Histoire de la téléphonie mobile

Philippe Ciblat[1,2]

[1] Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris
[2] Ecoinfo, CNRS

Plan

- Dates
- Principal général des communications
- Histoire des différentes générations
- Techniques sous-jacentes de communications
- Energie consommée
- Imaginaire sociétal
- Parties prenantes
- Et la prochaine génération

Objectifs

1. Pourquoi faire de l'histoire des technologies
   - En regardant le passé et étant donné le présent,
   - on anticipe un ou des scénarios du futur
     - ↪ le plus probable : même méchanisme que dans le passé
     - ↪ le plus rare : méchanisme indépendant
2. Téléphone mobile
   - Histoire bien connue et récente
   - Pas de temps des modifications très court
3. Application à TSE202 : comprendre un méchanisme de course à l'innovation

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 concomittant 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) : $z_n = s_n + w_n$

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

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
- B constant : pour P_{tx} suffisamment grand, on a

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

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

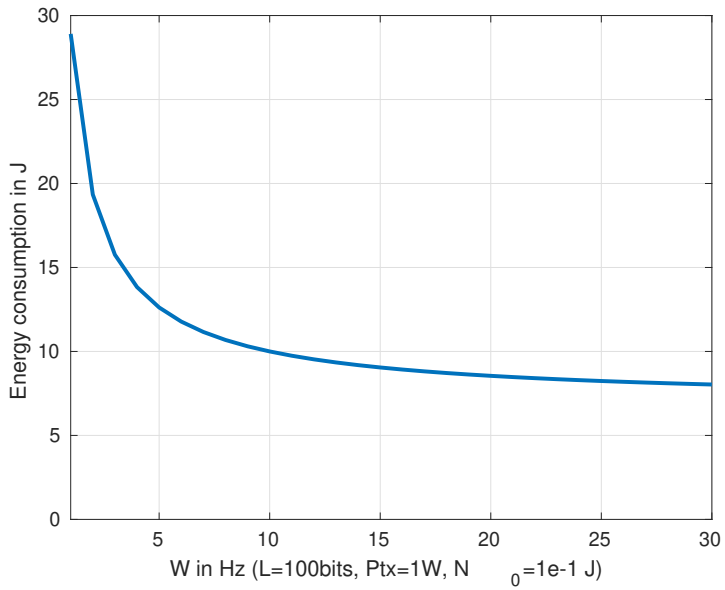
Exemple

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

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

avec γ perte liée à un système pratique

Illustrations numériques



$E_{\mathrm{tx,fichier}}$ vs B

- DoF utile pour décroître l'énergie de transmission consommée
  - Fait pour $(n+1)$-G comparé à n-G : $n_{\mathrm{tx}} \nearrow$ et $B \nearrow$
  - Débit augmente et aussi J/bit décroît
  - Attention : seulement énergie de transmission !
- γ utile 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 $P_{\text{tx}} = 10\text{W}$, équation de Friss (100m et $f_0 = 1\text{GHz}$ ou $f_0 = 3\text{GHz}$ pour 5G) et $N_0 = -140\text{dBm/Hz}$

Résultat

A chaque génération, meilleur en efficacité énergétique (de transmission)

Technologies utilisées

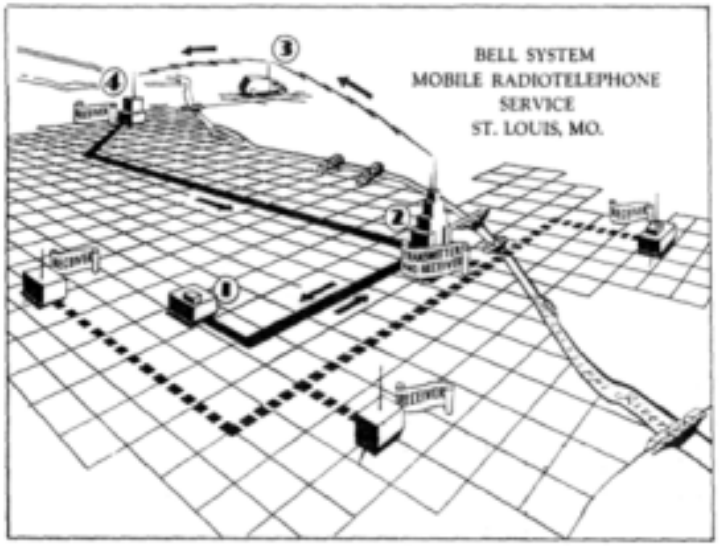
Triptyque

- Largeur de bande et fréquence porteuse (B)
- Multi-antennes (MIMO) (n_{tx})
  - Muliplexage
  - Formation de voie (*beamforming*)
- Gestion de l'interférence (γ)
  - Gestion de l'interférence intra-utilisateurs (OFDM)
  - inter-utilisateurs (TDMA/FDMA/CDMA)

