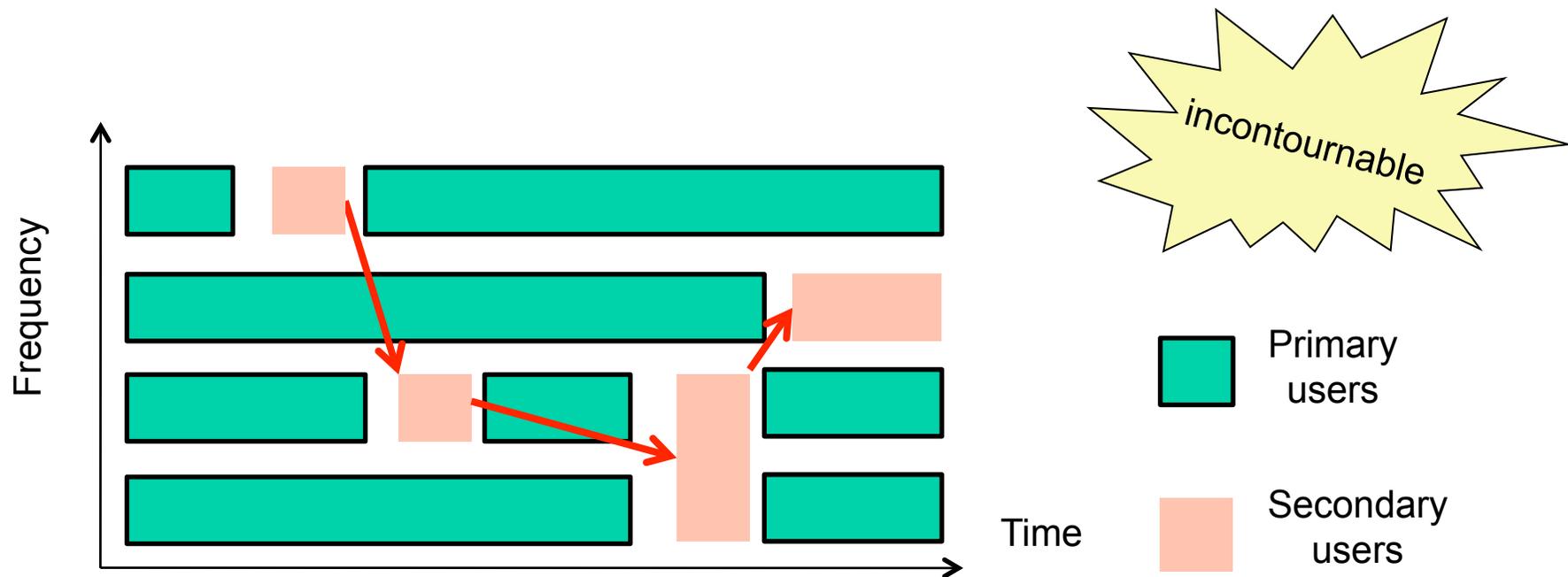


Figure : The tradeoff between P_{ND} and P_{FA}

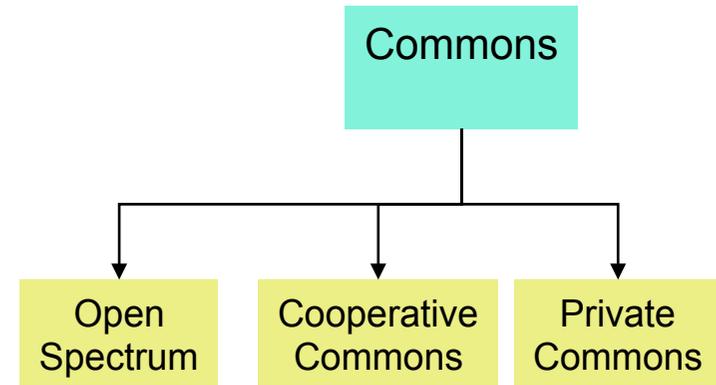
Classification des modèles

- **Interleave** : l'utilisateur secondaire profite des espaces laissés libres par l'utilisateur primaire pour communiquer
- Ces espaces existent dans les domaines spatial (zones blanches), temporel et spectral, on parle d'opportunités de spectre (*spectrum opportunity*)



Classification des modèles

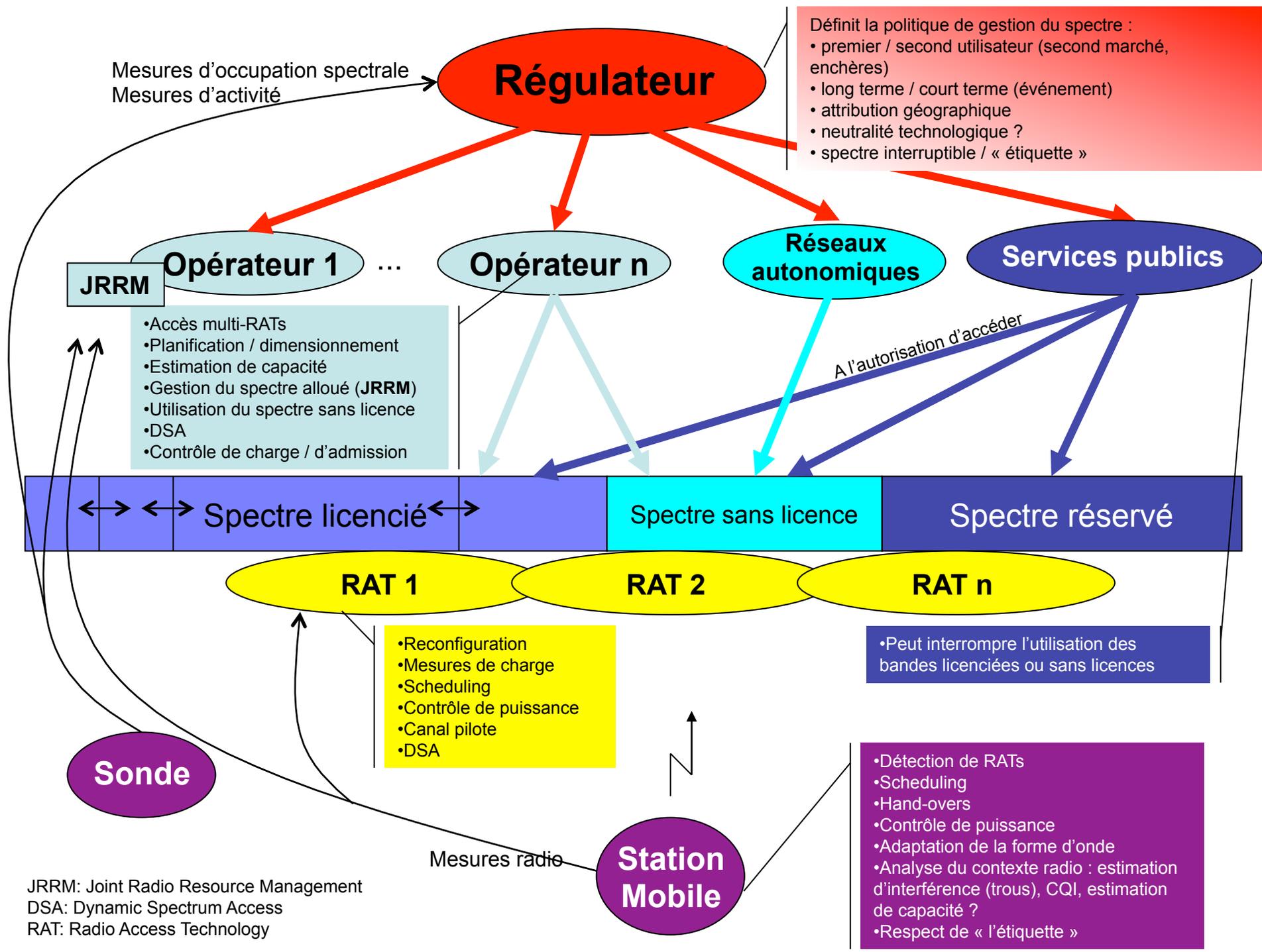
- Bien commun :
 - **Transférable** : ne s'applique pas
 - **Usage non exclusif**
 - **Règles non strictes** : étiquette, puissance max
 - **Court terme** : ms ou s
 - **Décentralisé**



- *Open spectrum* : règles minimales (sur la puissance émise)
- *Cooperative commons* : étiquette, le régulateur peut jouer un rôle de gestionnaire ou de « police » du spectre
- *Private commons* : similaire au précédent mais la bande mise en commun appartient au possesseur d'une licence ; les règles peuvent être plus strictes; cas des campus, gares, aéroports.

Classification des modèles

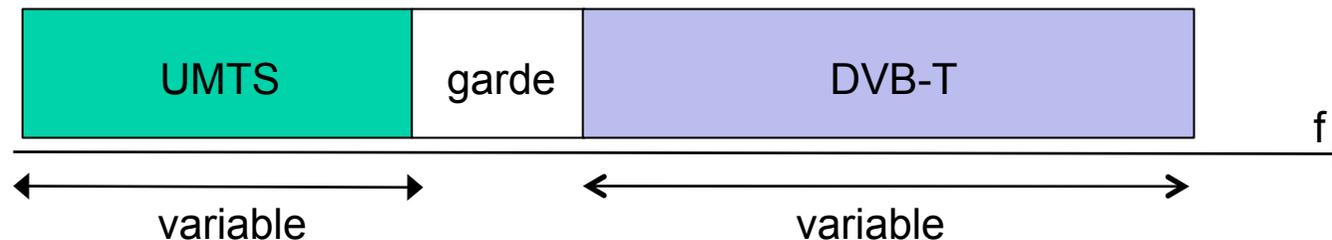
- **Open common** :
 - Bandes sans licence, par exemple ISM (2.4 GHz) ou UNII (5 GHz)
 - Quelques règles minimales comme une limitation de la puissance de transmission ou le protocole MAC
 - Pas de garantie de QoS car les interférences sont imprévisibles
- **Cooperative common** :
 - Sans licence mais avec des règles plus strictes aux niveaux PHY et MAC
 - Exemple : Accès sans fil à Internet en zone rurale (3650-3700 MHz) : nécessité d'employer un accès avec contention, les opérateurs doivent coopérer et ont accès à une base de données des émetteurs (FCC).
 - Problème : qui gère le commun ? Qui s'assure que tout le monde respecte les règles ?
- **Private Common** :
 - La bande appartient à un utilisateur primaire qui autorise l'accès opportuniste au spectre (éventuellement contre rétribution) et l'organise. Les opportunités d'accès sont signalées par le primaire.



