



Une école de l'IMT

La 5G: défis, fondamentaux et innovations

Marceau Coupechoux, Alain Sibille
Télécom ParisTech





Plan

- **Les défis**
- **Les fondamentaux**
- **Les innovations**
- **Thèmes transversaux**
- **Conclusion**



Les défis

La 5G, c'est quoi ? Quelques exemples...

Multimedia

- Vidéos très haute qualité
- Expériences immersives et interactives
- Jeux en réseaux

- Direct/streaming/à la demande
- Productions collaboratives, réseaux sociaux
- Contenus mobiles et adaptatifs



Santé

- Télé-chirurgie
- Télé-surveillance



[Da Vinci]

- Systèmes personnels de santé
- Technologies d'assistance

La 5G, c'est quoi ? Quelques exemples...

Industrie

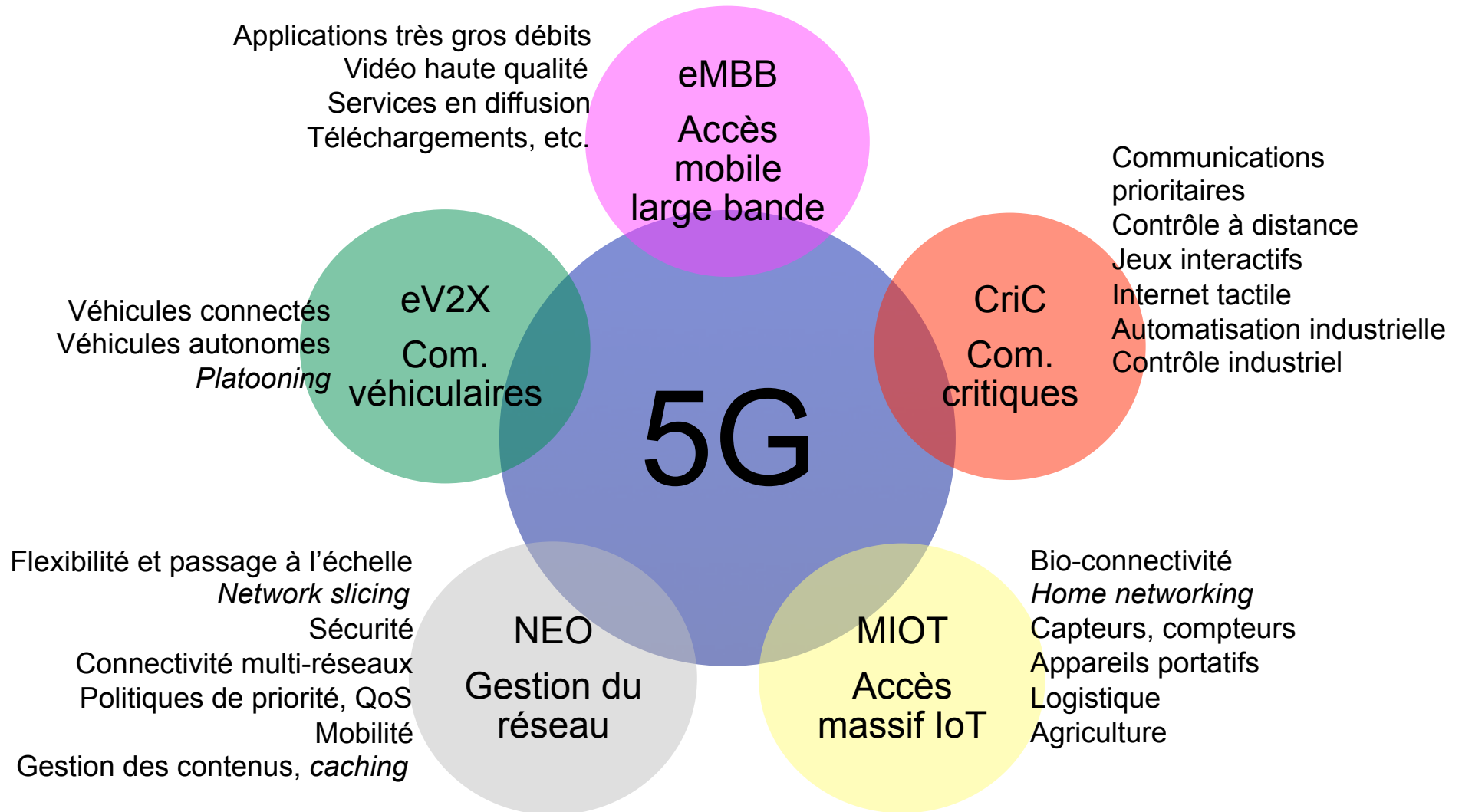
- Robots collaboratifs
 - Identification, traçage des biens
 - Contrôles et diagnostics à distance
 - Communications inter-entreprises
 - Biens connectés tout au long de leur cycle de vie
- [LAAS/CNRS]

Énergie

- Gestion et contrôle des grilles
- Prévisions de consommations
- Routage des flux
- Compteurs intelligents
- Gestion des énergies renouvelables

Et bien d'autres applications... que l'on ne connaît peut-être pas encore.

La classification du 3GPP



Les défis technologiques

	Débit	Latence	Fiabilité	Densité	Mobilité	Localisation	Objets contraints
eMBB	+++ 10Gbps			++ 10 Tbps/km ² 25k util/km ²	+++ 500km/h		
CriC		+++ x 1 ms	+++ PER~10 ⁻⁴ Dispo>99,999%	++ 1k/km ²		+++ 10 cm	
MIOT				+++ 1M/km ²		+++ 0.5 m	+++
eV2X	+ 10Mbps	+++ x 1 ms		++	+++ 500km/h	+++ 0.5 m	



Les fondamentaux

Fondamentaux des communications sans fil

Shannon, capacité et ressource spectrale

■ Back to basics : la formule de Shannon

Largeur de bande (Hz) Rapport signal/bruit (SNR)

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_r}{P_{\text{bruit}}} \right) \quad \text{capacité en bits/s}$$

$$P_r = B \cdot DSP_{\text{reçue}} \quad P_{\text{bruit}} = B \cdot k_B T \cdot N_f$$

