



## L'HOMME CONNECTÉ

### Vers l'intégration de point d'accès et relais millimétriques dans les réseaux hétérogènes 5G à l'horizon 2020: enjeux, challenges et technologies clés

### Towards the integration of millimeter wave access points and backhubs in 2020 5G heterogeneous networks: stakes, challenges, and key enabling technologies

Cedric Dehos\*

\*CEA Leti, cedric.dehos@cea.fr

Mots-clefs : réseau hétérogène, 5G, point d'accès millimétrique, backhaul  
 Keywords: heterogeneous network, 5G, mmw access point, backhaul

#### Résumé

La croissance exponentielle du trafic mobile à laquelle nous assistons aujourd'hui requiert une approche en rupture dans la définition des futurs réseaux de 5<sup>ème</sup> génération. Une grande partie de ce trafic pourrait être pris en charge par des points accès régulièrement espacés en petites cellules, reliées entre elles jusqu'au cœur de réseau par des liens sans fil à hauts débits. Dans cet article nous proposons une infrastructure de réseau hétérogène mettant en œuvre des points d'accès et relais fonctionnant dans les bandes millimétriques 57-66GHz et 71-86GHz. Les récentes avancées des technologies CMOS et BiCMOS, ainsi que du packaging industriel servent de point de départ à une étude de faisabilité. Nous abordons ici les challenges techniques d'un tel déploiement et tentons de proposer quelques pistes de solutions. The exponential increase of mobile data traffic requires disrupting approaches for the definition of future 5G network. A great part of this traffic could be offloaded to small cell access points, wireless linked together and backhauled to the core network. In this paper, a heterogeneous network infrastructure is proposed based on millimeter wave access points and backhubs at 57-66GHz et 71-86GHz. The latest breakthrough in CMOS and BiCMOS technologies and in industrial packaging are used as starting point for feasibility studies. The technical challenges of such a deployment are emphasized and tackled in this paper.

#### Introduction

Suite à la forte pénétration des appareils nomades (tablettes et smartphones) dans le secteur de la téléphonie mobile, on constate actuellement une explosion du trafic de données dans les réseaux cellulaires et locaux sans fil [1][2]. Les performances de ces dispositifs mobiles ont permis en effet de faire évoluer les usages, avec la prolifération d'applications gourmandes en débit et utilisant la géolocalisation (visioconférence, video streaming, cloud computing, info trafic, etc.). A ceci se rajoute en perspective les communications sans fil entre objets (« Internet Of Things ») qui ferait passer [1] le volume de données transférées par mois à 11 hexabytes (11.10<sup>18</sup> octets) en 2017, avec une progression annuelle de 66%. Le réseau 4G LTE en cours de déploiement devrait absorber 45% du trafic en 2017, en augmentant la capacité moyenne de trafic par utilisateur de 500kbps en 2012 à 4Mbps en 2017. Cette nouvelle génération de réseau cellulaire ne devrait rapidement plus suffire seule à faire face à progression du trafic mobile.

Une alternative consiste à déployer des points d'accès WiFi et de petite cellules (pico, femto cells) en zone urbaine dense et à l'intérieur des bâtiments afin de décharger une partie du trafic [3]. Ainsi de nombreuses solutions ont déjà été proposées afin d'augmenter la capacité des réseaux: l'agrégation de porteuses pour le LTE-Advanced, l'utilisation des bandes TV libres en UHF et VHF, l'utilisation de modulations complexes associées à la réduction de la taille des cellules (64QAM pour les femtocells LTE), et enfin en tirant partie de la diversité du canal de propagation par une architecture MIMO [2]. Ainsi selon [1] le pourcentage de trafic dérivé des réseaux cellulaires devrait atteindre 46% du trafic en 2017.

Si le déploiement de petites cellules et point d'accès participe au désengorgement des réseaux cellulaires, il soulève cependant un bon nombre de questions techniques et économiques, ainsi que des préoccupations d'ordre sociales et environnementales.

## 1. Enjeux

La première limitation au déploiement massif de points d'accès WiFi est l'agrégation et le routage du trafic (typiquement >10Gbps) jusqu'au cœur de réseau, sans latence. Le déploiement d'un réseau filaire ou fibré requiert de lourds travaux en milieu urbain, tandis que les liaisons capillaires sans fils (backhaul) sont limitées en débit par la faiblesse des ressources spectrales entre 2 et 6GHz.