JRRM: Joint Radio Resource Management
 DSA: Dynamic Spectrum Access
 RAT: Radio Access Technology

Scénarios d'utilisation : DSAllocation

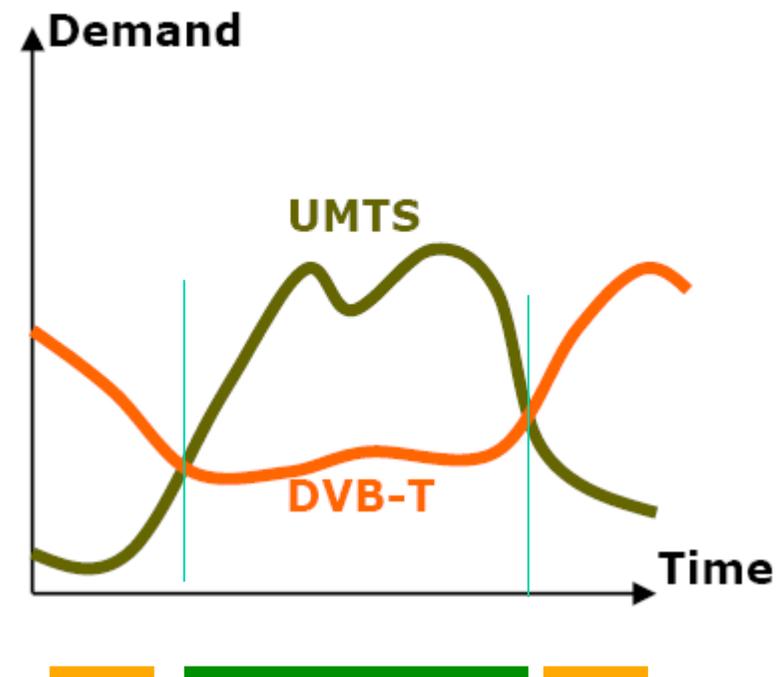
- Les projets européens **DRIVE** et **OverDRIVE** [10] [11] (Vodafone, Nokia, BBC, Daimler, etc)
- **Principe** : utiliser les variations temporelles du trafic pour mieux utiliser le spectre
- Le spectre est alloué de manière dynamique en fonction des heures de la journée (i.e. de la charge de trafic) soit à un système UMTS, soit à un système DVB-T



- Une architecture spécifique est proposée qui inclut les fonctions suivantes : contrôle de trafic, prédiction de charge de trafic, estimation de la bande nécessaire, pilot commun

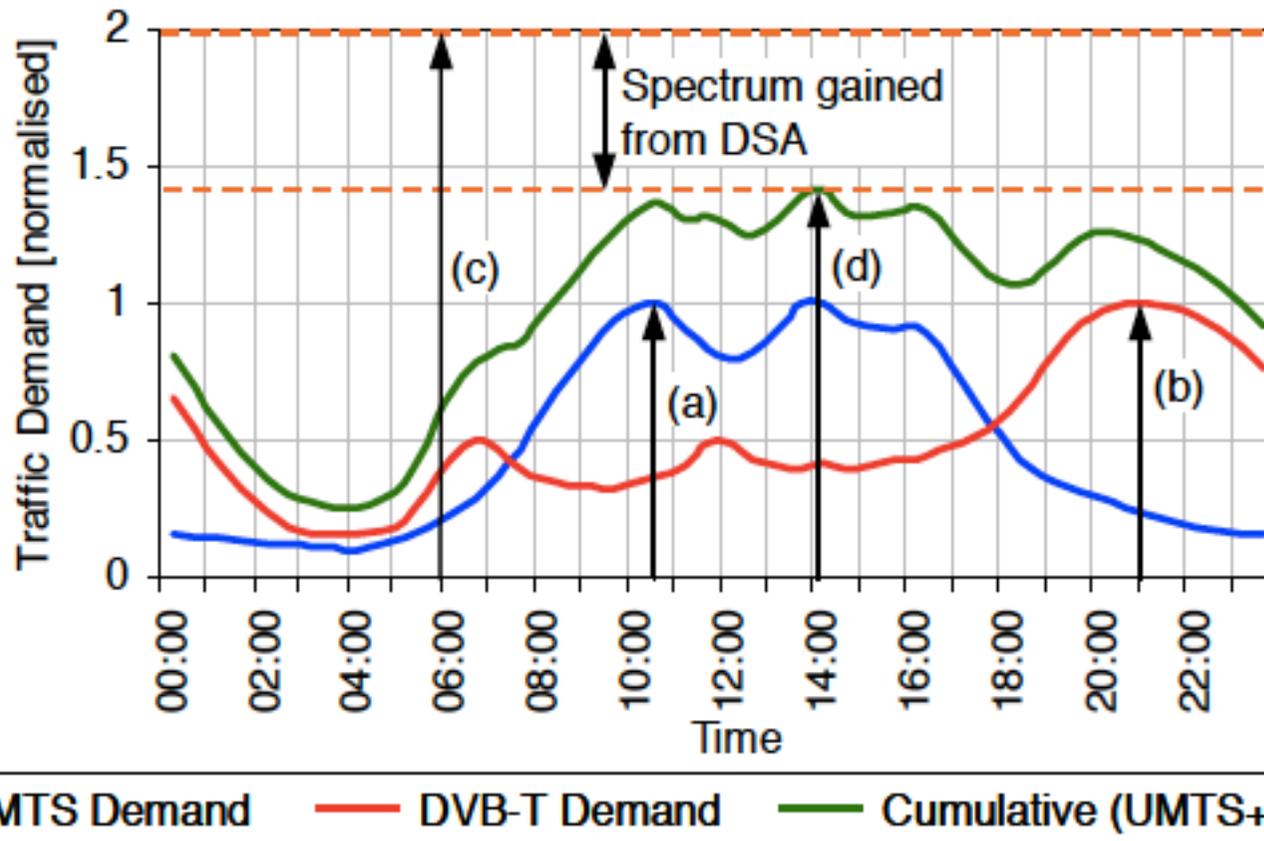
Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Flexibilité (partage)
- Une bande est assignée
 - le jour 7h - 19h
à un usage « cellulaire »
 - le soir la nuit à un usage
à un usage « télévision ».
- DSA temporel et géographique.



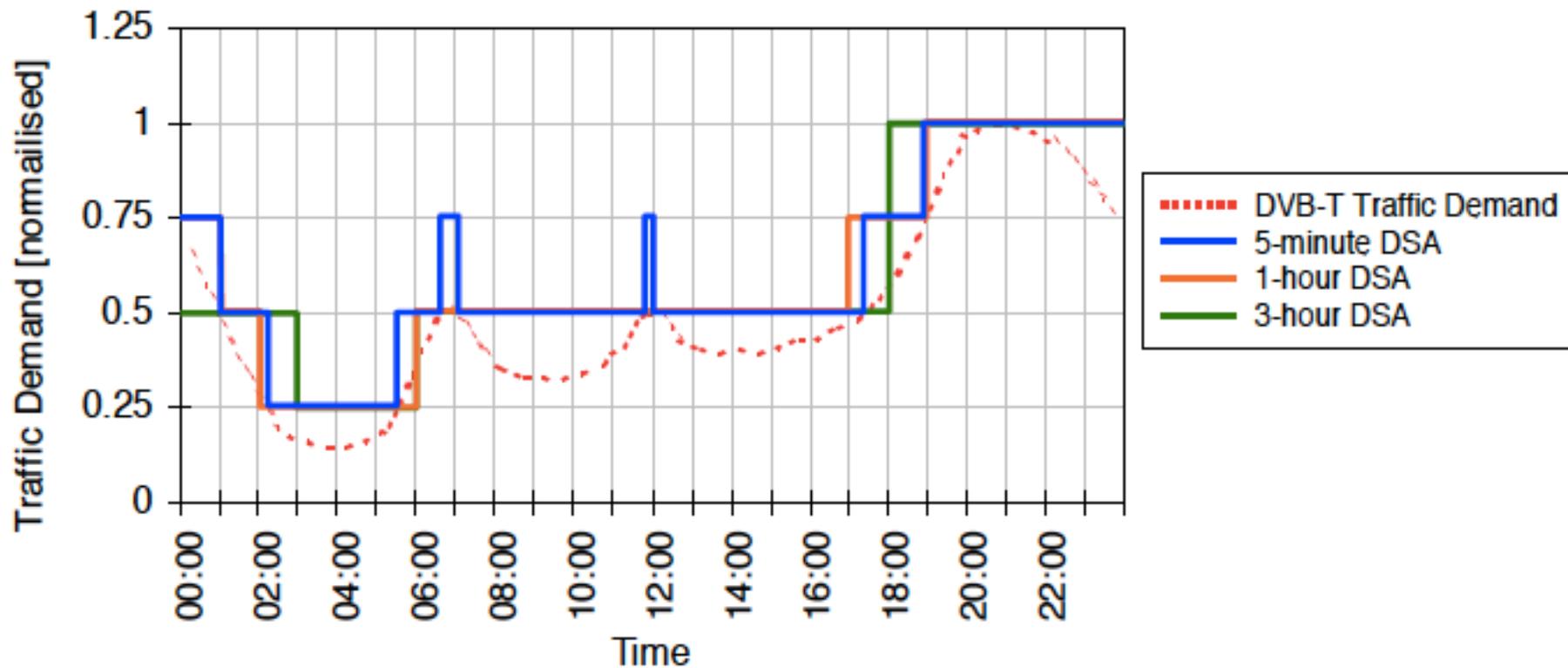
Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Le gain attendu est le « truncating gain » classique
- (a) : pic de trafic pour l'UMTS (b) : pic de trafic pour le DVB-T (c) : ressource nécessaires en FSA (d) : ressources nécessaires en DSA



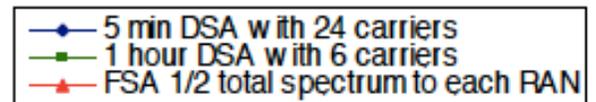
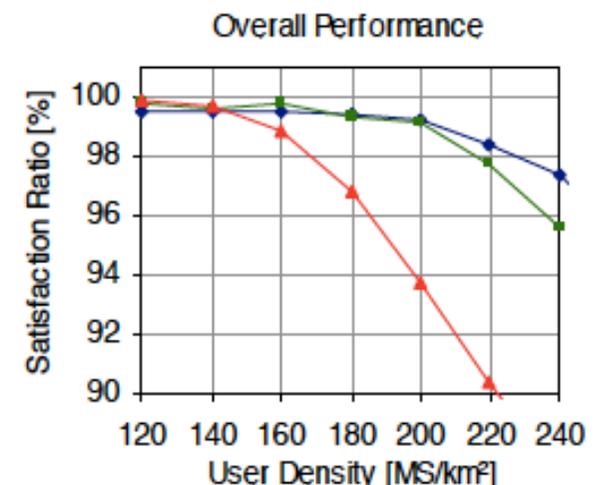
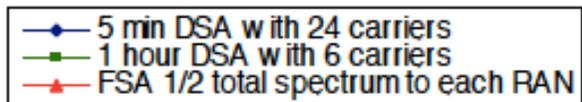
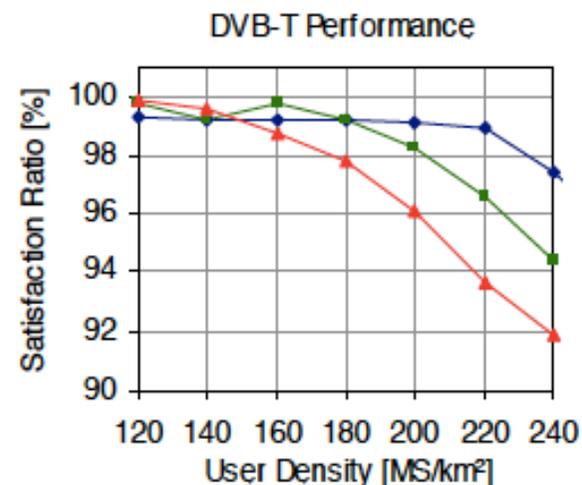
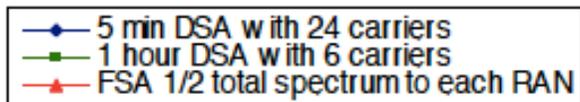
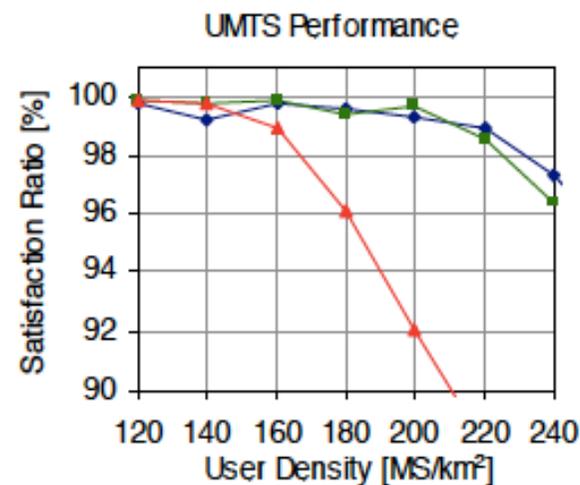
Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Les performances sont dépendantes de la périodicité de l'algorithme de DSA
- Sur cette figure, on suppose une estimation parfaite du trafic