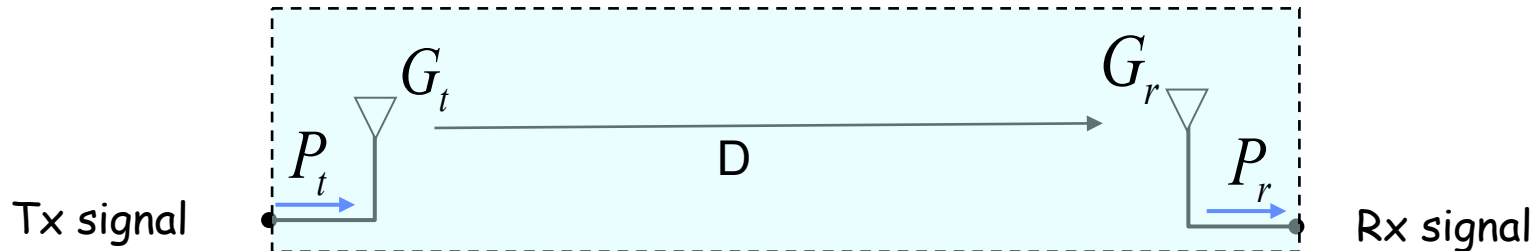
→

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{DSP_{\text{reçue}}}{k_B T \cdot N_f} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Efficacité spectrale} \\ \text{Maximale} \end{array}$$

- Efficacité spectrale limitée par le SNR (logarithmique)
- Avec N antennes de transmission et N de réception (MIMO NxN), la capacité est multipliée par N

Fondamentaux des communications sans fil

Grandeurs et servitudes de la propagation des ondes



■ Equation des télécommunications

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r \cdot G_t \cdot \left(\frac{c}{4\pi DF} \right)^2$$

Exemple : $P_t=100$ mW, antennes gain unité, $F=2.6$ GHz, $D=1$ km

→ $P_r=8.4$ pW= $8.4 \cdot 10^{-9}$ mW

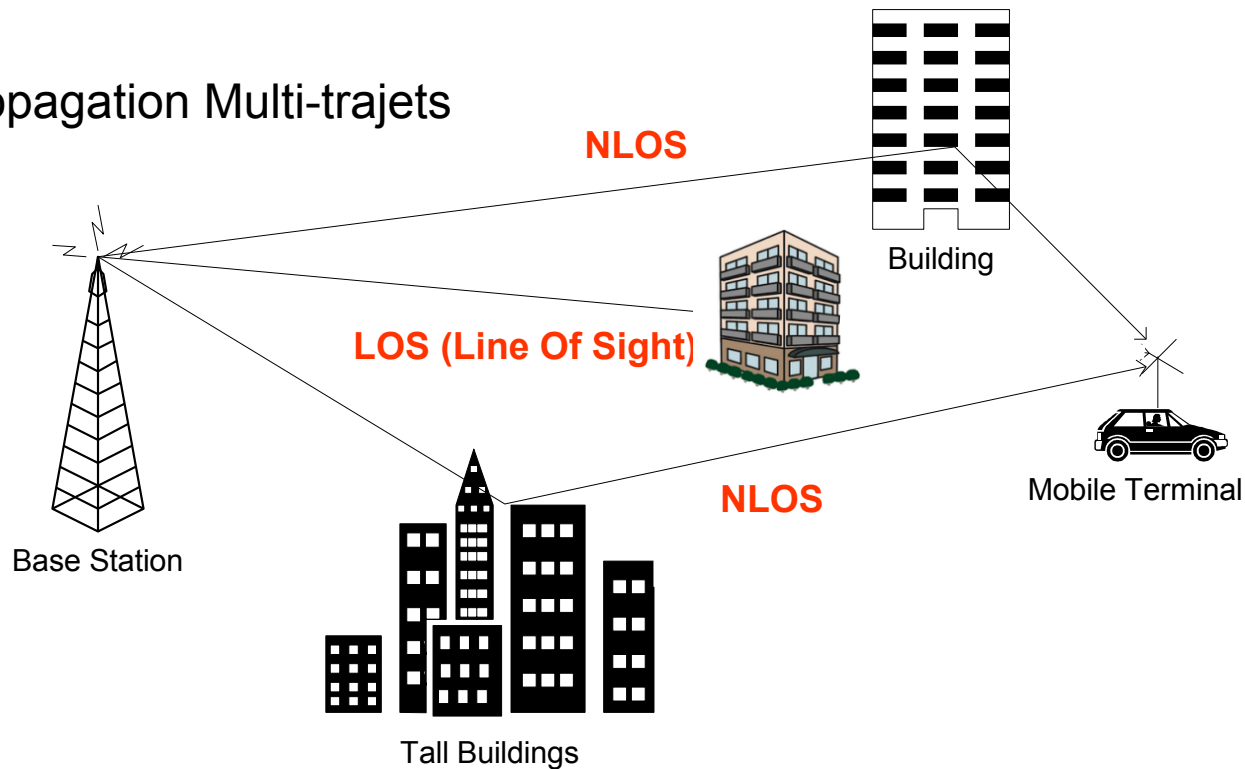
Avec $P_{\text{bruit}}=0.2$ pW dans $B=100$ MHz pour $N_f=5$

