

# Histoire de la téléphonie mobile

Philippe Ciblat<sup>(1,2)</sup>

- (1) Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris
- (2) Ecoinfo, Groupe de Service du CNRS



# Plan

1. Les grandes lignes
  - Dates
  - Principal général des communications
  - Histoire des différentes générations
2. Techniques sous-jacentes
  - Techniques de communications
  - Consommation énergétique
3. Déroulement du processus d'innovation
  - L'imaginaire sociétal
  - Les parties prenantes
4. Et la prochaine génération

## Section 1 : Les grandes lignes

# Les différentes générations

- 1G (1983) : analogique
- 2G (1992) : première numérique mais voix
- 3G (2004) : données (de l'Internet mobile)
- 4G (2012) : données à haut débit
- 5G (2020) : très haut débit, faible latence, forte connectivité
- ....
  
- Environ une nouvelle génération de systèmes cellulaires (et donc sous-partie du sans fil) tous les 10 ans
- Généralement lancement commercial de  $n$ -G concomitant avec les premières études sur la  $(n + 1)$ -G

# Principe de gains de débit

## Rappel

Soit  $R$  le débit. Si  $R < C$  où  $C$  est la capacité de Shannon (en bits/s), alors il existe un code (de longueur infinie) conduisant à une probabilité d'erreur arbitrairement petite

Application au canal gaussien de bande  $B$  (on envoie un échantillon toutes les  $1/B$  secondes) :  $z_n = s_n + w_n$

$$C = \underbrace{B}_{\substack{\text{Degré de liberté} \\ \text{(DoF/terme pre-log)}}} \log_2 \left( 1 + \underbrace{\frac{P_{\text{tx}}}{BN_0}}_{\text{Signal-to-Noise Ratio (SNR)}} \right) \text{ (en bits/s)}$$

avec

- $P_{\text{tx}} = E_s B$  (en Watts) où  $E_s = \mathbb{E}[|s_n|^2]$  (en Joules)
- $N_0$  (en Joules) le niveau de la densité spectrale du bruit

# Analyse de ces gains

- $P_{tx}$  constant : fonction croissante en  $B$  mais limite asymptotique

Mais asymptotiquement en  $P_{tx}$  (i.e., pour  $P_{tx}$  suffisamment grand), on a

$$C \propto B \log_2(P_{tx})$$

- **Extension au  $n_{tx}$ -MIMO carré** : DoF supplémentaire -  $n_{tx}B$

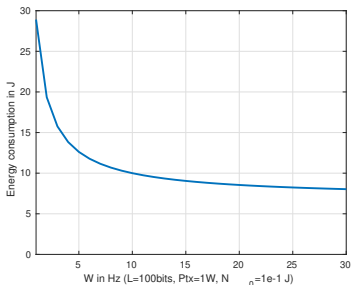
## Exemple

Transmission d'un fichier de taille  $L$  bits : énergie consommée

$$E_{tx, \text{fichier}} = \frac{LP_{tx}}{B \log_2 \left( 1 + \gamma \frac{P_{tx}}{BN_0} \right)}$$

avec  $\gamma$  perte liée à un système pratique

# Illustrations numériques



## $E_{\text{tx, fichier}}$ vs $B$

- DoF (ou terme pre-log) pertinent pour décroître l'énergie de transmission consommée
  - Fait pour  $(n+1)$ -G comparé à  $n$ -G :  $n_{\text{tx}} \nearrow$  and  $B \nearrow$
  - Débit augmente et aussi J/bit décroît
  - Attention : seulement énergie de transmission !
- $\gamma$  pertinent aussi : amélioration des techniques pratiques (IES, codage, ...)

Calcul théorique (et simplifié) entre les  $n$ -G

	3G	4G	5G
Bande ( $B$ )	5MHz	20MHz	100MHz
Antennes ( $n_{tx}$ )	1	4	64
Débit	67Mb/s	758Mb/s	6.35Gb/s
Energie par bit ( $E_{tx}/L$ )	148.4nJ	13.20nJ	1.57 nJ
Bit par Joule	6.7Mb/J	75.8Mb/J	635.1Mb/J

avec  $P_{tx} = 10W$ , équation de Friss (100m et  $f_0 = 1GHz$  ou  $f_0 = 3GHz$  pour 5G) et  $N_0 = -140dBm/Hz$