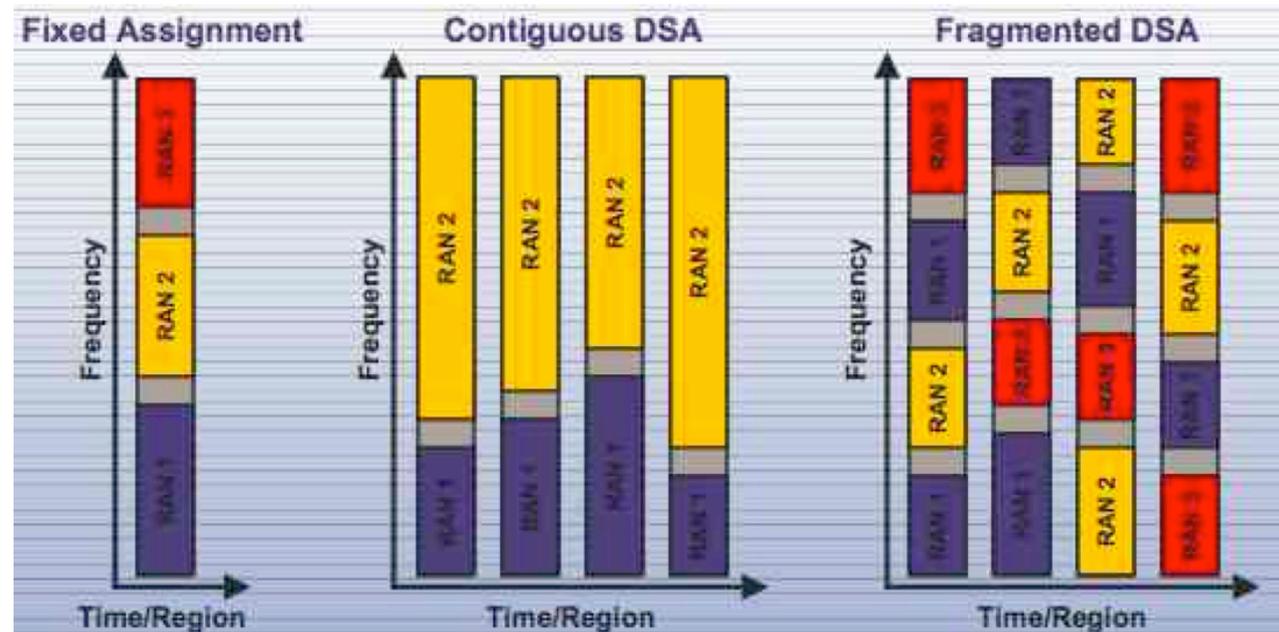
Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Les performances dépendent de :
 - La périodicité de l'algorithme de DSA
 - La granularité des blocs de spectre allouables



Scénarios d'utilisation : DSAllocation

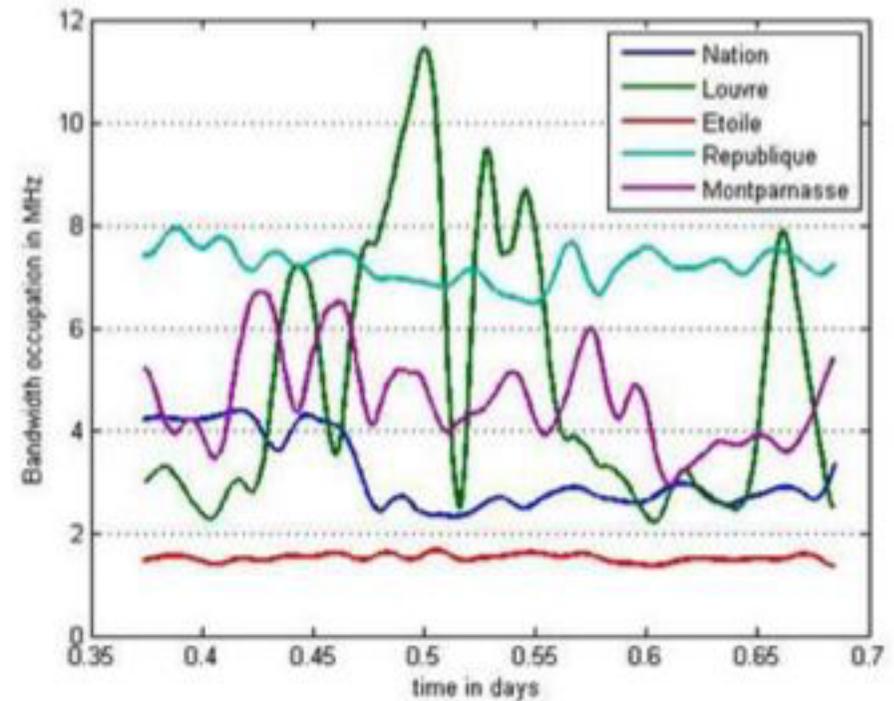
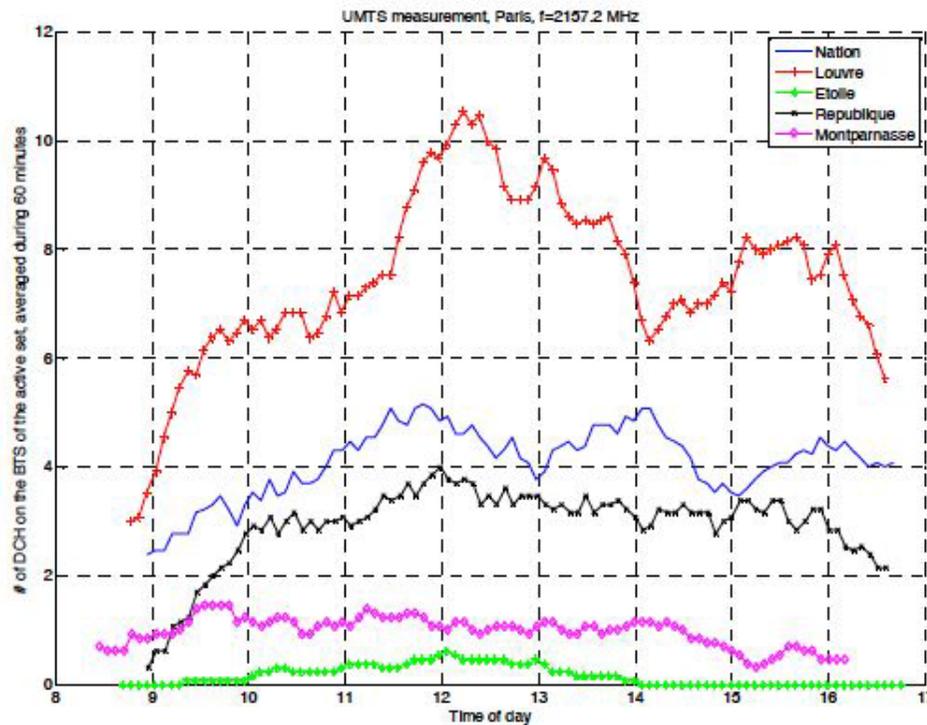
- Les scénarios étudiés par DRIVE et OverDRIVE de façon à exploiter les variations temporelles (DRIVE) et spatiales (OverDRIVE) du trafic.



[10-11]

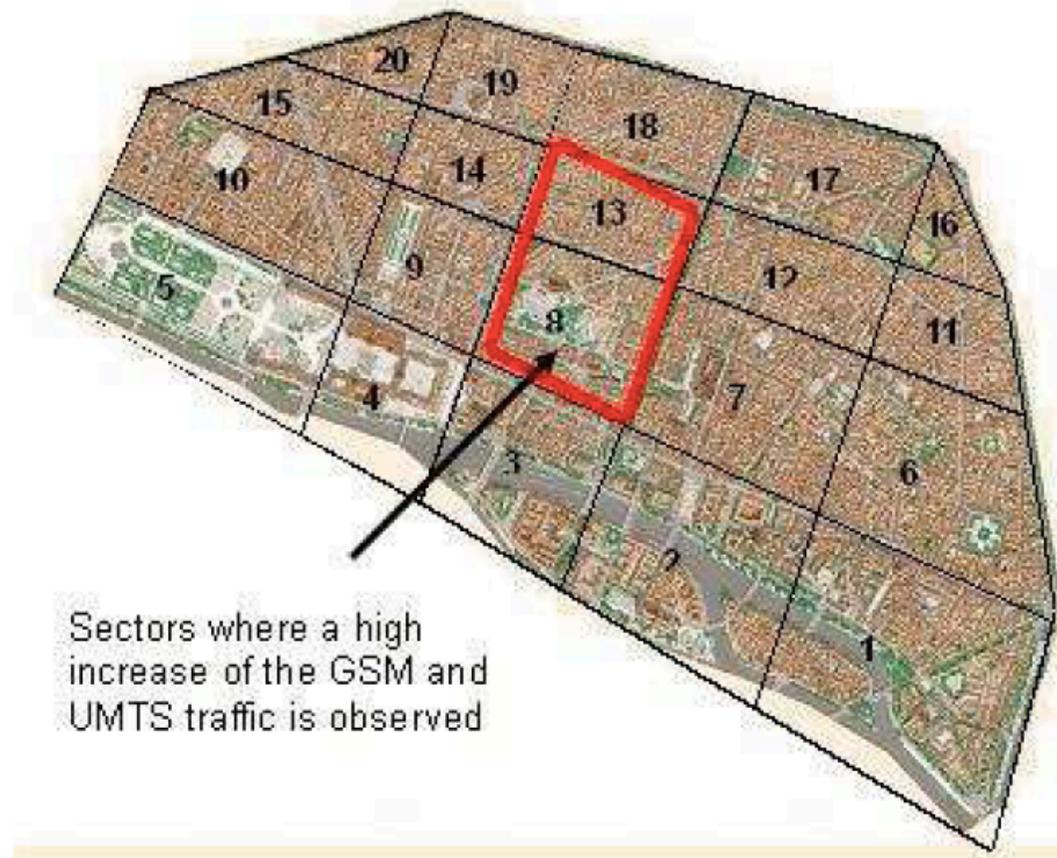
Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Exploitation des variations géographiques et temporelles du trafic
 - Mesures UMTS à cinq localisations à Paris (2,1GHz) [14]
 - Mesures PMR à Paris (450-470 MHz) [15]



Scénarios d'utilisation : DSAllocation

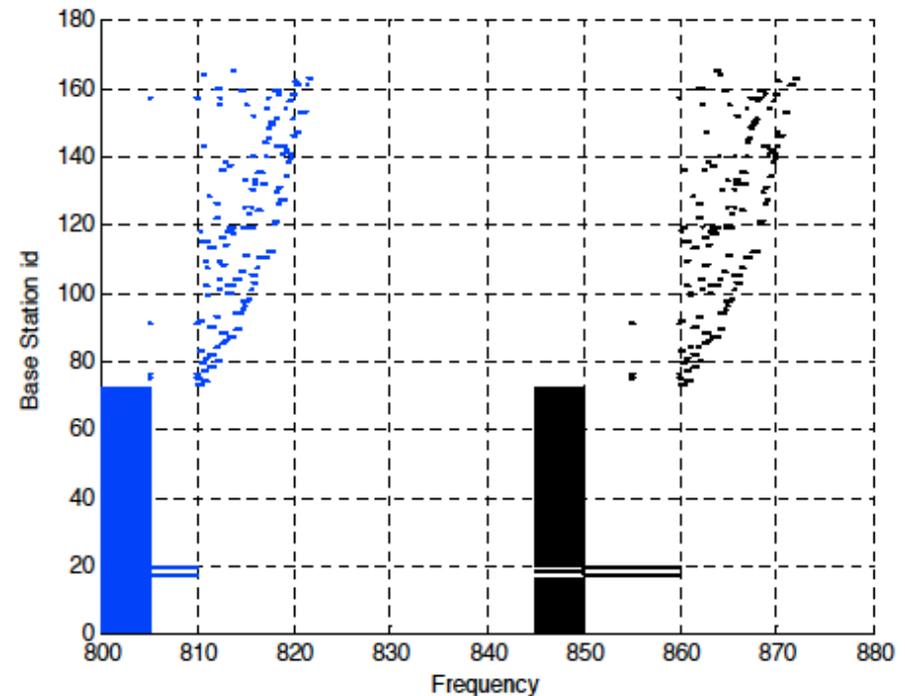
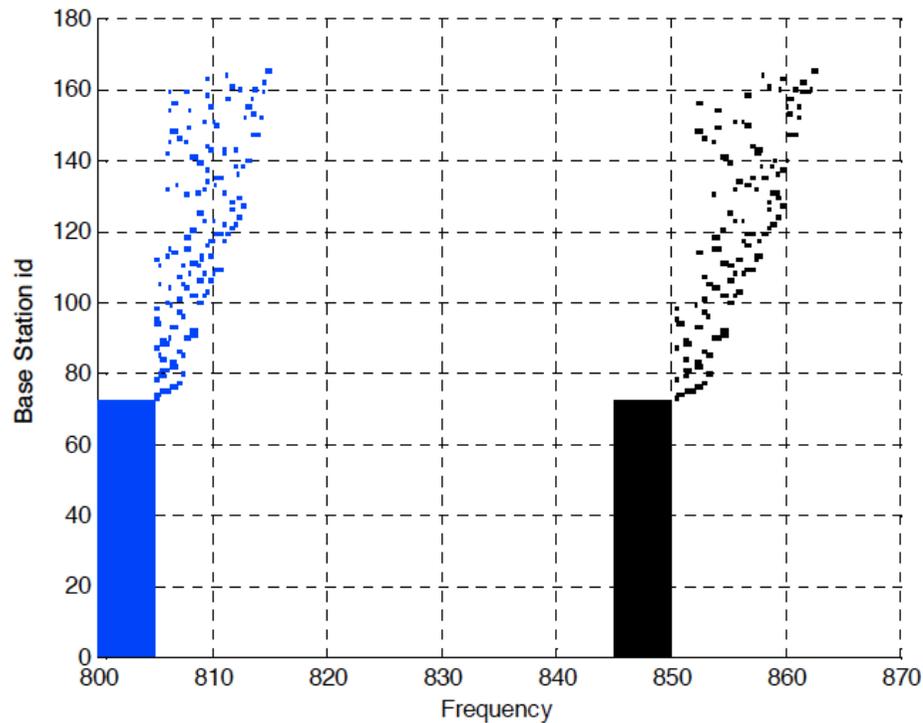
- Événement exceptionnel : alors que le réseau est dimensionné pour supporter une charge uniforme, un événement exceptionnel (sportif, festif, etc) provoque une congestion