Fondamentaux des communications sans fil

Grandeurs et servitudes de la propagation des ondes



Propagation Multi-trajets

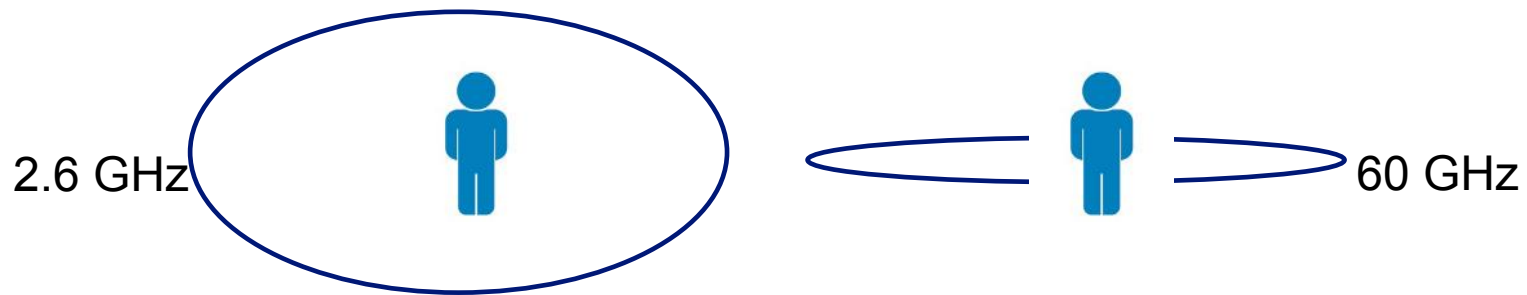
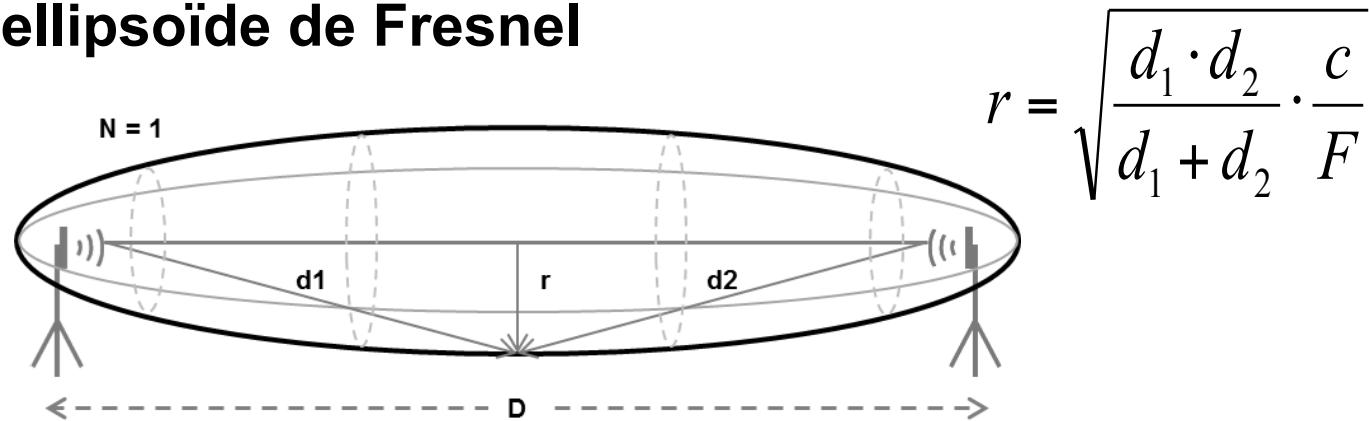


Fondamentaux des communications sans fil

Grandeurs et servitudes de la propagation des ondes



■ L'ellipsoïde de Fresnel

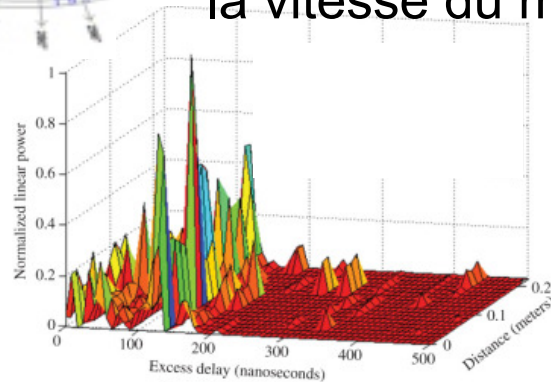
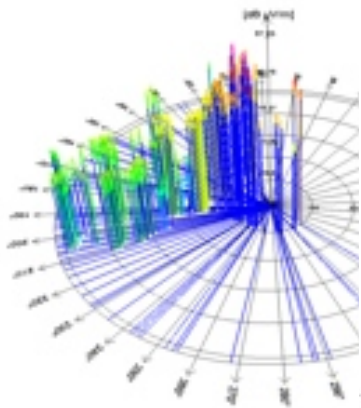


Fondamentaux des communications sans fil

Grandeurs et servitudes de la propagation des ondes

■ Les problématiques majeures de la propagation radio

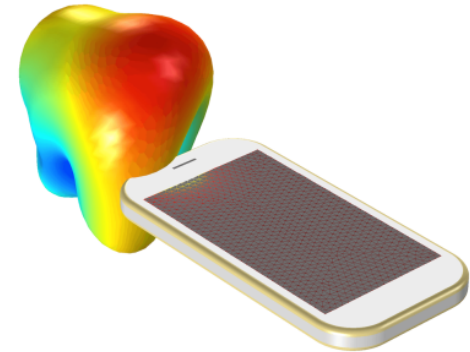
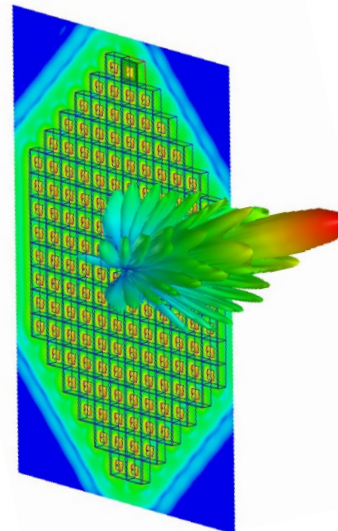
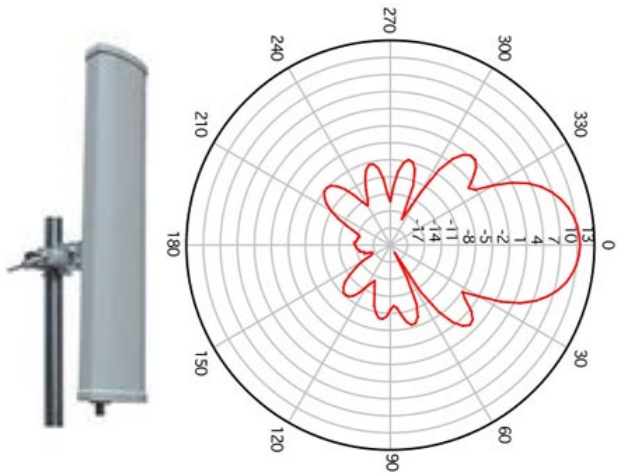
- L'**atténuation** qui varie comme D^2 jusque D^6 ou pire selon la nature des obstructions
- L'augmentation de l'**atténuation** comme F^2
- La **dispersion des retards des multi-trajets** qui aboutit à un mélange de signaux décalés dans le récepteur
- L'**effet Doppler**, qui décale les fréquences reçues avec la vitesse du mobile



Fondamentaux des communications sans fil

Tout passe par les antennes

- Les deux antennes sont un point de passage obligé, favorable ou défavorable
 - Le gain peut être >1 ou <1
 - Le gain traduit la directivité de l'antenne : une antenne est **un filtre angulaire pour les ondes émises ou reçues**