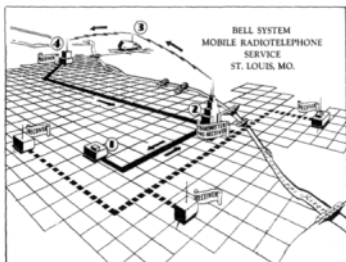
## Résultat

A chaque génération, on est meilleur en efficacité énergétique



## La 0G

- 1946 : premier appel téléphonique sans fil à Saint-Louis
- Dès 1948, service disponible dans une centaine de villes
- Pas d'interopérabilité entre zones
- Environ 5000 abonnés (flottes de camions et journalistes)



- 1947 : concept du téléphone cellulaire, i.e., de la cellule
- Pas assez de spectre disponible (pour toutes les cellules)
- En Union soviétique, système Altai opérationnel en 1965

## La 1G

- 1973 : Motorola DynaTAC (Dynamic Total Area Control)
- Premier système cellulaire (“hand-over” entre cellules)
- C’est le premier vrai “handheld phone” : 780g, 25cm, 1h d'autonomie, et 12000 euros-constant
- 1983 : lancement commercial



- Normes : AMPS (Advanced Mobile Phone System-1979), TACS (Total Access Communication System-1985), NMT (Nordic Mobile Telephone-1981), Radiocom2000 (1985), ...
- Problèmes : batterie et taille d’antennes (bande autour de 150 ~ 400MHz)
- Application : souvent téléphone de voitures

# La 2G

- 1983 : lancement du “Groupe Spécial Mobile” (GSM) par le CNET
- Premier système numérique mais voix uniquement
- En parallèle, Qualcomm réfléchit au futur “Interim Standard” (IS-95) états-unien
- En parallèle, NTT-DoCoMo travaille sur “Personal Digital Cellular” (PDC) lancé en 1993
- 1985 : la CEE (future UE) lance le programme “Global System for Mobile communications” (GSM)
- 1991 : premier réseau expérimental à Genève
- 1992 : ouverture commerciale des réseaux GSM en Europe

**Débit par utilisateur : 13.4kb/s**

## Remarque

Chaque génération admet des améliorations au fil du temps

Passage du mode “circuit” (pour la voix) au mode “paquet” (pour les données)

- General Packet Radio Service (GPRS-1995)
  - Chaque utilisateur peut avoir 8 slots d'affilée
  - $\times 8$  débit du GSM-voix (et /8 nb utilisateurs) : 107kb/s
- Enhanced Data rates for Gsm Evolution (EDGE-2000)
  - Comme GPRS mais on passe d'une BPSK à une 8PSK
  - $\times 3$  débit du GPRS : 321kb/s

# La 3G

- 1991 : Lancement des travaux
- Création du 3GPP (Third Generation Partnership Project)
- Plusieurs 3G mais consensus final sur
  - UMTS : Universal Mobile Telecommunications System
  - Release99 et ensuite Release 4 → Release 7
- 2004 : Lancement commercial

**Débit par utilisateur minimum : 144kb/s (parfois 384kb/s → 2Mb/s)**

## Evolution : HSDPA/HSUPA (H+-2002)

- Hybrid ARQ, Adaptive Modulation and Coding
- Agrégation de codes d'utilisateur

**Débit par utilisateur typique : 3.6Mb/s**

# La 4G

- 2001 : Lancement des travaux
- 4G est le LTE (Long-Term Evolution)
  - "Wireless Internet"
  - Release 8 → Release 13
- 2012 : Lancement commercial

**Débit par utilisateur minimum : 10Mb/s**

## Evolution

- Release 9 (2009) : petit MIMO
- Release 11 (2012) : coordination multi-points
- Release 12 (2015) : agrégation de bandes

**Débit par utilisateur : 450Mb/s → 3Gb/s**

### Trois modes

- Très grand débit (eMMB) : réseau cellulaire
- Faible latence et grande fiabilité (URLLC) : automatisation
- Grande connectivité (mMTC) : Internet des objets (IoT)

### Mode : eMMB

- 2010 : Lancement des travaux
- Release 14 et au-delà
- 2020 : Lancement commercial

**Débit par utilisateur minimum : 240Mb/s (jusqu'à 50Gb/s)**

## Section 2 : Techniques sous-jacentes



# Technologies utilisées

## Triptyque

- Fréquence porteuse et largeur de bande
- Gestion de l'interférence
  - inter-utilisateurs (TDMA/FDMA/CDMA)
  - Gestion de l'interférence intra-utilisateurs (OFDM)
- Multi-antennes (MIMO)

Le reste est du détail (parfois très ennuyant à gérer)