Sur les bandes disponibles (ISM ou licenciées) les canaux sont le plus souvent limités à 20MHz (100MHz avec agrégation), ce qui impose une forte efficacité spectrale pour atteindre des débits >1Gbps. Si la réduction de la taille des cellules permet d'obtenir des rapports signal sur bruit importants, l'efficacité spectrale reste limitée en pratique par les imperfections radiofréquences des transceivers, et les conditions de propagations (multi-trajets, interférences).

Le déploiement de points d'accès requiert de plus un transfert de service depuis les opérateurs de téléphonie mobile vers les fournisseurs d'accès à Internet, transparent pour l'utilisateur, et associé à une tarification simple. De même le déploiement de femto cells dans les set-top boxes constitue un transfert de service qui bouscule le modèle économique des opérateurs de réseau cellulaire.

L'omniprésence de point d'accès visibles en zone urbaine (typiquement tous les 50m) pourrait également préoccuper une population de plus en plus soucieuse de son environnement électromagnétique, même si les niveaux d'expositions des standards WiFi sont faibles.

## 2. Points d'accès et relais millimétriques dans les futurs réseaux hétérogènes 5G

Dans ces conditions, l'utilisation des bandes millimétriques entre 30 et 300GHz pour décharger une partie du trafic mobile serait une alternative séduisante [3]. A ces fréquences les systèmes antennaires sont relativement compacts et peuvent s'intégrer discrètement dans le mobilier urbain (poteaux électriques, lampadaires, abris bus, panneaux de signalisation, etc). Les faibles longueurs d'onde (5mm à 60GHz) permettent la mise en réseaux des éléments rayonnants et la formation électronique de faisceaux antennaires très directifs. Ainsi les niveaux d'exposition aux rayonnements électromagnétique reste faibles (1mW/cm<sup>2</sup> à 60GHz contre 20mW/cm<sup>2</sup> à plus basses fréquences [4] IEEE Safety) et limités aux seuls utilisateurs. En outre les ondes millimétriques pénètrent peu dans le corps humain puisque seulement 0.1% de la puissance incidente passe au travers de la peau à 60GHz.

Des expérimentations de liens extérieurs ont déjà été menées sur les bandes 28 et 32GHz avec succès, notamment en Corée. Cependant nous pensons que les bandes 57-66GHz et 71-76/81-86GHz devraient être jugées plus pertinentes pour ces applications extérieures du fait de leur largeur de bande (9 et 10GHz), et de leur disponibilité dans de nombreux pays. Les dispositifs mobiles devraient à terme intégrer des transceivers 60GHz pour leur connectivité locale (WiFi 802.11ad). Il paraît donc judicieux d'étendre cette fonctionnalité à l'extérieur des bâtiments en utilisant tout ou partie du chipset 60GHz. Le relayage du trafic (backhaul) jusqu'au cœur de réseau nécessite des liens directifs à plus longue distance. A ce titre la bande E (71-76/81-86GHz) paraît être la plus judicieuse, car elle n'est pas située sur un pic d'absorption atmosphérique et les coûts des licences sont relativement faibles.

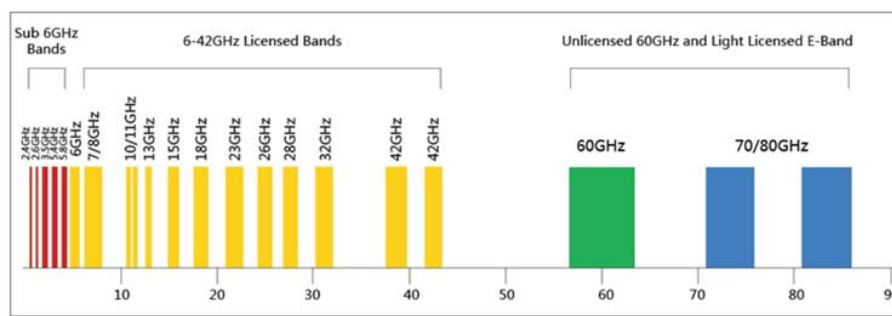


Figure 1: Panorama des bandes de fréquences utilisables (selon pays) pour les communications mobiles entre 2 et 90GHz

Ainsi notre vision du réseau cellulaire 5G à l'horizon 2020 est un réseau hétérogène composé de petites cellules (10-50m) doté de point d'accès multiple (multi-RAT) à 2.45/5.6GHz (débits moyens jusqu'à 1Gbps) et 60GHz (débits élevés, de 250Mbps à 7Gbps) reliés ensemble par des relais (backhaul) en bande E ou à 60GHz réalisant l'agrégation d'une grande quantité de trafic (10-25Gbps) et le routage jusqu'au cœur de réseau.