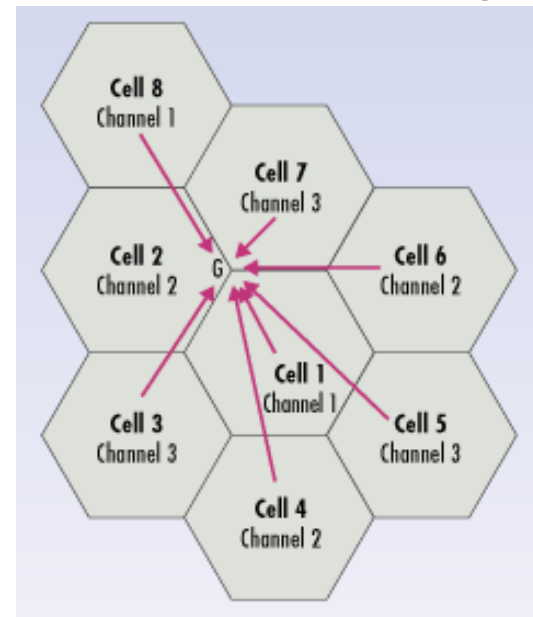
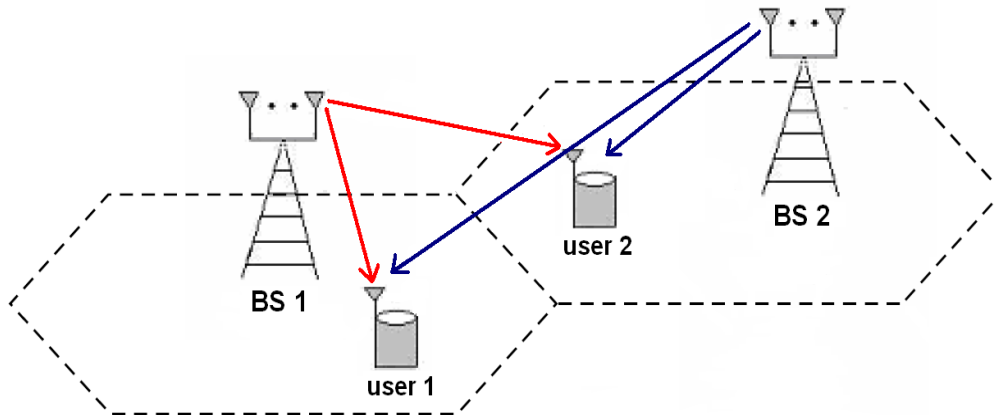
Fondamentaux des communications sans fil

Interférences

■ Divers types d'interférences

- Downlink (vers mobile) vs. uplink (vers station de base)
- Co-canal (dans la même bande) ou dans un canal adjacent