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

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 $150 \sim 400$MHz)
- 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 : 13.4**kb/s**

La 2G+

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 $\rightarrow$ Release 7
- 2004 : Lancement commercial

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

Evolution : HSDPA/HSUPA (H+-2002)

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

La 4G (1/2)

- 2001 : Lancement des travaux
- 4G est le LTE (Long-Term Evolution)
  - "Wireless Internet"
  - Release 8 $\rightarrow$ 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) : aggrégation de bandes

La 4G (2/2)

- OFDM (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 4×4-MIMO avec $K(= 8)$ utilisateurs

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

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

5G : même logique (B et $n_{\text{tx}} \nearrow$) et une grande nouveauté

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

La 5G

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 : 240**Mb/s (jusqu'à** 50**Gb/s)**

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

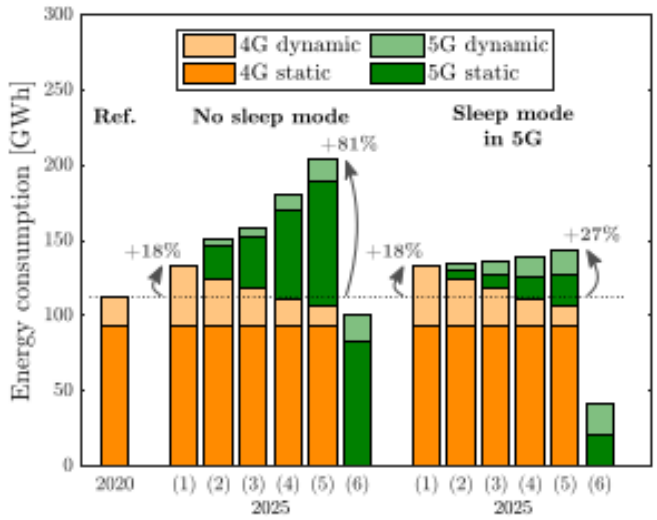
Depuis 2020, les études pullulent !

Rappel : quels types d'énergie

- P_{tx} : énergie de transmission (la seule considérée jusqu'à présent)
- $P_{\text{traitement}}$: énergie de traitement (codage/décodage)
- P_{circuit} : énergie des circuits (amplificateur de puissance, ADC/DAC)
- $P_{\text{fabrication}}$: énergie de fabrication reliée donc à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV : mine, transport, usinage)

Etudes prospectives (1)

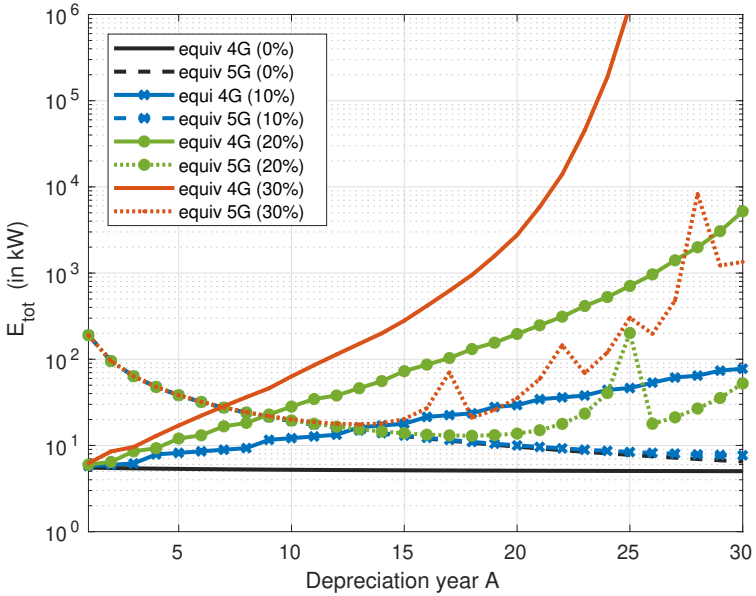
- Modèle 4G disponible : $P = P_0 + \alpha R$
- Modèle 5G : $P_{5g} = \beta P (B_{5g}/B)^{0.95} (S_{5g}/S)^{0.1}$ avec S le nombre de flots.
- Trafic (mode veille) et fabrication prise en compte (12 ans)