La figure ci-dessous illustre un scénario typique de corridor urbain. Un utilisateur marchant dans la rue souhaitant profiter d'une application gourmande en débit sur son mobile fait une requête à la station de base sous couverture via le réseau 2G/3G/4G. Celui-ci lui accorde alors une ressource (slot de temps, fréquence) sur l'un des points d'accès millimétrique du réseau, situé à proximité de l'utilisateur. Le point d'accès effectue alors la recherche de l'utilisateur par un algorithme de formation de faisceau et pointe son faisceau d'antenne dans sa direction. Les données provenant du réseau sont alors relayées par sauts successifs (multi-hop) jusqu'à l'utilisateur. Ce service peut être assuré avec une latence supérieure à celle prévu pour le trafic prioritaire en 3G/4G. Ce partitionnement de service est cohérent avec la notion de priorité apportée par IPV6.



Figure 2: Illustration de réseau hétérogène avec point d'accès (vert) et backhaul (rouge)

### 3. Challenges et technologies clés

La principale difficulté inhérente au déploiement de liens millimétriques en milieu urbain est la portée. Pour des cellules typiquement espacées de 50m, le lien entre mobile et point d'accès doit être établi à 25-30m.

Les systèmes backhails millimétriques du marché ont des portées de plusieurs centaines de mètre à plusieurs km. Cependant ils travaillent souvent sur des bandes inférieures à 250MHz, garantissant des débits <1Gbps. Les équipementiers s'intéressent actuellement à la bande E [5] sur laquelle il est possible d'agréger les bandes et de rayonner de fortes puissances (55dBm EIRP) pour atteindre des débits de l'ordre de 10Gbps. Ces systèmes mettent en œuvre des composants discrets hauts de gamme en technologies III-V (AsGA, InP, GaN), et utilisent des antennes paraboliques très directives montées sur des mâts à faibles vibrations. Les contraintes de coûts associés à la forte densité de petites cellules imposent à des choix technologiques différents. Tout d'abord l'assouplissement de la régulation aux Etats Unis (FCC) dans la bande 57-66GHz à l'extérieur laisse entrevoir l'utilisation de cette bande non licenciée pour des applications backhaul. Ensuite la technologie BiCMOS permettrait dans ce contexte de fournir les performances nécessaires aux transceivers millimétriques (Ft 350GHz, linéarité, gain, bande, facteur de bruit, bruit de phase) afin de garantir un lien de 100-200m, associé aux facteurs de coût de l'électronique grand public [6]. L'utilisation de dispositifs antennaires planaires (réseaux d'antenne, Fabry-Perot, lentille discrète [7]) permettrait également de garantir un gain supérieur à 30 dBi pour une surface typique de 100cm<sup>2</sup>, pour une intégration dans le mobilier urbain à des coûts compétitifs. Ces dispositifs doivent être dotés de capacité d'ajustement automatique de leur faisceau, afin de faciliter l'installation et la maintenance. Le bilan de liaison ci-dessous a été établi à 60GHz sur un canal en prenant ces hypothèses de choix technologiques. Il est aussi valide en bande E. En utilisant les 4 canaux en parallèle, un débit net de l'ordre 15-25Gbps est envisageable sur une distance >100m.

Le lien avec l'utilisateur ensuite soulève de nombreuses questions. Coté mobile la première est l'intégration du module antennaire 60GHz en sus des systèmes cellulaires, GPS, Wi-Fi, Bluetooth, etc. En outre le module ne doit pas être situé sur une zone de préhension du mobile. Les technologies de packaging avancées sur interposer céramique (HTCC, LTCC), organique (MLO, LCP) ou silicium permettent le report compact d'un transceiver et de plusieurs antennes dans un espace réduit [8]. Cependant le faible facteur de forme attendu limite le gain d'antenne entre 5 et 10dB. Se pose également les contraintes de consommation des circuits, vis à vis de l'autonomie de la batterie. Le faible rendement des amplificateurs de puissances CMOS et BiCMOS en bande millimétrique limite par exemple la puissance d'émission à faible consommation (typiquement point de compression à 1dB autour de 10dBm pour 100mW de consommation DC). Les convertisseurs A/N et le circuit numérique de traitement du signal peuvent avoir des consommations très variables selon les types de modulations utilisées (OFDM ou mono porteuse), la fréquence d'échantillonnage, et le traitement du signal réalisé (égalisation, compensation des imperfections radiofréquence). Afin de réduire la consommation des circuits et augmenter la portée, il peut s'avérer judicieux de réduire la bande du signal en subdivisant les canaux IEEE 802.15.3c en sous 8 sous canaux de 220MHz, selon le schéma ci-dessous.