➔ **SINR (rapport signal à interférences+bruit)**

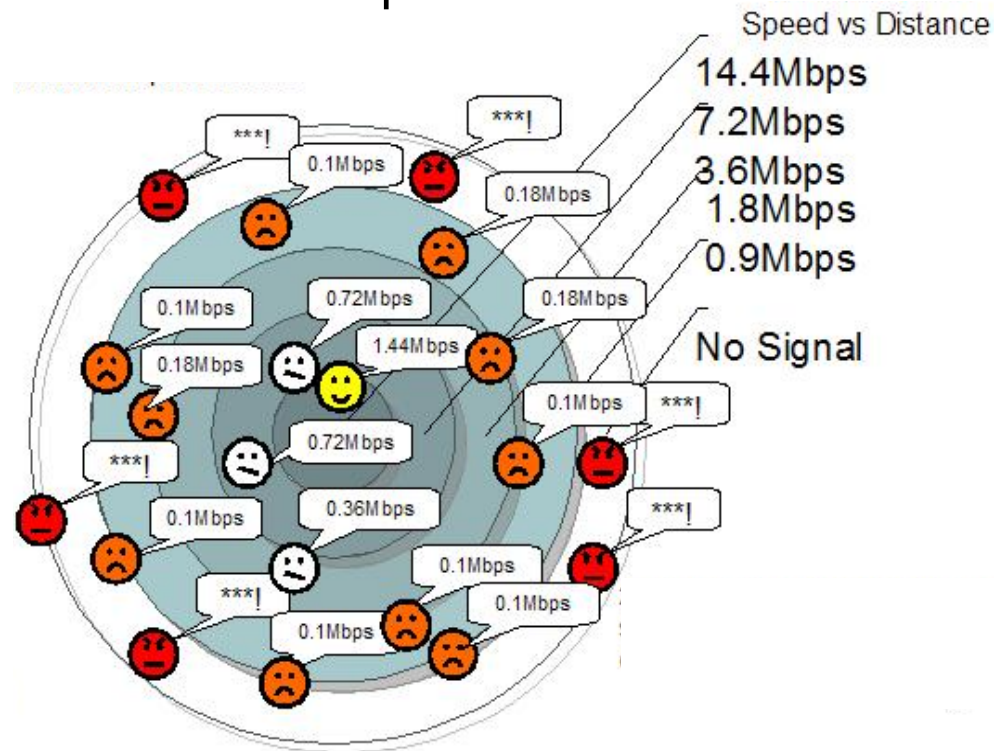


Fondamentaux des communications sans fil

Interférences

■ Le problème des bords de cellules

- Atténuation importante
- Interférences importantes





Les innovations

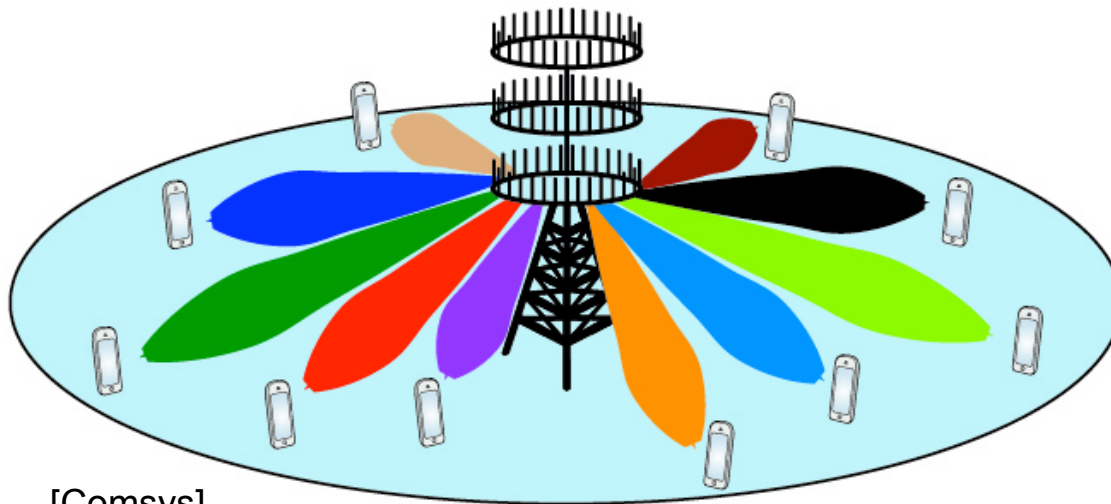
Augmenter l'efficacité spectrale

■ Massive MIMO

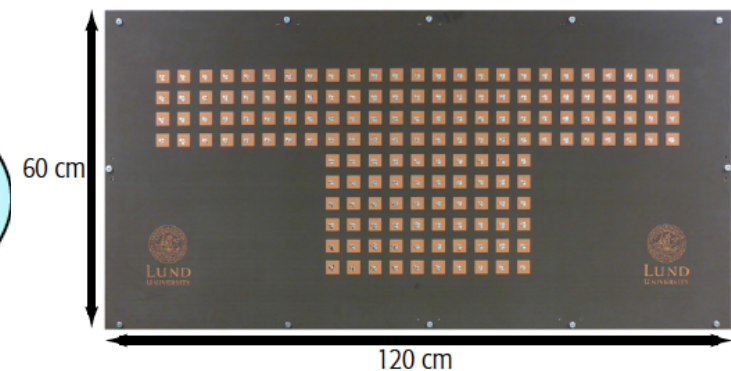
- Principe: Utiliser >100 antennes pour servir >10 utilisateurs simultanément à la même fréquence

- + Efficacité spectrale
- + Efficacité énergétique
- + *Low cost hardware*

- Taille des panneaux d'antennes
- Complexité du traitement du signal
- Signalisation (estimation du canal)



[Comsys]



[Lund University: 160 antennes 3.5GHz]

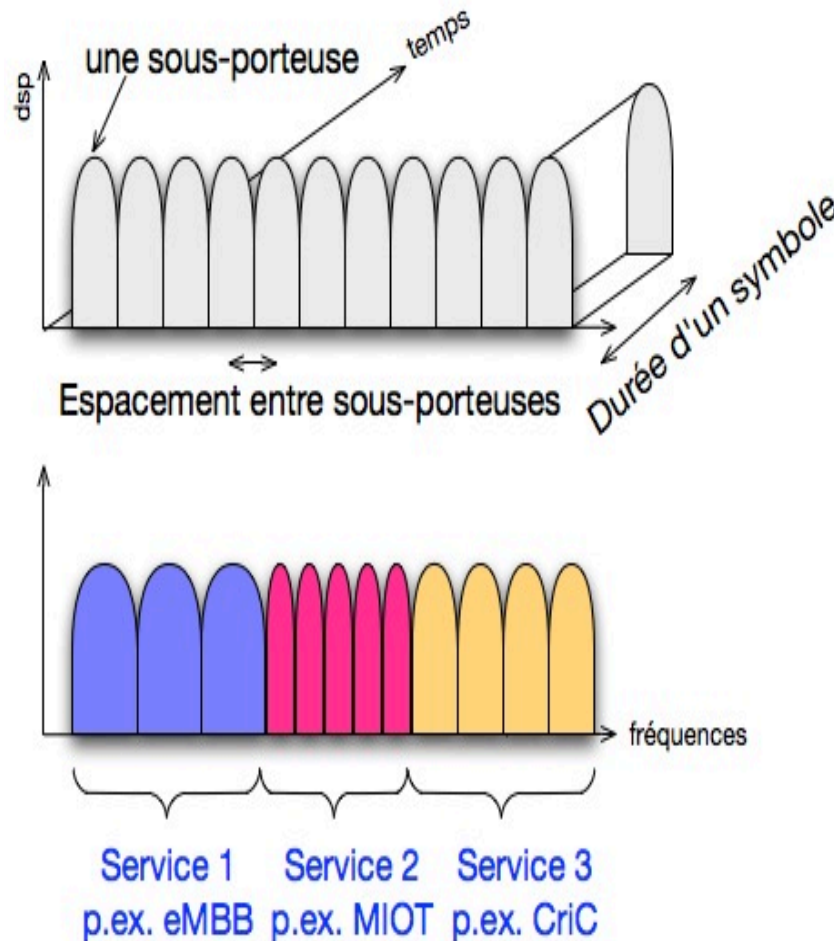
Augmenter l'efficacité spectrale

■ Nouvelles formes d'onde

1) **Flexibilité**: adapter la façon dont le signal est transmis en fonction des services.

2) **Efficacité**: n'utiliser que le spectre nécessaire en réduisant les ressources de garde.

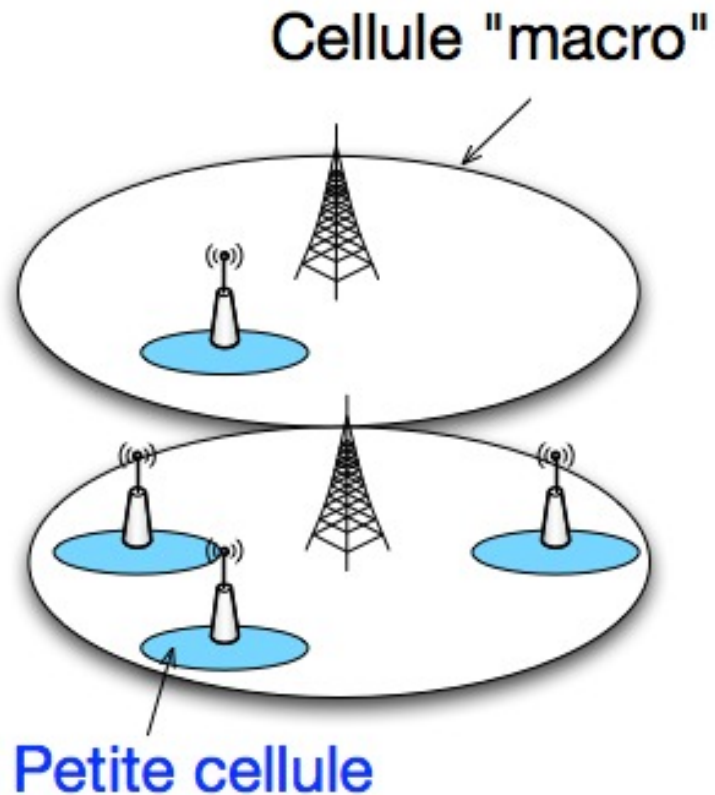
3) **Frugalité**: faible complexité, faible consommation d'énergie.