[projet URC]

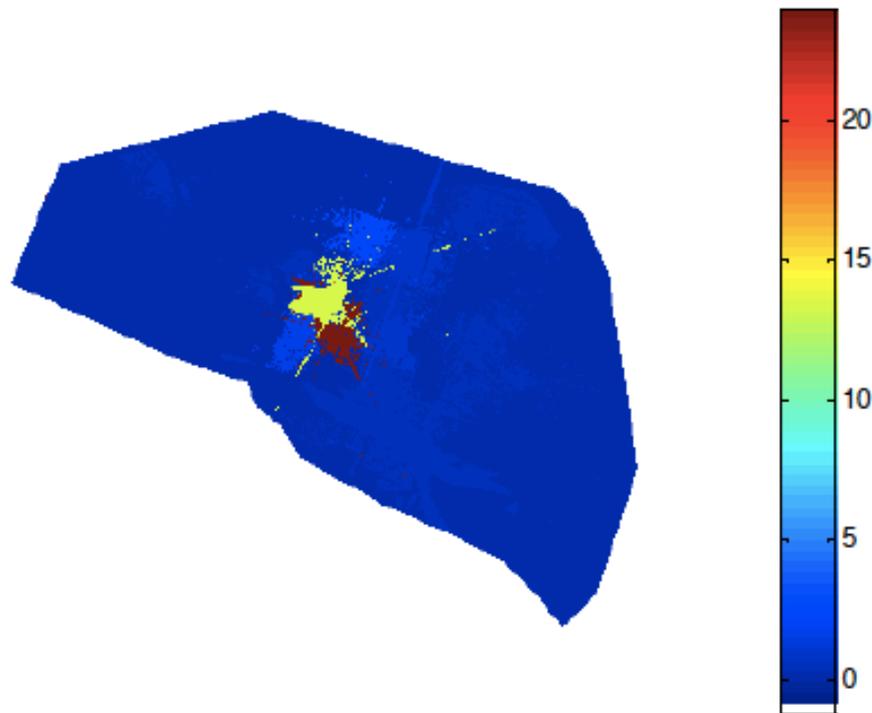
Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- L'opérateur de réseau cellulaire dispose d'un spectre et de deux RAT (UMTS et GSM)
- Il effectue une réallocation des bandes au moment de l'événement exceptionnel

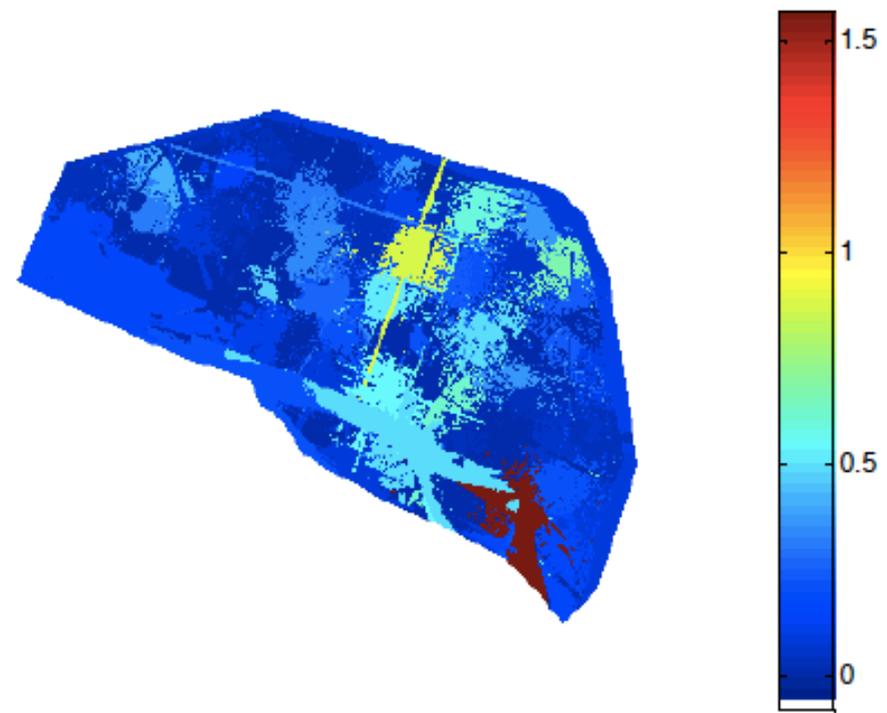


Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Probabilité de blocage GSM avec l'allocation initiale et avec l'allocation dynamique au moment de l'événement exceptionnel



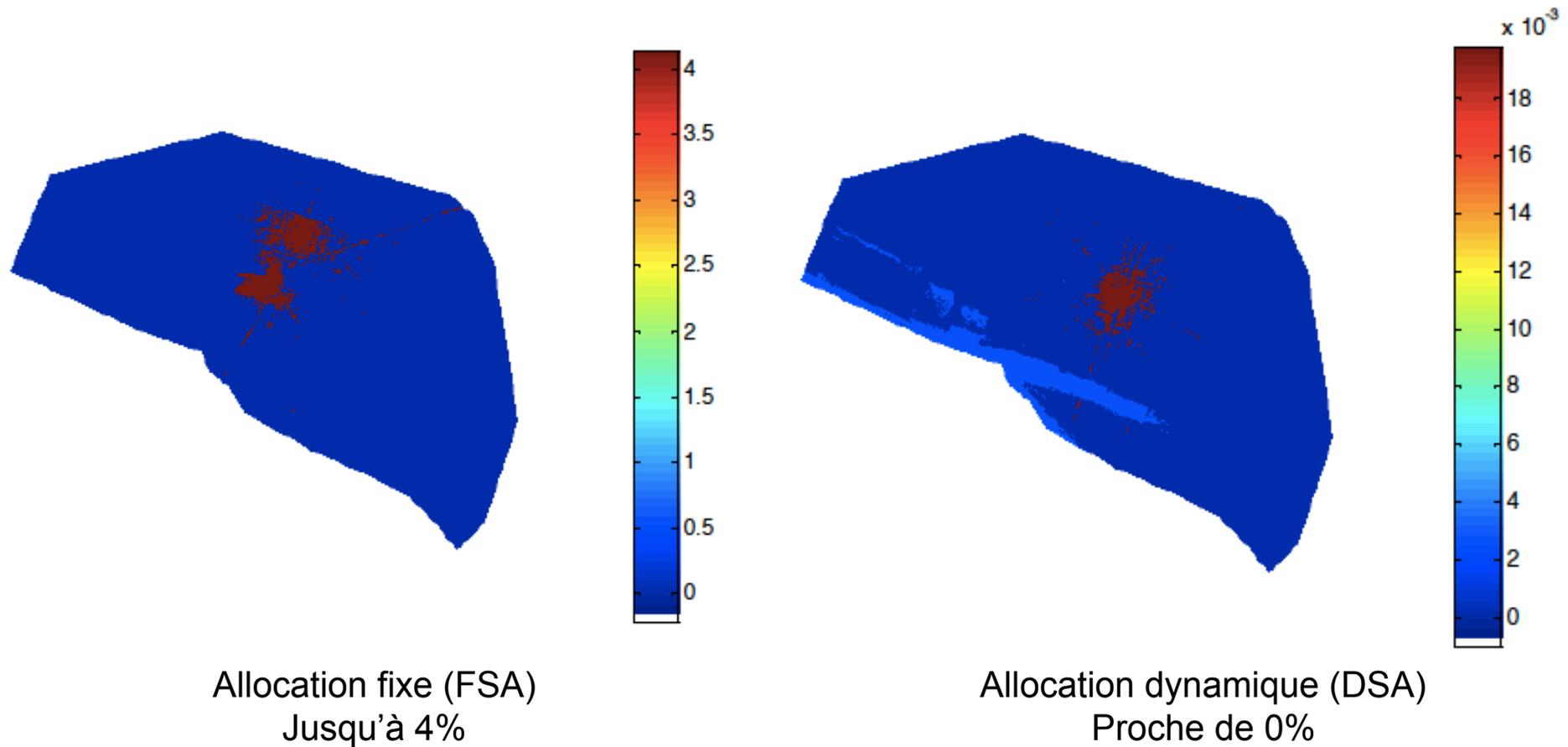
Allocation fixe (FSA)
Jusqu'à 24%



Allocation dynamique (DSA)
Jusqu'à 1,6%

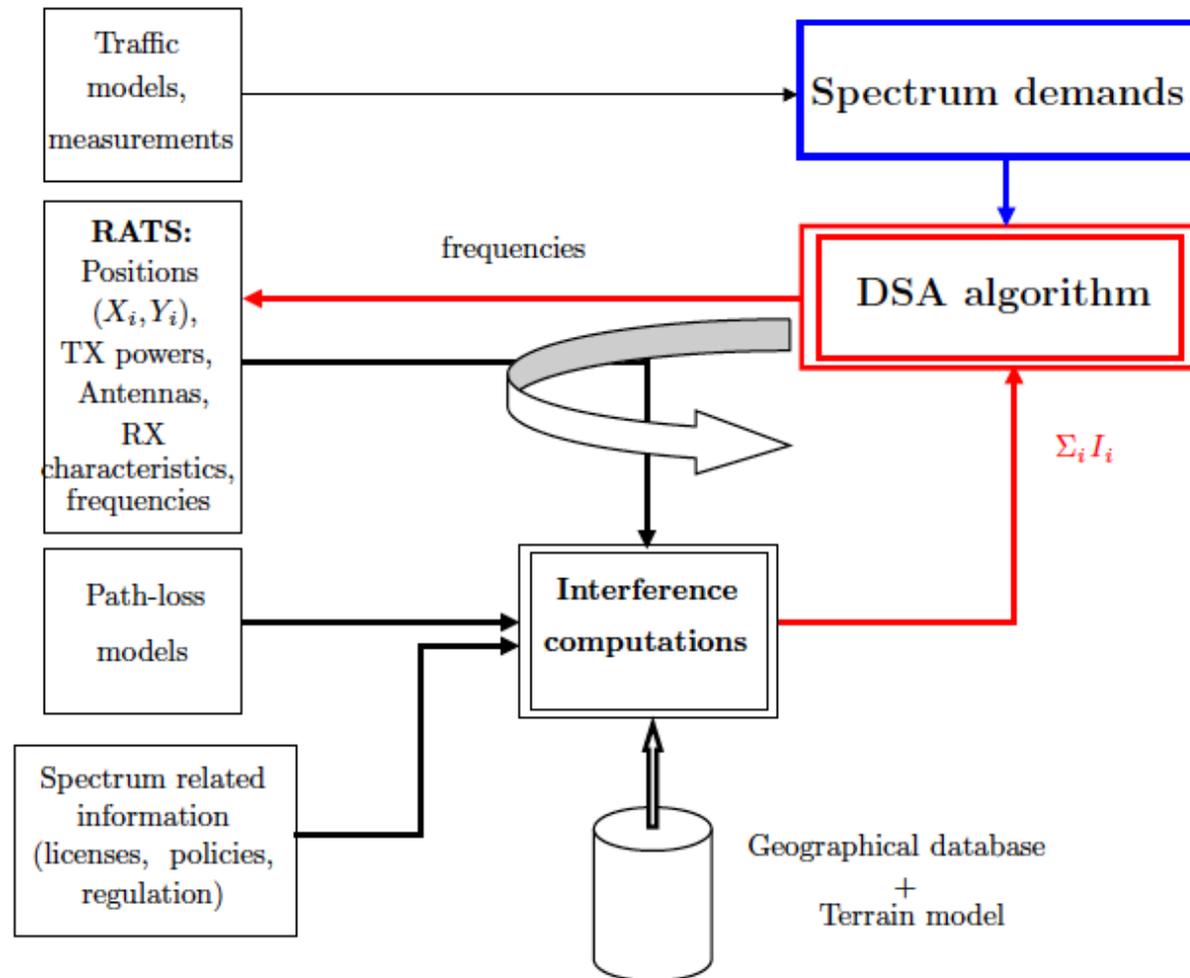
Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Probabilité de blocage UMTS avec l'allocation initiale et avec l'allocation dynamique au moment de l'événement exceptionnel



Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Une idée de l'algorithme
- Projet SYSTEMATIC URC : Thalès, Orange, Telecom ParisTech, Supélec, etc



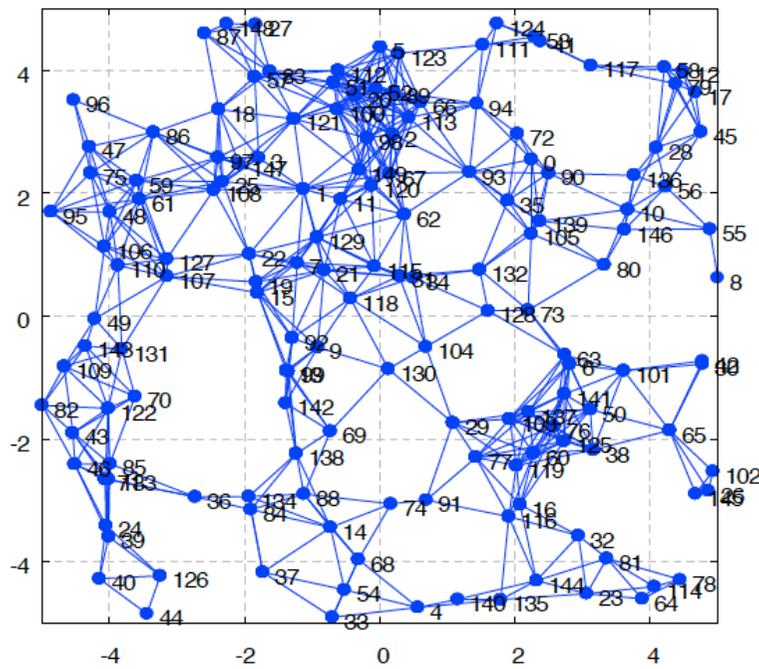
réclame

Scénarios d'utilisation : DSAllocation

- Une autre approche, fondée sur la recherche Tabou

$\mathbf{f}_i = (f_{i,0}, f_{i,1}, \dots, f_{i,N-1})$ is the set of **active frequencies**

$$\min_{\{f_{i,k}\}} \sum_i I_i \approx P \times \sum_i \left(\sum_{j \in V(i)} g_{i,j} \sum_k \{f_{i,k} f_{j,k}\} \right)$$



Initialization :

$S \leftarrow S_0$ // initial solution obeying demand constraints

$S_* \leftarrow S_0$ // current best solution

$f_* \leftarrow f(S_0)$ // current best criterion

$T = \emptyset$ // initial tabu list is empty

repeat {

$S \leftarrow \arg \min_{S' \in Neighborhood(S) - T} f(S')$

if $f(S) < f_*$ then {

$S_* \leftarrow S;$

$f_* \leftarrow f(S);$

put $move(S_* \rightarrow S)$ in T

}

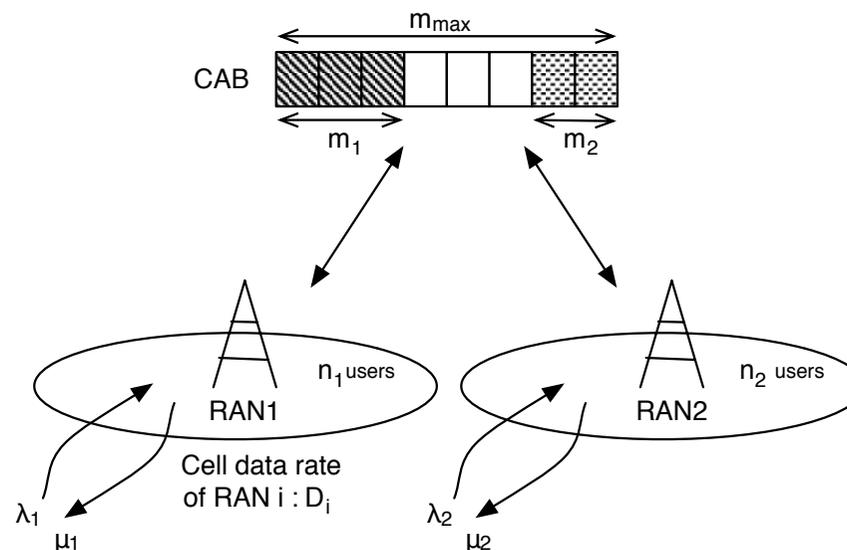
} until termination _criterion

Scénarios d'utilisation : marché secondaire

- **Marché secondaire du spectre** : exemple de WiMAX
- En 2006, l'ARCEP (Autorité de régulation des communications électroniques et des postes) a attribué des autorisations d'utilisation de fréquences de boucle locale radio (BLR) dans la bande 3,4- 3,6 GHz (technologie WiMAX) dans les 22 régions métropolitaines.
- Elle a prévu deux mécanismes de « marché secondaire » des fréquences :
 - La cession : elle revêt en principe un caractère onéreux, mais peut être effectuée à titre gratuit
 - La mise à disposition : le titulaire confie l'exploitation de tout ou partie de ses droits sur la fréquence à un tiers, sans renoncer à la propriété.

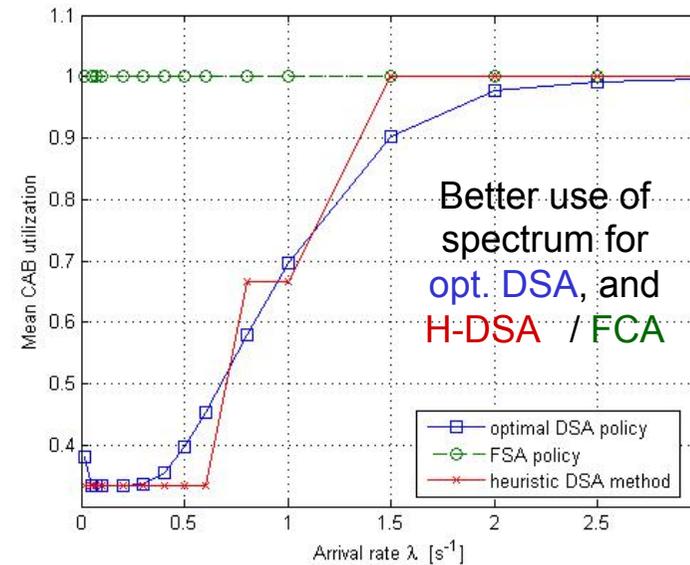
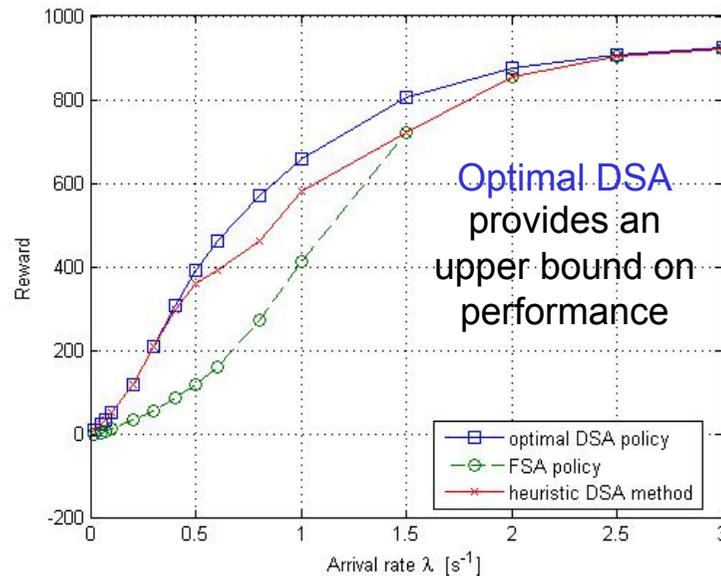
Scénarios d'utilisation : spectrum pooling

- **Spectrum pooling** ou Coordinated Access Band (CAB)
- Ce modèle généralise le scénario DRIVE à plusieurs Radio Access Networks (RAN)
- Pool de spectre ou CAB : une bande de fréquence divisée en blocs qui peuvent être attribués à un ou plusieurs RANs de manière dynamique
- Un unique opérateur : il gère son spectre de manière centralisée
- Plusieurs opérateurs : il est nécessaire d'introduire un « spectrum broker », i.e., une entité tierce pour l'allocation des ressources