# Logique des technologies

- Accroître la largeur de bande
  - Augmenter la fréquence porteuse
  - SNR plus faible (donc meilleur code correcteur - Turbocodes créé à Telecom Bretagne) et/ou plus de BTS (*Telecom202b/Micas923*) : gourmand en calcul
  - Réutilisation des fréquences entre cellules : gestion de l'interférence via Successive Interference Canceler (SIC) (*Micas921*) : gourmand en calcul
  - Plus d'interférence intra-utilisateurs : OFDM (*Telecom202a*)
- Accroître le nombre d'antennes (MIMO)
  - Gestion de l'interférence entre canaux : gourmand en calcul
  - Focalisation des ondes via le multi-antennes : *beamforming*
  - En MIMO, compromis à faire entre gain en SNR et gain en canaux indépendants (*Micas922*)

# Technique de la 2G

- Bande de 25MHz autour de 950MHz ou 1.8GHz
- Découpage en 125 sous-bandes de 200kHz (FDMA)
- Sur chaque  $B = 200\text{kHz}$ , 8 utilisateurs en TDMA

$$\text{Débit} = 1.35B \times \frac{1}{8} \times \frac{1}{2} \times \frac{114}{144} = 13.4\text{kb/s}$$

$$\text{Nb utilisateurs} = 125 \times 8 = 1000$$

# Technique de la 3G

Inspirée de la technologie IS-95 : CDMA

- Concurrence entre CDMA et OFDM(A)
- Compromis sur le CDMA dans le 3GPP

**Couche physique :**

- Typiquement 20 bandes de 5MHz (occupation 100MHz) autour de 950MHz ou 1.8GHz
- Sur chaque  $B = 5\text{MHz}$ , technique CDMA avec  $K (= 8)$  utilisateurs variables

$$\text{Débit} = B \times \frac{1}{K} \times 0.615 = 384\text{kb/s}$$

$$\text{Nb utilisateurs} = K \times 20 = 160$$

# Technique de la 4G

Inspirée de la technologie ADSL (filaire)

- CDMA : difficile à traiter toutes les interférences
- Ici, compromis sur l'OFDM (créé pour le DAB au CNET)
- MIMO (Bell labs) : codes optimaux (Telecom Paris)

**Couche physique :**

- Typiquement 30 bandes de 20MHz (occupation 600MHz) autour de 950MHz ou 1.8GHz
- Sur chaque  $B = 20\text{MHz}$ , technique OFDMA et  $4 \times 4\text{-MIMO}$  avec  $K(= 8)$  utilisateurs variables

$$\text{Débit} = 4 \times B \times \frac{1}{K} \times 2 = 20\text{Mb/s}$$

$$\text{Nb utilisateurs} = K \times 30 = 240$$

# Technique de la 5G

Inspirée de la technologie 4G

## Couche physique :

- Typiquement 1 bande de 100MHz (occupation 100MHz) autour de 3.6GHz
- Sur chaque  $B = 100\text{MHz}$ , technique OFDMA et  $64 \times 64$ -MIMO avec  $K(= 213)$  utilisateurs variables

$$\text{Débit} = 64 \times B \times \frac{1}{K} \times 8 = 240\text{Mb/s}$$

$$\text{Nb utilisateurs} = K = 213$$

## Nouveauté

- Le mode veille : si très faible charge, la station s'éteint presque
- Premier élément sur l'énergie !

# Consommation énergétique

Jusqu'au débat sur la 5G, ce n'était pas un sujet central

- Consommation électrique
  - Limite liée à la santé (rayonnement électro-magnétique)
  - Limite liée à la batterie des téléphones
- Consommation des ressources minières : rien à signaler

## Exemple :

- Les livres ne mentionnent aucun chiffre de consommation
  - P. Nicopolitidis et al., "Wireless Networks", 2003*
  - N. Tripathi, J. Reed, "Cellular Networks", 2014*
- Idem pour les pages Wikipedia (sauf 5G)
- En revanche, quelques chiffres sur des applications
  - A. Shehabi, "Energy and Greenhouse gas implications of internet video streaming in the US", 2014*
  - M. Deltour et al. "Evaluation du bilan carbone streaming vs DVD", projet PAF, 2020*

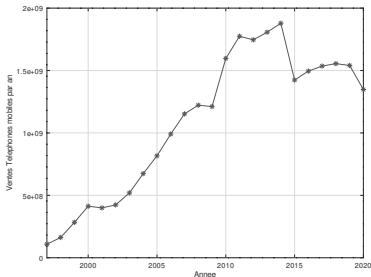
**Depuis 2020, les études pullulent !**

## Rappel : quels types d'énergie

- $P_{tx}$  : énergie de transmission (la seule considérée jusqu'à présent)
- $P_{traitement}$  : énergie de traitement (codage/décodage)
- $P_{circuit}$  : énergie des circuits (amplificateur de puissance, ADC/DAC)
- $P_{fabrication}$  : énergie de fabrication relié donc à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV : mine, transport, usinage). N'est pas indépendant de l'économie !