4G: Une seule configuration

5G: Une numérologie flexible

Densifier le réseau



■ HetNets: les réseaux hétérogènes

- De petites cellules complètent les grandes cellules

- + Accroît la capacité du réseau
- + Bonnes conditions de propagation notamment en intérieur
- + Offre de gros débits

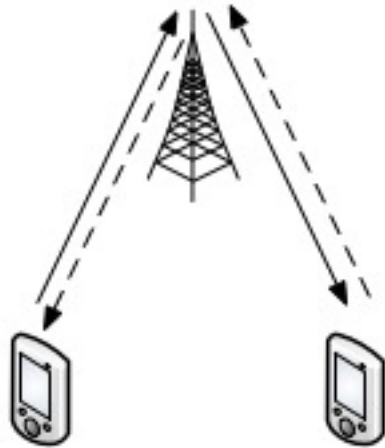
- Interférences
- Déséquilibres de charge



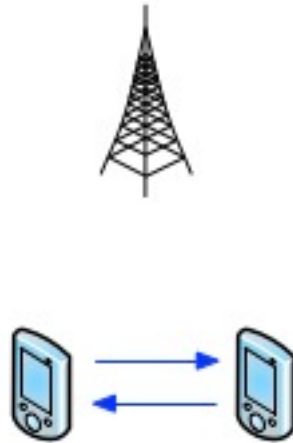
[Technology
Partnership]

Densifier le réseau

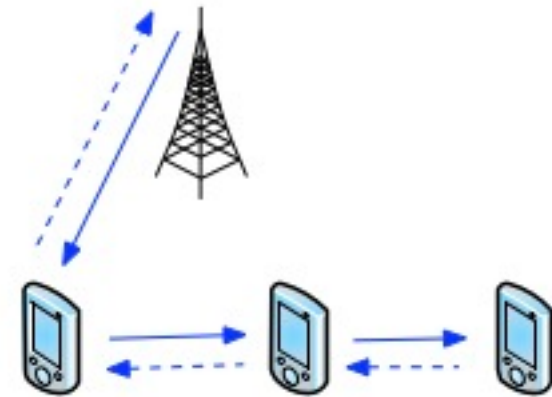
■ D2D: les communications de terminal à terminal



Communication via
la station de base



Communication
D2D



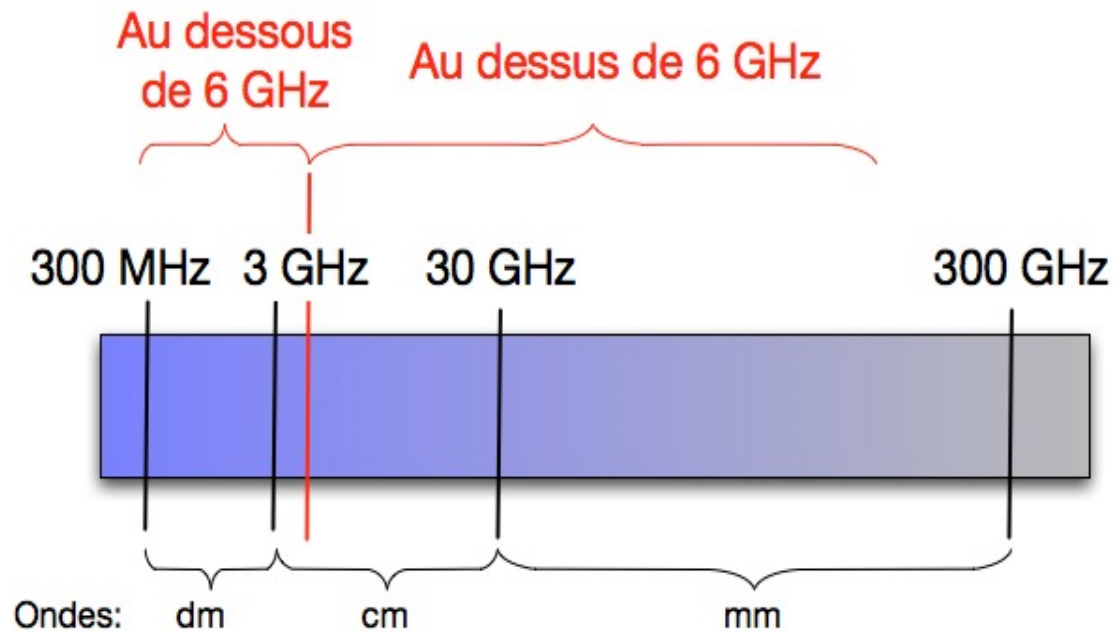
Communication
D2D multibonds

- + Accroît la capacité du réseau
- + Bonnes conditions radio
- + Offre de gros débits

- Interférences
- Gestion des ressources plus difficile
- Signalisation, synchronisation

Nouvelle frontière spectrale

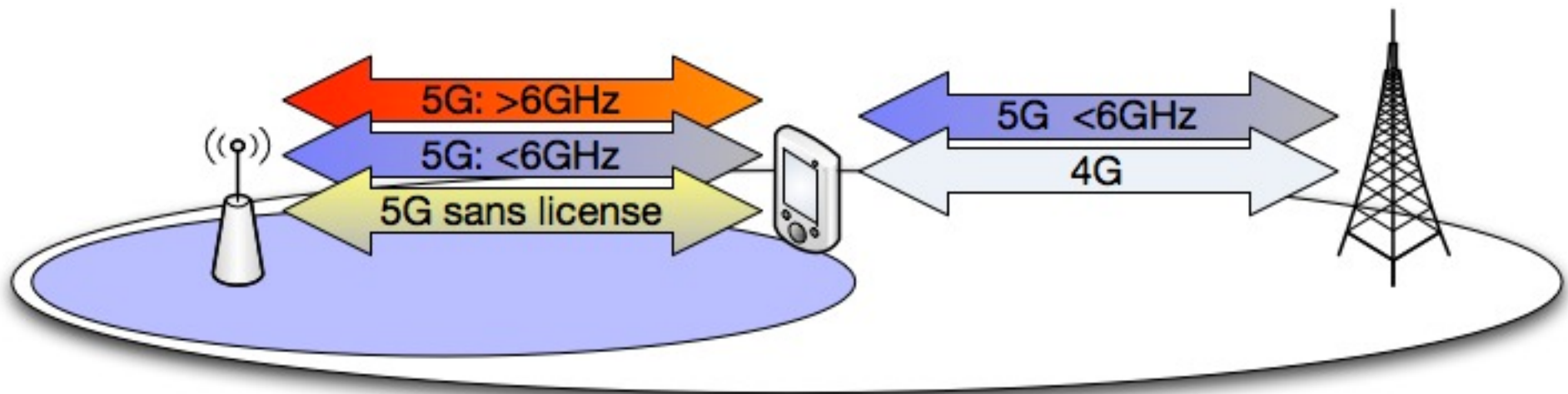
■ **mmWave:** Utiliser des bandes au dessus de 6 GHz