	16QAM	64QAM
<b>Emitter</b>		
Bandwidth (GHz)	1,76	1,76
P1dB at PA output (dBm)	15,00	18,00
PA output back off (dB)	5,00	8,00
Mean power at PA output (dBm)	10,00	10,00
PA-antenna interconnexion loss (dB)	2,00	2,00
Emitted mean power (dBm)	8,00	8,00
Antenna gain (dB)	32,00	32,00
EIRP (dBm)	40,00	40,00
<b>Channel</b>		
Distance (m)	170,00	100,00
Carrier frequency (Ghz)	64,80	64,80
Oxygen and rain attenuation (dB)	5,44	3,20
Path loss (dB)	-118,72	-111,87
<b>Receiver</b>		
Antenna gain (dBi)	32,00	32,00
LNA-antenna interconnexion loss (dB)	2,00	2,00
Power at LNA input (dBm)	-48,72	-41,87
<b>Signal to Noise Ratio</b>		
Thermal noise (dBm)	-81,52	-81,52
Implementation loss (dB)	3,00	5,00
Noise factor (dB)	8,00	8,00
SNR at ADC input (dB)	21,80	26,65
<b>Signal processing</b>		
Required SNR for BER=1e-5 (dB)	16,00	21,00
Margin (dB)	5,80	5,65
Raw Data rate (Mbps)	5280	7920

Figure 3: bilan de liaison pour un lien entre relais (backhails)

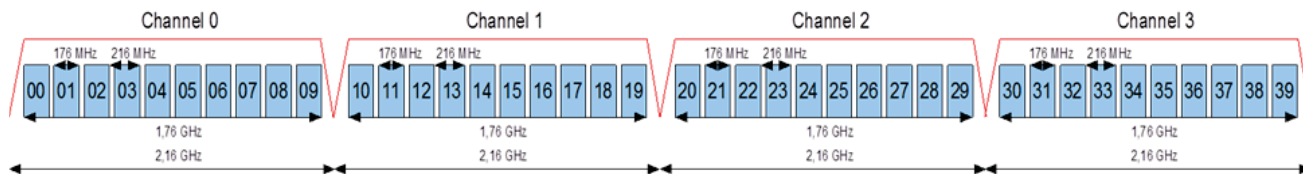


Figure 4: plan de fréquence avec division des canaux IEEE802.15.3c en sous canaux

Les circuits numériques de traitement du signal effectuent souvent un calcul parallélisé au-delà de 300MHz. Ce découpage en sous canaux permettraient de faire la démodulation sur une seule voie, en réduisant ainsi la consommation. En outre cette division en sous-canaux de 220MHz est compatible avec le partitionnement de la bande E en canaux de 250MHz (12% roll-off).

Sous cette hypothèse de réduction de bande, on obtient le bilan de liaison ci-dessous en voie montante et descente vers le mobile. 250Mbps de débits net peut être ainsi atteint en bord de cellule. A proximité du point d'accès, les sous-canaux peuvent être agrégés afin d'augmenter le débit (1Gbps pour deux sous-canaux à 20m).