# Evolution du nombre d'appareils

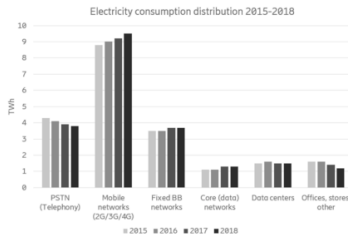
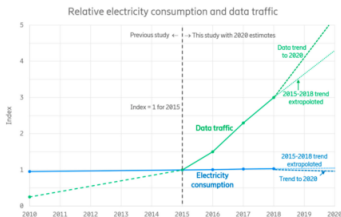


## Renouvellement (en France)

- 16 millions de smartphones neufs vendus en France en 2020
- 700.000 appareils en reconditionnement en 2020
- Renouvellement : environ 30 mois (+9 mois en 7 ans)
- Problème : obsolescences logicielle et culturelle

source : [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_best-selling\\_mobile\\_phones#Annual\\_sales\\_by\\_manufacturer](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_best-selling_mobile_phones#Annual_sales_by_manufacturer)

# Evolution de la consommation des opérateurs



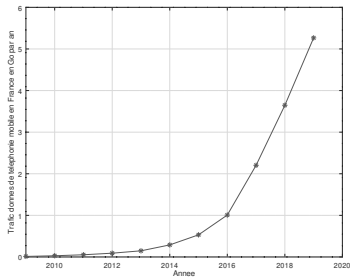
## Consommation électrique des opérateurs européens

### Remarques :

- Uniquement les opérateurs (hausse du réseau mobile)
- Attention : pas la fabrication
- Attention : pas les terminaux (ex : batterie Nokia3300 à 3.07Wh et Galaxy S20 à 15.44Wh)

source : D. Lunden, J. Malmodin, "Electricity consumption and operational carbon emissions of european telecom network operators," Fév. 2022

# Evolution du trafic



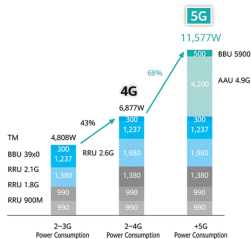
## Commentaires

- Très forte hausse liée à l'Internet mobile
- Heureusement hausse énergétique non correspondante (attention juste réseau et non appareil mobile)

# Etudes prospectives (1)

- Consensus sur la plus grande efficacité énergétique par Hz
- mais plus de Hz et matériel plus nombreux et plus complexe
- **Résultat** : hausse attendue de la consommation (sur terminaux et stations) + renouvellement accéléré du parc
  - Stations de base (typiquement 2 fois plus – *Huawei*)
  - Problème d'alimentation (batterie 2 fois plus – *Qualcomm*)

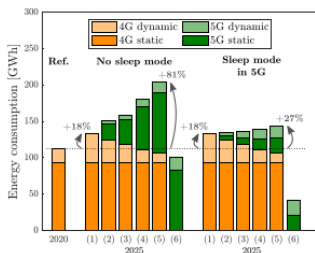
## Consommation d'une station de base



Principe de décommissionnement mais toutes fréquences ré-utilisées

## Etudes prospectives (2)

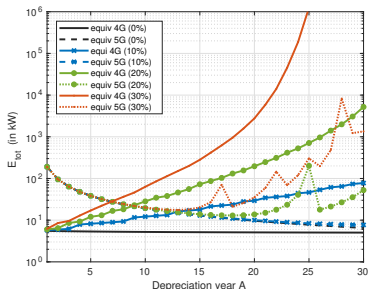
- Modèle 4G disponible :  $P = P_0 + \alpha R$
- Modèle 5G :  $P_{5g} = \beta P(B_{5g}/B)^{0.95} (S_{5g}/S)^{0.1}$  avec  $S$  le nombre de flots.
- Trafic (mode veille) et fabrication prise en compte (12 ans)



source : L. Golard, J. Louveaux, D. Bol, "Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints : the case of Belgium for 2022-2025," *Annals of Telecoms*, under publication

# Etudes prospectives (3)

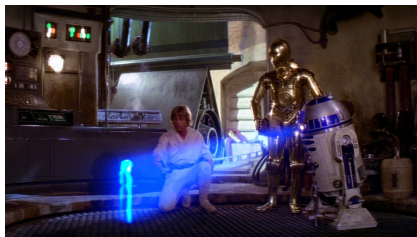
- Modèle 4G : 4 antennes, amortissement de 10 ans déjà
- Modèle 5G : 100 antennes
- Fabrication prise en compte (dont l'écart entre antennes)



source : P. Ciblat, "A propos du MIMO massif dans un contexte de sobriété numérique," colloque Grets, Sep 2022