Scénarios d'utilisation : spectrum pooling

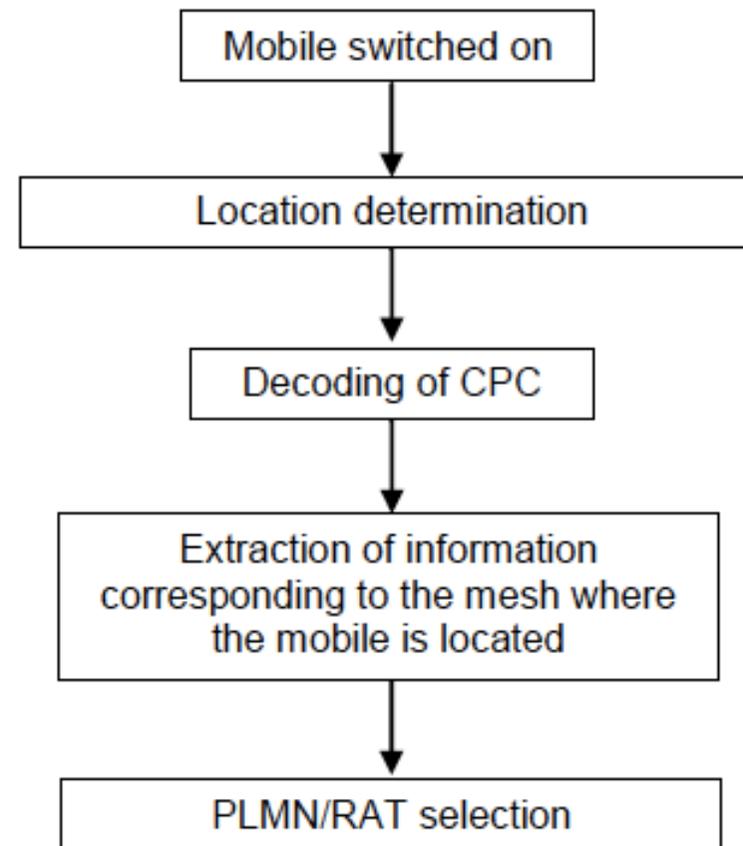
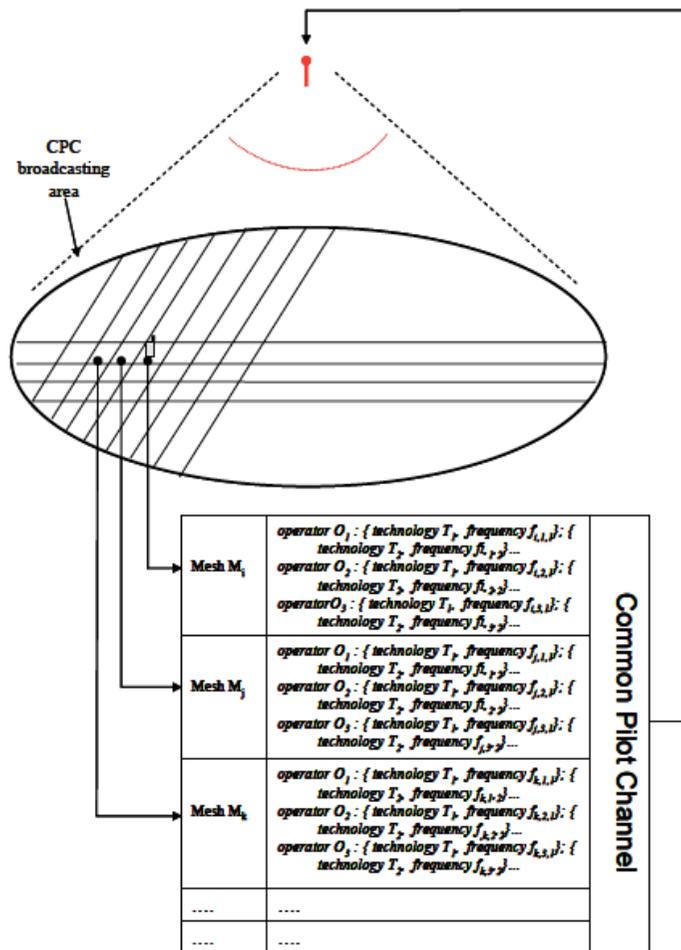
- **Optimal DSA policies** are obtained using Semi Markov Decision Process
 - System model includes
 $\text{Reward} = \text{Revenues}(\text{QoS}) - \text{spectrum price}(\text{BandWidth})$
 - Results compare **DSA** to **FSA** (Fixed Spectrum Access) for a different loads (λ)
 - With DSA, spectrum is better used
 - Operator reward is increased
 - “Heuristic DSA provides” a practical possible implementation



M. Coupechoux, H. Kamal, Ph. Godlewski, JM Kélif, “Optimal and Heuristic DSA Policies for Cellular Networks with Coordinated Access Band”, IEEE European Wireless 2009, best paper.

Scénarios d'utilisation : canal cognitif

- Un outil important pour aider le terminal à sélectionner le meilleur RAN : le canal pilote cognitif (CPC).



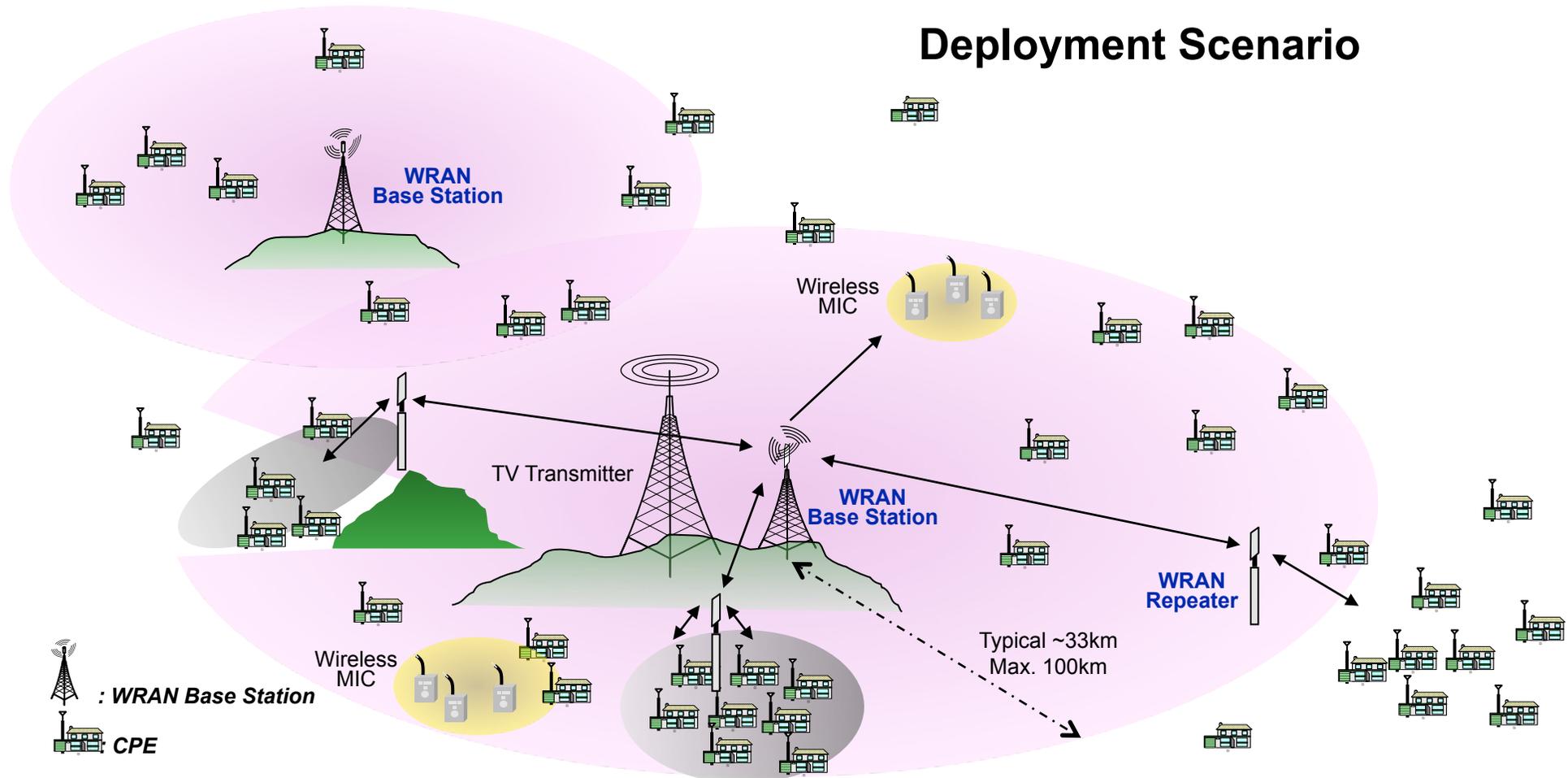
Projet E2R, FT, Motorola, Telecom Italia, plusieurs universités, etc

Scénarios d'utilisation : TVWS et 802.22

- [IEEE 802.22 et les bandes TV numérique](#)
- IEEE 802.22 est la norme d'un WRAN (Wireless Regional Area Network), point à multi-point, pour l'accès fixe large bande à Internet
- Elle doit se déployer dans des segments de spectre laissés libres par la TV numérique (typiquement 54-862 MHz) dans des zones peu denses (rayons de 17-30 Km, 255 utilisateurs, débit de 12 Mbps dans 6 MHz)
- Elle est présentée comme une norme de **radio cognitive**
- Beaucoup de similarités avec la norme 802.16 :
 - OFDMA (DL et UL)
 - Classes de services (UGS, rtPS, nrtPS, etc)
 - Gestion des connexions (CID)
 - Ranging, contention
 - Sous-en-têtes MAC
 - etc

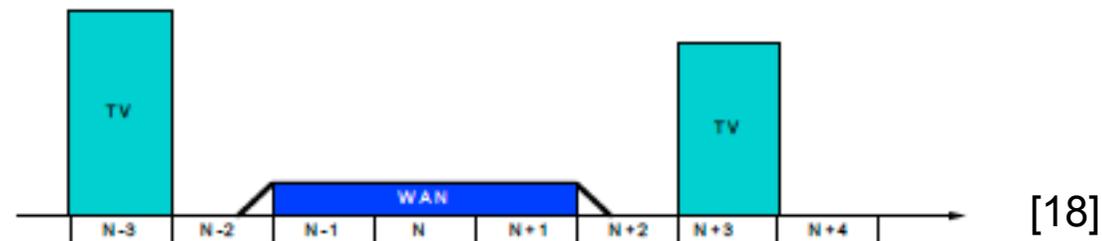
Scénarios d'utilisation : TVWS et 802.22

- Scénario de déploiement



Scénarios d'utilisation : TVWS et 802.22

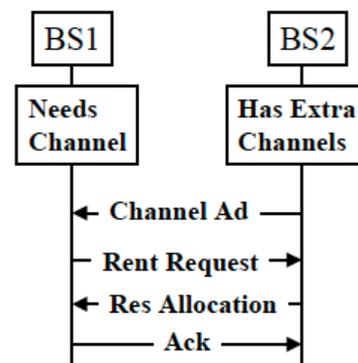
- Fonctionnalités « cognitives » de la norme :
- **Channel bonding** : le WRAN peut utiliser plusieurs canaux adjacents inoccupés



- **GPS + Base de données** : les BS ont la connaissance des canaux utilisés en interrogeant une base de données FCC et en utilisant leurs coordonnées GPS.
- **Dynamic Frequency Selection** : canaux de *back-up*, ajout/suppression de canaux, possibilité de laisser libre une trame pour effectuer des mesures, etc
- **Contrôle de puissance** : puissance limitée dans les canaux $N \pm 2$, où N est un canal occupé

Scénarios d'utilisation : TVWS et 802.22

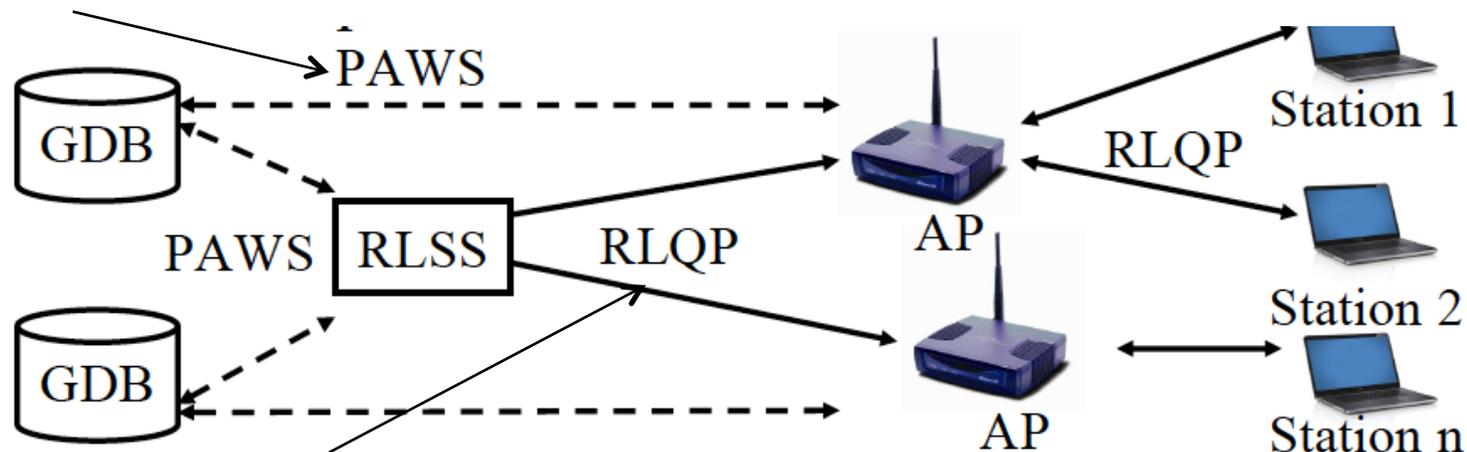
- **Détection de profile** : CPE et BS peuvent identifier le type d'utilisateur primaire ou secondaire (TV analogique, TV numérique, DVB-T, microphones)
- **Sensing distribué** : BS et CPE effectuent des mesures pour déterminer les canaux candidats. Ce mécanisme vient en complément de la méthode géolocalisation+base de données
- **Collision detection and avoidance** : de type *listen-before-talk*
- **Echanges de canaux entre deux WRAN** : protocole d'échange entre BS de deux WRAN permettant de libérer des canaux et d'en acquérir d'autres