- + ~20 GHz de bande disponible
- + Petites antennes (cf. mMIMO)
- + Peu d'interférence entre cellules
- + Backhaul et accès
- Conditions de propagation difficiles (forte atténuation, blocages, absorptions)
- Traitements bande de base et RF
- Modélisation et performances dans un contexte cellulaire ?

Agréger les bandes et les technologies

- **Agrégation de porteuses:** Concaténer plusieurs fréquences
- **Bandes non licenciés:** Utiliser les bandes type WiFi
- **Multi-connectivité:** Communiquer avec plusieurs technologies



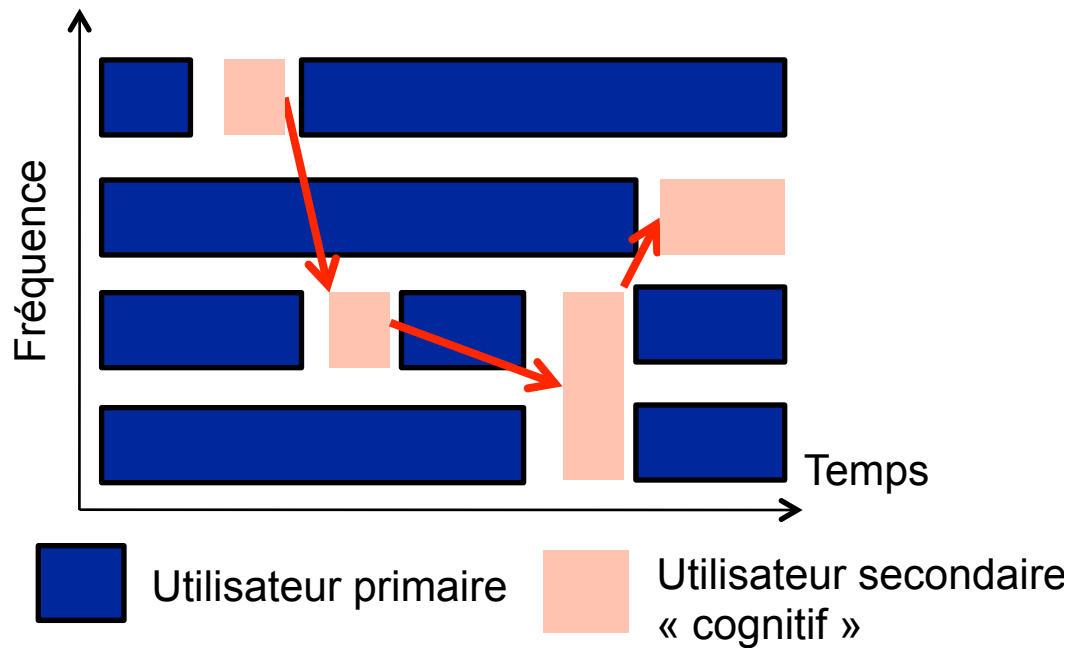
+ Gros débits même quand les conditions radio ne sont pas bonnes

- Aspects protocolaires plus complexes
- Chaînes radio plus complexes

Nouvelles gestions du spectre

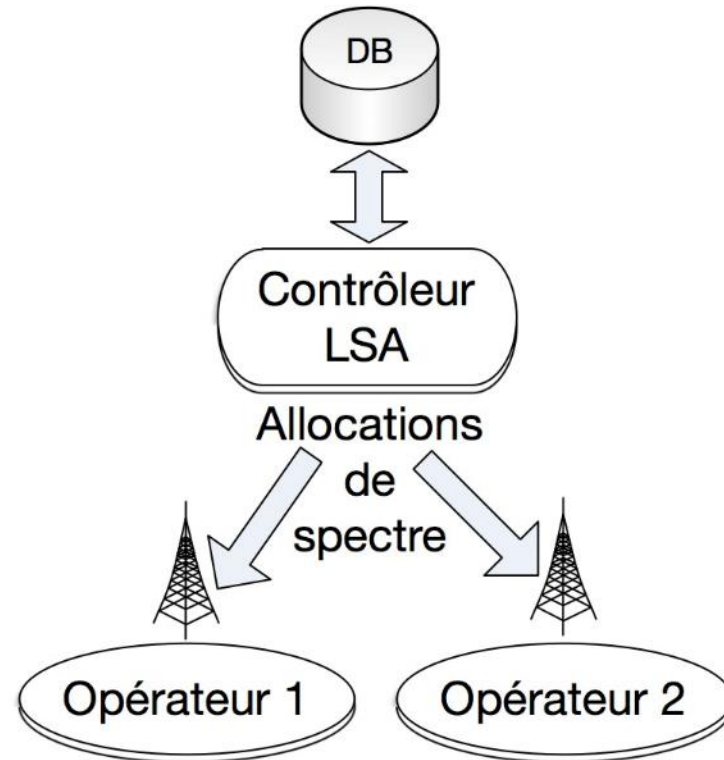
■ Radio cognitive

Profiter des « trous » de spectre pour communiquer de manière opportuniste



■ Accès partagé au spectre (LSA)