## Section 3 : Processus d'innovation

# Un imaginaire non réalisé



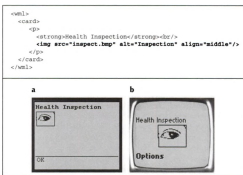
*Le Corniaud - 1965 || StarWars IV - 1977*

*source : J. Mercier, "Bell Canada en mots et en images de 1970 à 2000 : recherche sur les représentations sociales des TIC en publicité", Master UQAM 2010*



# Un imaginaire non prévu

- Lancement du Bibop (1993) : P. Meyer, "Vous vous imaginez au restaurant ou dans la rue, environné d'écervelés qui se font appeler ? En 2000, un million d'appareils à striduler n'importe quand, n'importe où et pour n'importe quoi"
- le SMS (1993) : aider les personnes malentendantes à communiquer
- Premiers travaux sur la 3G (1991) : envoi de données alors qu'Internet fixe n'est utilisé que par les chercheurs
- Premiers travaux sur la 4G (2001) : écran tactile n'existe pas, Wireless Application Protocol (WAP-1999)



Généralement, plan d'affaires très léger

# Un imaginaire envisagé

- 3G
  - Visiophonie, Visualisation de séquences vidéo (trentaine de programmes vidéos adaptés au mobile (flashes d'actualité, clips musicaux, bandes annonces de cinéma, sports)) (publicité SFR)
  - Conférences vidéo
  - Commerce en ligne
  - Message multimedia (mms)
  - Géolocalisation
- 4G
  - Télé-présence (réalité virtuelle) et réunion virtuelle
  - Accès rapide à l'information
  - Achat informé (données reçues liées à la localisation)
- 5G
  - Agriculture connectée
  - Voiture autonome

# Et la 5G : est-ce utile ?

- Effet rebond
  - attendu mais difficilement encore quantifiable
  - mais les annonces publicitaires n'incitent pas à diminuer la consommation
  - les opérateurs n'investissent pas pour transmettre moins de bits!
- Bataille entre réseaux gérés par des opérateurs et réseaux distribués (Wifi)
  - Solution clef en main par les opérateurs pour toutes les situations de communication (cellulaire, réseaux personnels, D2D).

# Parties prenantes

## 3GPP

- Instances de normalisation (ETSI pour l'Europe)
  - Associations d'industriels (GSMA pour les opérateurs)
- 
- Equipementiers : Nokia, Huawei, Ericson, ...
  - Electroniciens : Qualcomm, Broadcom, Intel, ...
  - Opérateurs : Orange, Verizon, Vodafone, ...
  - Fournisseurs de services : Google, Facebook, Amazon, Netflix, ...

## Section 4 : Et la nouvelle génération

# Comment se construit-elle ?

Honnêtement, aucune leçon n'a été tirée des controverses 5G pour élaborer la 6G. On continue comme avant.

Deux exemples :

- Zeppelin avec panneaux solaires pour remplacer les stations de base à terre. Coût énergétique dans l'étude : 0.
- Surface intelligente réfléchissante (RIS), bref des miroirs électro-magnétiques adaptables. Les disposer sur les murs pour créer des recombinaisons cohérentes de signaux. Coût énergétique dans l'étude : 0.

*sources :*

*D. Renga et M. Meo, "Can High Altitude Platforms make 6G sustainable," IEEE Com Mag, Sep 2022*

*M. Di Renzo, "Smart Radio Environment empowered by RISs : state of the art and the road ahead, Jnl of Sel. Areas in Coms, Nov. 2020*

# Bibliographie (pour aller plus loin)

- Ademe, <https://www.ademe.fr>
- Ecoinfo, <https://ecoinfo.cnrs.fr/>
- Rapport sur l'impact environnemental du numérique du Sénat, 2020
- Rapport sur la 5G du Haut Conseil pour le Climat, 2020
- Shift Project, déployer la sobriété numérique, 2019 : <https://theshiftproject.org/>
- P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux, K. Marquet, et A.-C. Orgerie, "Débat ARCEP sur les réseaux sans fil du futur : réponse d'Ecoinfo", papier blanc, Sep. 2022
- P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux, K. Marquet, et A.-C. Orgerie, "Impacts environnementaux de la 5G (partie 1)", papier blanc, Oct. 2022