Scénarios d'utilisation : TVWS et 802.11af (Super WiFi)

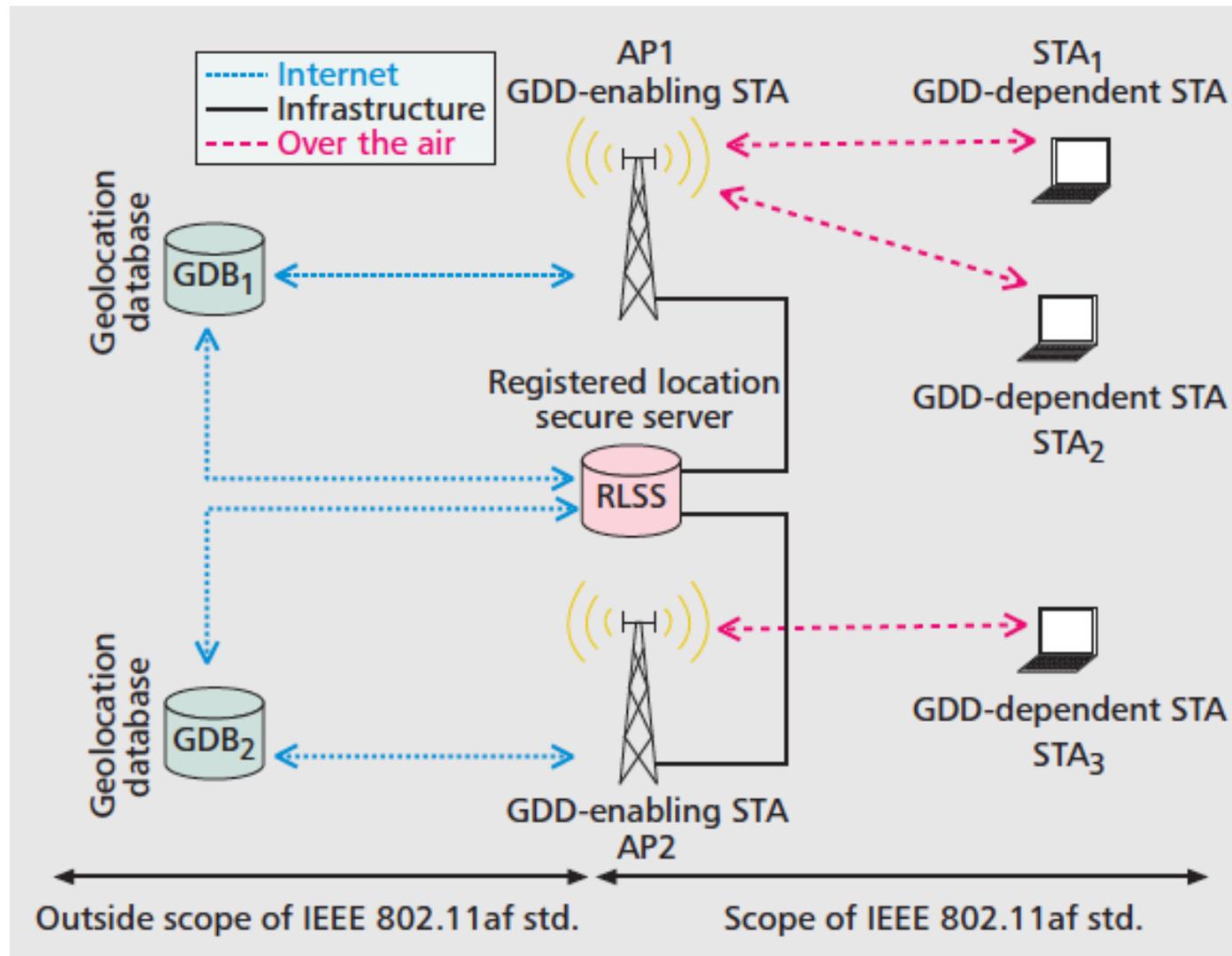
- ~ 26.7 Mbps sur un canal de 6 MHz (256 QAM, OFDM), jusqu'à 4 canaux peuvent être agrégés, jusqu'à 4 couches MIMO → jusqu'à 426.7 Mbps
- Composants de l'architecture :
 - Une base de données de géolocalisation (GDB) = elle enregistre pour chaque position les canaux libres et les paramètres d'opération à utiliser, elle est gérée par le régulateur.
 - Registered Location Secure Server (RLSS) = une base de données locale attribuant les ressources aux APs (sur un campus par exemple).
 - Geolocation Database Dependent (GDD) entities = les APs et les stations.

Protocol to Access White-Space = protocole IETF de découverte de bases de données et d'échange



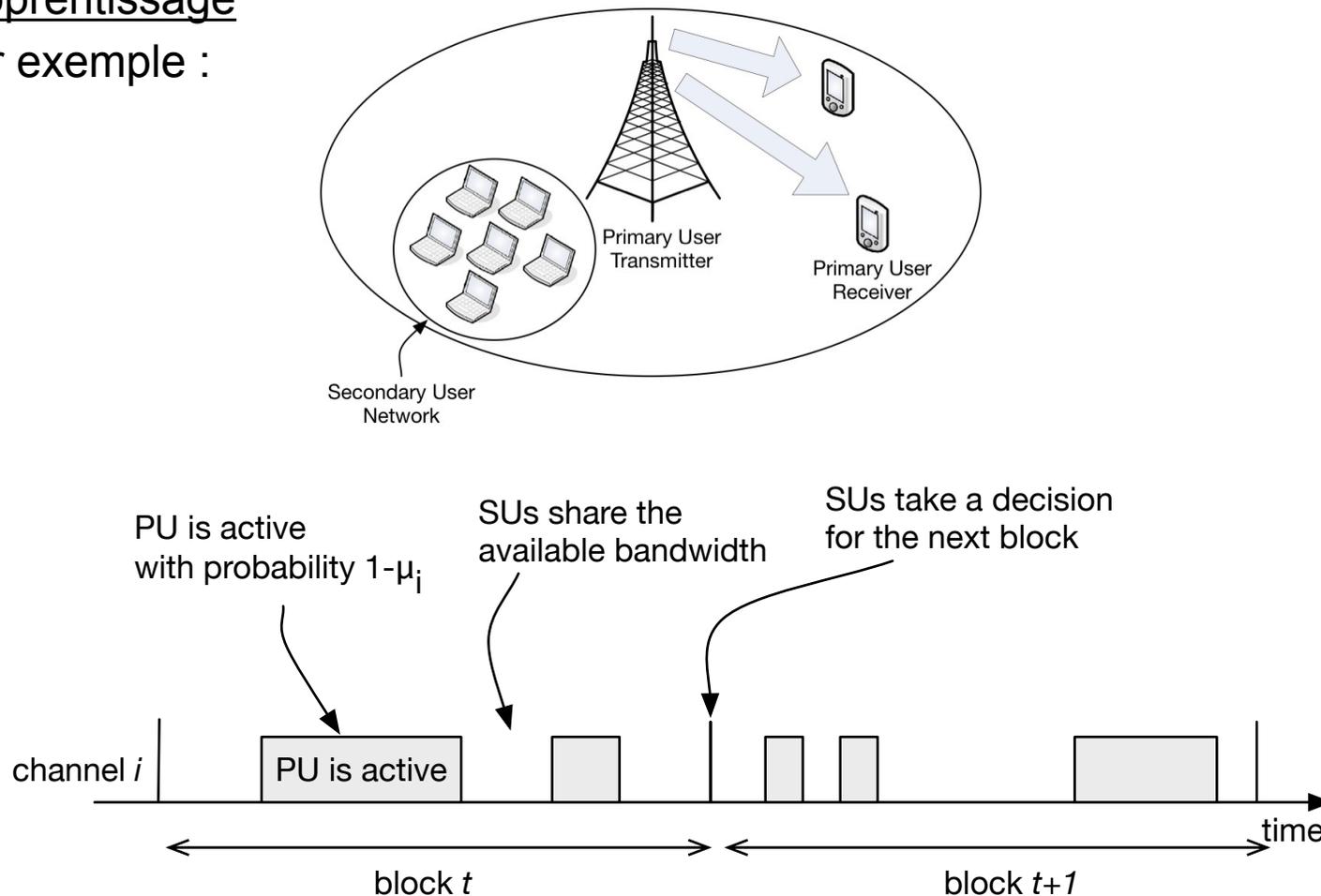
Registered Location Query Protocol = protocole d'échange de carte

Scénarios d'utilisation : TVWS et 802.11af (Super WiFi)



Scénarios d'utilisation : usage secondaire

- Une importante littérature scientifique s'est développée sur l'allocation distribuée des ressources radio en utilisant la théorie des jeux et de l'apprentissage
- Par exemple :



Scénarios d'utilisation : usage secondaire

- **Jeux considérés :**
 - Stratégies : C canaux fréquentiels laissés partiellement libres par le PU
 - Joueurs : N SUs
 - Utilité : débit obtenu sur un canal par le SU, fonction décroissante du nombre de SUs sur le canal considéré et de l'activité du PU
 - Equilibre recherché : Nash, i.e., personne n'a intérêt à changer de stratégie

- **Approches utilisées :**
 - Souvent: jeux de congestion, jeux à potentiel mais aussi enchères* (cf. projet ANR TEROPP avec TPT, Supelec, CEA, Lille1, UTT)
 - Petit nombre de SUs: théorie MAB (Multi-Armed Bandit)
 - Grand nombre de SUs: théorie des jeux évolutionnaires

* L. Chen, S. Iellamo, M. Coupechoux and Ph. Godlewski, An Auction Framework for Spectrum Allocation with Interference Constraint in Cognitive Radio Networks, IEEE INFOCOM, San Diego, USA, Mar. 2010.

Scénarios d'utilisation : usage secondaire

- Exemple d'algorithme distribué ne nécessitant aucun échange d'information entre joueurs
- On remarque: une partie Exploration vs. une partie Exploitation

Algorithm 1 RSAP: executed at each SU j

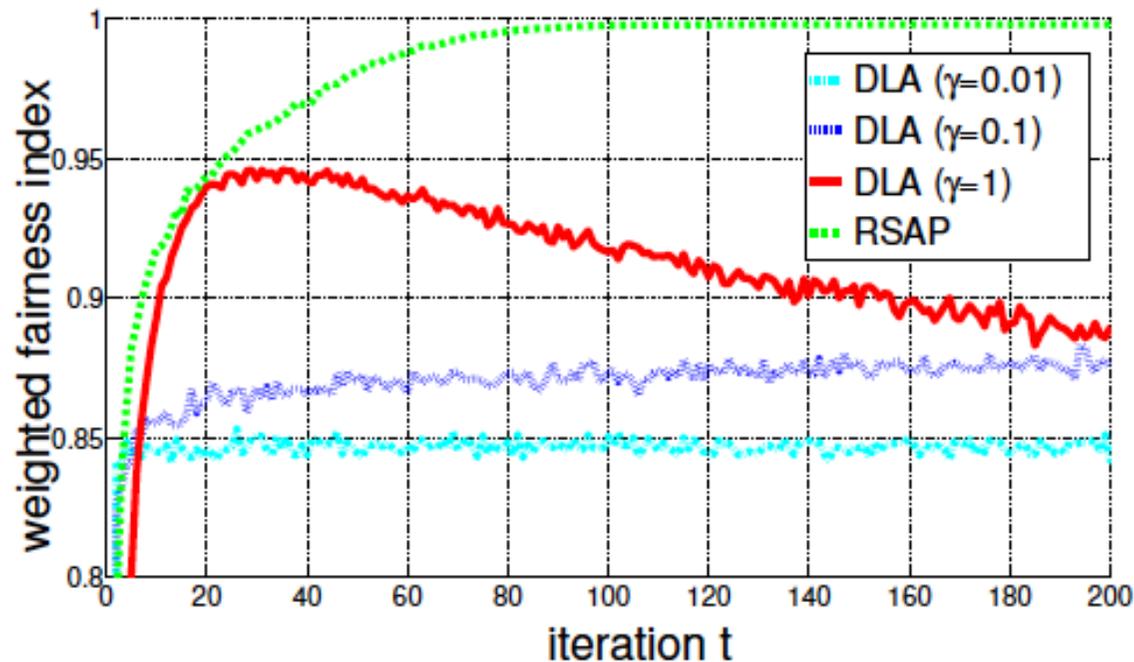
```

1: Initialization: Set  $\epsilon(t)$  and  $\rho_j$ .
2: At  $t = 0$ , randomly choose a channel to stay, store the
   payoff  $U_j(0)$  and set  $U_j(t-h)$  randomly  $\forall h \in \{1, \dots, H_j\}$ .
3: while at each iteration  $t \geq 1$  do
4:   With probability  $1 - \epsilon(t)$  do
5:     if  $U_j(t - \lambda_j) > U_j(t)$ 
6:       Migrate to channel  $s_j(t - \lambda_j)$  w. p.  $1 - \rho_j$ 
7:       Stay on the same channel w. p.  $\rho_j$ 
8:     else
9:       Stay on the same channel
10:    end if
11:   With probability  $\epsilon(t)$  switch to a random channel.
12: end while

```

Scénarios d'utilisation : usage secondaire

- Avec $C=3$ canaux, $N=50$, $\mu=[0.3 \ 0.5 \ 0.8]$, l'équilibre de Nash est obtenu après quelques itérations:



réclame

S. Iellamo, L. Chen and M. Coupechoux, Proportional and Double Imitation Rules for Spectrum Access in Cognitive Radio Networks, Elsevier Computer Networks, June 2013

S. Iellamo, L. Chen and M. Coupechoux, Retrospective Spectrum Access Protocol: A Stochastic Learning Algorithm for CRNs, IEEE ICC 2014.