UPLINK	QPSK		BPSK	
	Emitter	0,22	0,22	0,22
Bandwidth (GHz)	0,22	0,22	0,22	0,22
P1dB at PA output (dBm)	12	10	10	10
PA output back off (dB)	2	0	0	0
Mean power at PA output (dBm)	10	10	10	10
PA-antenna interconnexion loss (dB)	2	2	2	2
Emitted mean power (dBm)	8,00	8,00	8,00	8,00
Antenna gain (dB)	5	5	5	5
EIRP (dBm)	13,00	13,00	13,00	13,00
Channel	20	50	20	50
Distance (m)	20	50	20	50
Attenuation coefficient	2	2	2	2
Carrier frequency (Ghz)	64,8	64,8	64,8	64,8
Oxygen and rain attenuation (dB)	0,64	1,60	0,64	1,60
Path loss (dB)	-94,69	-102,65	-94,69	-102,65
Receiver	18	18	18	18
Antenna gain (dBi)	18	18	18	18
LNA-antenna interconnexion loss (dB)	3	3	3	3
Power at LNA input (dBm)	-66,69	-74,65	-66,69	-74,65
Signal to Noise Ratio	-90,56	-90,56	-90,56	-90,56
Thermal noise (dBm)	-90,56	-90,56	-90,56	-90,56
Implementation loss (dB)	2	1	2	1
Noise factor (dB)	8	8	8	8
SNR at ADC input (dB)	13,86	6,90	13,86	6,90
Signal processing	12	8,5	12	8,5
Required SNR for BER=1e-5 (dB)	12	8,5	12	8,5
Margin (dB)	1,86	-1,60	1,86	-1,60
Data rate (Mbps)	330	165	330	165

DOWNLINK	16QAM		QPSK	
	Emitter	0,44	0,22	0,22
Bandwidth (GHz)	0,44	0,22	0,22	0,22
P1dB at PA output (dBm)	15	15	14	14
PA output back off (dB)	5	5	4	4
Mean power at PA output (dBm)	10	10	10	10
PA-antenna interconnexion loss (dB)	3	3	3	3
Emitted mean power (dBm)	20,80	20,80	20,80	20,80
Antenna gain (dB)	22	22	22	22
EIRP (dBm)	42,80	42,80	42,80	42,80
Channel	20	30	50	50
Distance (m)	20	30	50	50
Attenuation coefficient	2	2	2	2
Carrier frequency (Ghz)	64,8	64,8	64,8	64,8
Oxygen and rain attenuation (dB)	0,64	0,96	1,60	1,60
Path loss (dB)	-94,69	-98,22	-102,65	-102,65
Receiver	5	5	5	5
Antenna gain (dBi)	5	5	5	5
LNA-antenna interconnexion loss (dB)	2	2	2	2
Power at LNA input (dBm)	-48,89	-52,41	-56,85	-56,85
Signal to Noise Ratio	-87,55	-90,56	-90,56	-90,56
Thermal noise (dBm)	-87,55	-90,56	-90,56	-90,56
Implementation loss (dB)	3	3	2	2
Noise factor (dB)	8	8	8	8
SNR at ADC input (dB)	27,65	27,14	23,71	23,71
Signal processing	15	15	12	12
Required SNR for BER=1e-5 (dB)	15	15	12	12
Margin (dB)	12,65	12,14	11,71	11,71
Data rate (Mbps)	1173,33	586,67	330,00	330,00

Figure 5: bilan de liaison entre point d'accès et terminal utilisateur mobile

Coté point d'accès la contrainte est de garantir l'accès séquentiel ou simultané à plusieurs utilisateurs situés dans la même cellule, en générant de multiples faisceaux directs vers les utilisateurs. L'accès multiple peut s'effectuer en temps (TDMA), en fréquence sur les sous-canaux (FDMA), spatialement (SDMA), ou par un mixe de ces techniques. Le schéma ci-dessous combine un multiplexage FDMA et SDMA en focalisant plusieurs faisceaux dans des directions différentes vers des utilisateurs utilisant des sous-canaux différents. Cette solution permet d'agréger simplement les données des utilisateurs dans les sous-canaux précédemment définis, en vue d'un routage vers le cœur de réseau. Elle nécessite cependant la formation de faisceaux d'antennes multiples au point d'accès. Cette fonctionnalité peut être obtenue en utilisant plusieurs modules antennaires reliés à un même circuit numérique. Chacun de ses modules peut être pointé dans une direction différente (cas 20,22, 24 du schéma), ou synchronisés dans la même direction vers un utilisateur, afin d'améliorer la portée en bord de cellule (cas 00). Dans ce cas de figure, les déphaseurs grossiers nécessaires au dépointage peuvent être réalisés en fréquence porteuse, tandis que des déphasages plus fins entre les modules sont réalisés en bande de base ou sur l'horloge de référence.