Usage du spectre
fréquence, temps, espace



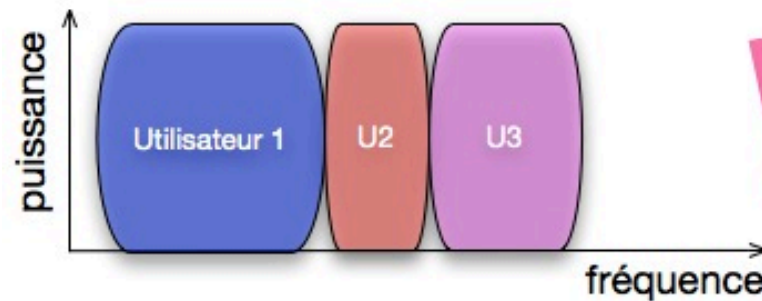
Accès massif

- **NOMA**: plusieurs utilisateurs partagent la même ressource

+ Plus de connexions simultanées

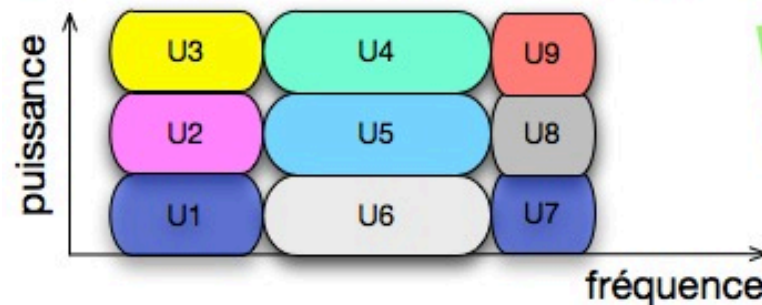
- Collisions
- Problèmes de contrôle de puissance
- Récepteurs plus complexes

4G: Orthogonal Multiple Access (OMA)



Overload
100%

5G: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)



Overload
300%



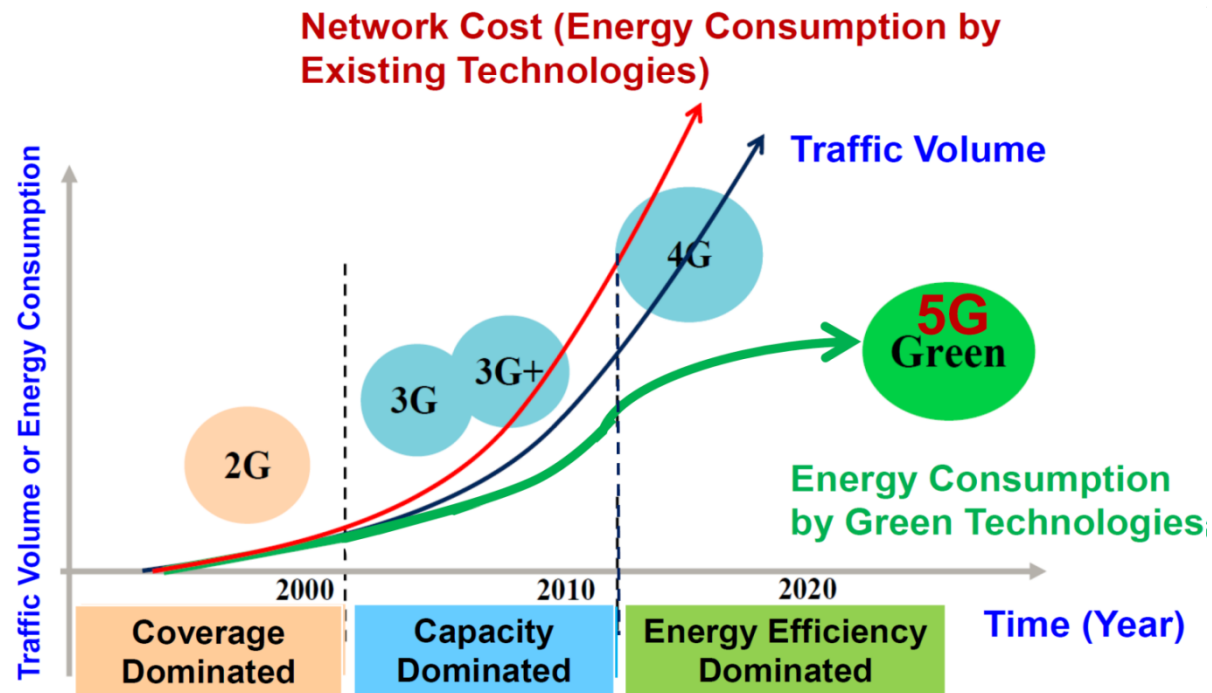
**Thèmes transversaux:
énergie, sobriété, sécurité**

Thèmes transversaux

L'énergie

■ L'énergie est notre avenir !

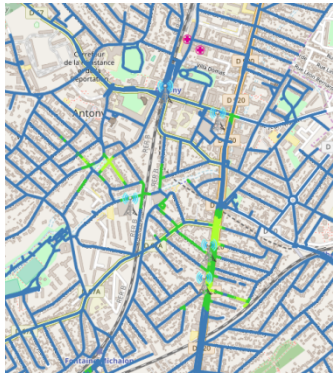
Sciences et Avenir : « Les données mobiles seraient bien plus énergivores que les datacenters » (17/08/2017)



Thèmes transversaux

La sobriété

■ Limiter l'ampleur des champs EM



loi relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques (2015)

- Projet européen LEXNET « Low Exposure NETworks »



- Chaire Modélisation, Caractérisation et Maîtrise des expositions aux ondes électromagnétiques (C2M)



Thèmes transversaux

La sécurité



■ La sécurité des réseaux sans fil est multiforme

- Attaques passives (écoute) ou actives (ex. intrusions)
- protection de la signalisation, authentification
- protection du contenu des messages (cryptage)

■ Problématiques

- Disponibilité des signaux (air)
- Coût du cryptage (énergie, calcul)

■ Nouvelles solutions impliquant la couche physique

- Génération de clés à partir de l'aléa canal
- Codage secret



Connected Cars & Cyber Security



Conclusion



Conclusion

■ Bien d'autres innovations permettent:

- Une grande fiabilité et de faibles latences (p.ex. tailles variables de slots)
- Une gestion du réseau flexible, décentralisée sécurisée (virtualisation, cloud-RAN, convergence fixe-mobile,...)
- Des communications V2X

■ Transition en douceur de la 4G à la 5G

- De nombreuses innovations sont déjà présentes en LTE-Advanced, LTE-Advanced Pro et NB-IoT.

■ Pensons déjà au delà !

- L'UPSay lance « **Beyond 5G Initiative** » avec Nokia, Orange, Thalès et Vedecom



Conclusion

■ Mais attention aux mirages !

- Limitations physiques et technologiques (millimétrique)
 - Atténuation variant comme F^2
 - Directionnalité des ondes millimétriques et ombrages
 - Technologies coûteuses, mauvais rendement
- Petites cellules → déploiement massif pour assurer la couverture
- Haute disponibilité très exigeante
- Utilisation massive/applications critiques de la 5G → consolider la sécurité (à bon escient)



Merci pour votre attention !