Scénarios d'utilisation : 700 MHz block D (US)

- Le bloc D : un exemple de partage primaire/secondaire... qui a échoué
- Bloc D : 2x5 MHz issus du dividende numérique adjacents à des bandes dédiées à la sûreté publique

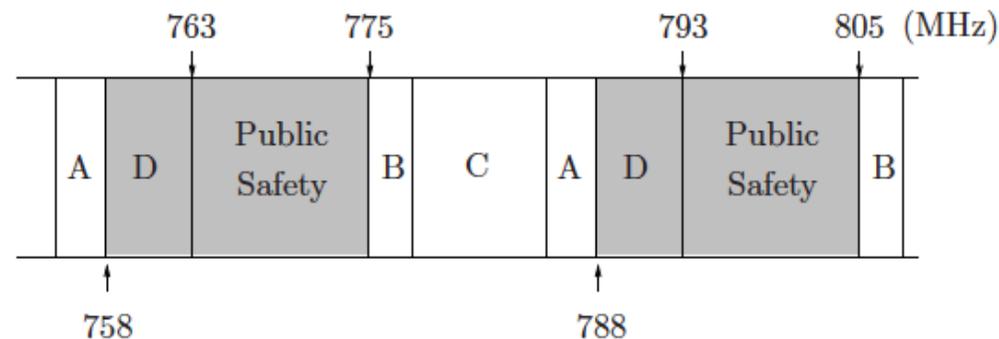


Figure : D-Block 700 MHz

- Partage du bloc D entre des opérateurs commerciaux et la sûreté publique
- Enchères en 2008 qui ont échouées
- Le bloc D a finalement été attribué en 2012 à la sûreté publique (police, pompiers, sauveteurs, etc.).

Scénarios d'utilisation : 700 MHz bloc D (US)

- Utilisateur primaire = sûreté publique (sans infrastructure mais avec 2x12 MHz de bande autour de 700 MHz adjacents au bloc D)
- Utilisateur secondaire = un opérateur commercial.

- Quand le PU n'utilise pas sa bande, le SU peut utiliser $5+12=17$ MHz.
- En cas d'urgence, le PU retrouve sa bande + le bloc D et utilise l'infrastructure de l'opérateur.
- Pas besoin de scrutation du canal, une balise suffit à empêcher les usages commerciaux en cas d'urgence.

Scénarios d'utilisation : Licensed Shared Access

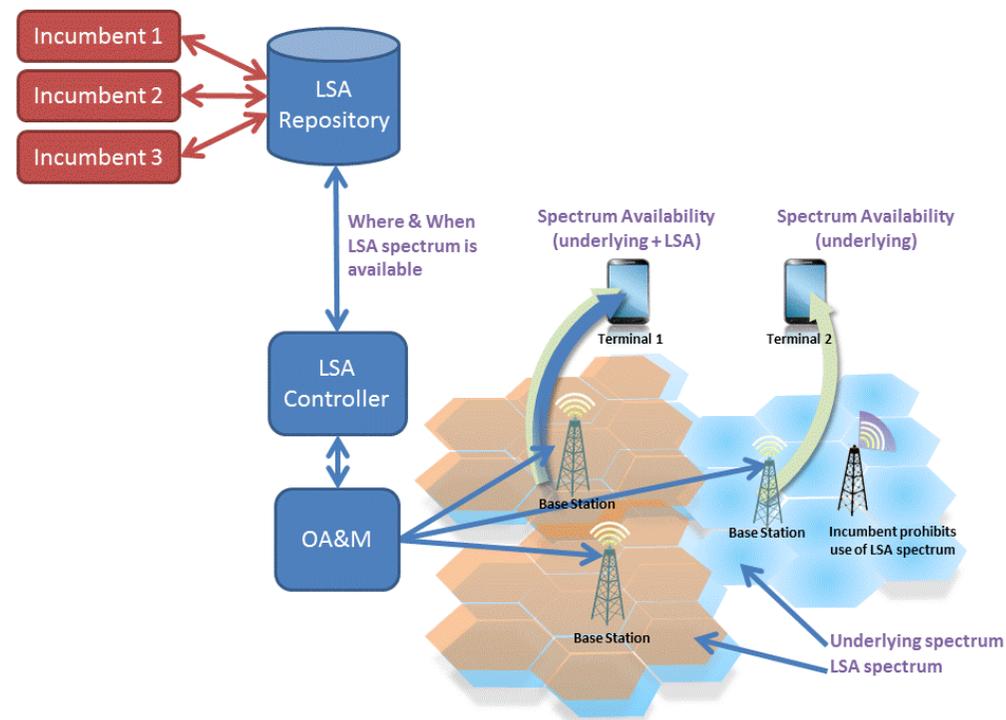
- Premier concept ASA (Authorized) par Nokia et Qualcomm
- LSA défini par le RSPG de l'EC en 2013 :

concept in November 2013 in [6] as “A regulatory approach aiming to facilitate the introduction of radiocommunication systems operated by a limited number of licensees under an individual licensing regime in a frequency band already assigned or expected to be assigned to one or more incumbent users. Under the Licensed Shared Access (LSA) approach, the additional users are authorised to use the spectrum (or part of the spectrum) in accordance with sharing rules included in their rights of use of spectrum, thereby allowing all the authorized users, including incumbents, to provide a certain Quality of Service (QoS).”

- Un utilisateur primaire peut autoriser l'accès à un utilisateur secondaire à des conditions telles que les deux puissent garantir une certaine QoS.
- En Europe, la bande 2.3-2.4 GHz est candidate pour LSA (des tests en Finlande en 2014)

Scénarios d'utilisation : Licensed Shared Access

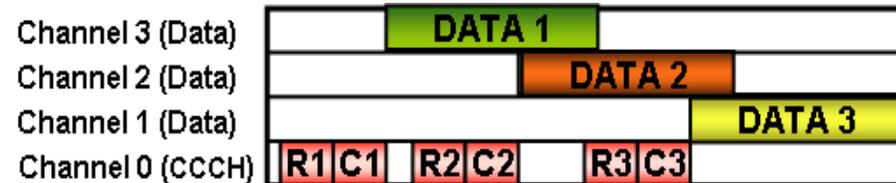
- Cas d'usage « Extension de bande pour un opérateur » (ETSI) : le réseau interroge une base de données qui indiquent quand et où certaines fréquences sont disponibles; au moment autorisé, certaines BSs effectuent une agrégation de porteuses entre la bande licenciée et les fréquences LSA. Scénario particulièrement adapté aux HetNets.
- En France, la bande 2.3 GHz est utilisée par la Défense et par l'ARCEP.



Source: ETSI

Scénarios d'utilisation

- **Autres scénarios couramment étudiés**
- Situations d'urgence et de catastrophe
 - Les besoins des services d'urgence sont décuplés
 - Certaines infrastructures sont inopérantes
- Partage du spectre dans une zone hot spot
 - Comment mieux partager le spectre dans la bande ISM (étiquette, coopération distribuée, MAC multi-canaux)
 - Etudes de coexistences WiFi/Bluetooth
 - Gérer de manière conjointe points d'accès WiFi et femto-cellules
- *Private common*
 - Spectre ISM géré de manière centralisée sur un campus
- Communications courtes portées
 - UWB, microphones
- Détection radar 802.11h (DFS/TPC)



Conclusion

- Thème riche en concepts
 - « *Cross layer* » ... « *cross domain* »
 - Traitement de signal, statistique
 - Accès multiple, protocoles
 - Ingénierie radio
 - Intergiciel (*Middleware*)
 - Apprentissage automatique (*machine learning*)
 - Base de donnée, ontologie, politique, étiquette
 - Modèles économiques
- Terrain idéal pour nombre d'approches analytiques
 - Théorie de jeux
 - Contrôle optimal
 - Apprentissage
 - etc
- L'internet mobile sera probablement un élément moteur des premières évolutions

Références



- [1] M. Buddhikot, « Understanding Dynamic Spectrum Allocation, DySPAN », 2007
- [2] F. Berggren, O. Queseth, and J. Zander, “Dynamic Spectrum Access”, 2004
- [3] G. Pogorel, “Nine Regimes of Radio Spectrum Management: A 4-step Decision Guide”, 2007
- [4] Q. Zhao, B.M. Sadler, “A Survey of Dynamic Spectrum Access”, IEEE Signal Proc. Mag., 2007
- [5] www.sportviews.org
- [6] I. Akyildiz et al., “Next Generation, Dynamic Spectrum Access, Cognitive Radio Wireless Networks : A Survey”, Computer Networks, 2006.
- [7] Projet E2R : e2r.motlabs.com
- [8] IEEE P1900 : www.ieeeep1900.org
- [9] J. Hofmeyer, “P1900 Committee”, 2006
- [10] IST DRIVE Project, Deliverable D09, 1999.
- [11] IST Over DRIVE Project, Deliverable D13, 2001.
- [12] I. Malanchini et al., Spectrum Selection Games in Cognitive Radio Networks, Globecom 2009.
- [13] I.F. Akyildiz, W-Y.Lee, M.C. Vuran, S.Mohanty, “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey”, Computer Networks Journal (Elsevier), vol. 50, pp. 2127-2159, September 2006.
- [14] SYSTEMATIC URC Project, ”Field Measurements Processing”, D2.2.3, March 2009.
- [15] SYSTEMATIC URC Project, ”Dynamic Spectrum Allocation Algorithms v1 and v2”, D2.1.3, 2009/2010.
- [16] SYSTEMATIC URC Project, ”Performance of the DSA Algorithms”, D3.3.2, Jan. 2010.
- [17] Slide Presentation, IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks (WRANs), Raj Jain, 2008.
- [18] C. Cordeiro et al. IEEE 802.22 : An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios, Journal of Communications, Apr. 2006
- [19] P. Cordier et al., E2R Cognitive Pilot Channel concept
- [20] ETSI TR 103 113, Mobile broadband services in the 2 300 MHz - 2 400 MHz frequency band under Licensed Shared Access regime, Juillet 2013.
- [21] M. MATINMIKKO et al., SPECTRUM SHARING USING LICENSED SHARED ACCESS: THE CONCEPT AND ITS WORKFLOW FOR LTE-ADVANCED NETWORKS, IEEE Wireless Communications, 2014
- [22] AB Flores, RE Guerra, EW Knightly, IEEE 802.11 af: a standard for TV white space spectrum sharing, IEEE Comm. Mag, Oct 2013
- [23] R Jain, Wireless Networking in White Space, Presentation 2014.