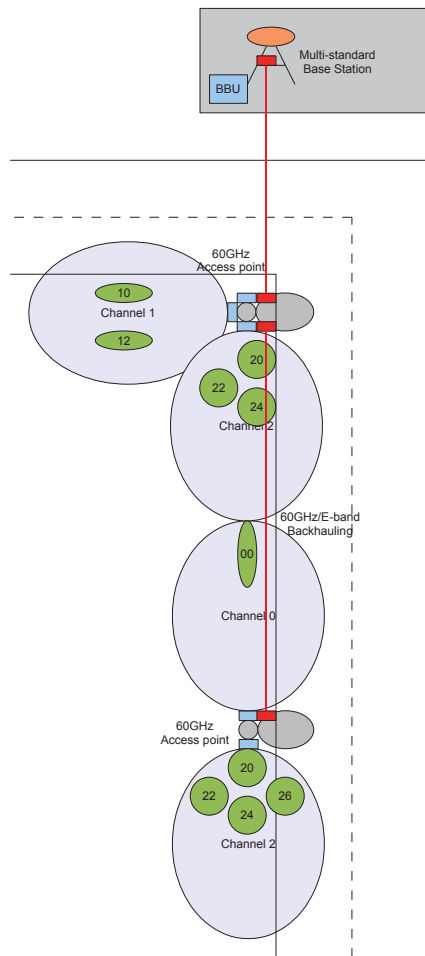


Figure 7: accès multiple SDMA/FDMA

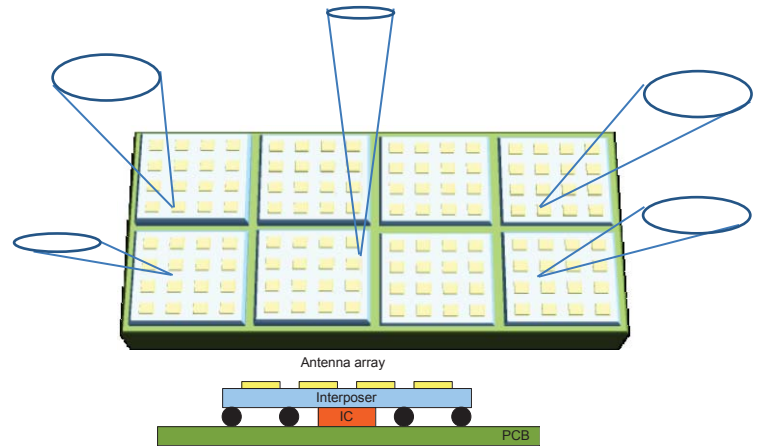


Figure 6: juxtaposition de module antennaire pour point d'accès multi-faisceaux

#### 4. Conclusion

Les récentes avancées des technologies CMOS et BiCMOS, et du packaging, autorisent aujourd'hui le développement de modules antennaires performants et bas coûts dans les bandes de fréquences millimétriques. La densification des cellules des futurs réseaux hétérogènes pourrait être rendue économiquement et sociologiquement possible par l'utilisation de ces nouveaux dispositifs. De nombreux verrous techniques, brièvement abordés dans cet article, restent cependant à lever.

La segmentation des marchés entre réseau cellulaire et réseau local devrait s'en trouver bouleverser. Ce changement de paradigme pourrait s'accompagner d'un nouveau bouleversement des modèles économiques, se traduisant par une convergence entre opérateur et fournisseur d'accès, entre équipementiers et vendeurs de circuits intégrés.

#### Références bibliographiques

- [1] "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012–2017," Cisco, 2006. [Online]. Available: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html). [Accessed: 22-Jan-2014].
- [2] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 3, pp. 10, 22, June 2010.
- [3] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [4] M. Zhadobov, N. Chahat, R. Sauleau, C. Le Quement, and Y. Le Drean, "Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 3, no. Special Issue 02, pp. 237–247, 2011.

- [5] FP7-ICT E3Network “Energy Efficient E-band Transceiver for the Backhaul of Future Networks” [Online]. <http://www.ict-e3network.eu/> . [Accessed: 22-Jan-2014].
- [6] Su-Khiong Yong and Chia-Chin Chong. An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: Potentials and technical challenges. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007:10, 2007.
- [7] H. Kaouach, L. Dussopt, J. Lantéri, T. Koleck, and R. Sauleau, “Wideband Low-Loss Linear and Circular Polarization Transmit-Arrays in V-Band,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 7, pp. 2513–2523, 2011.
- [8] Dussopt, L. et. al. "Silicon interposer with integrated antenna array for millimeter-wave short-range communications," *Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2012 IEEE MTT-S International , vol., no., pp.1,3, 17-22 June 2012