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, 2023

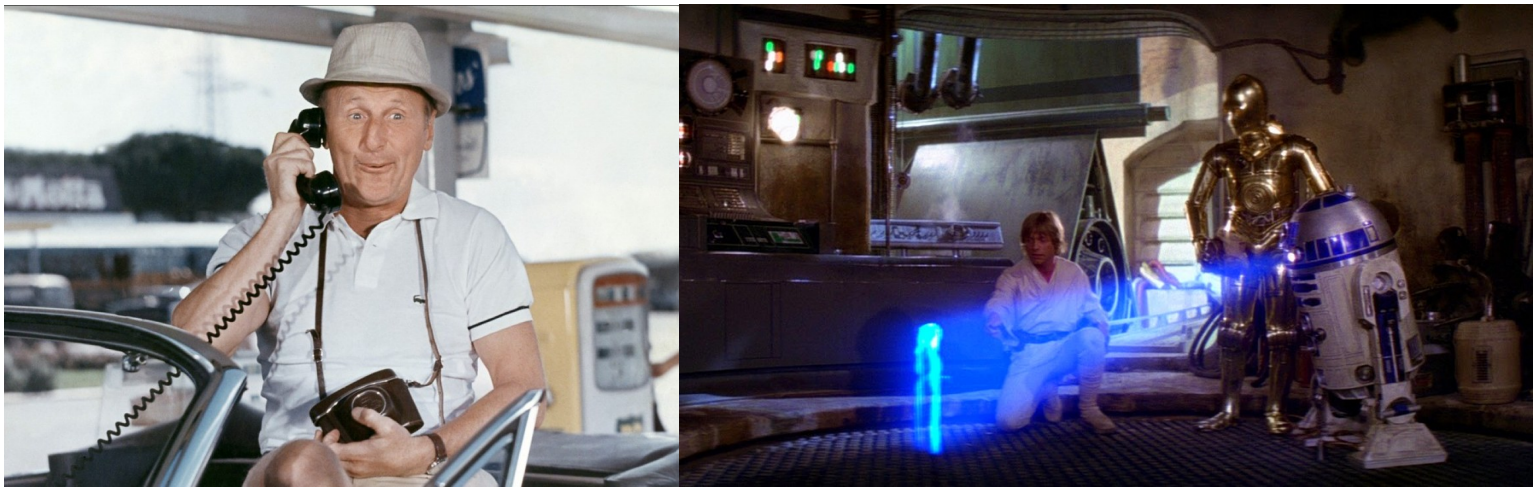
Etudes prospectives (2)

- 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 Gretsi, 2022

Un imaginaire non réalisé

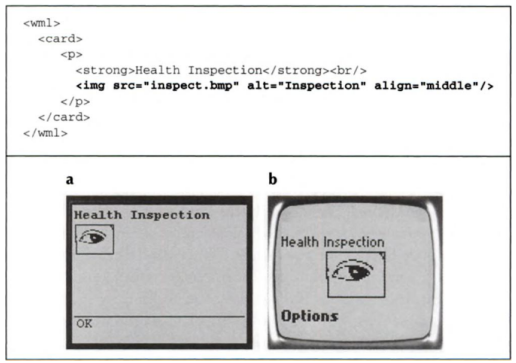


Le Corniaud - 1965 || StarWars IV - 1977

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 »
- 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 (flashs 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).

source : P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux, K. Marquet, et A.-C. Orgerie, "Impacts environnementaux de la 5G (partie 1)", papier blanc, Oct. 2022

Parties prenantes

3GPP

- Instances de normalisation (ETSI pour l'Europe)
- Associations d'industriels (GSMA pour les opérateurs)

- Equipementiers : Nokia, Huawei, Ericson, ...
- Electroniciens : Qualcom, Broadcom, Intel, ...
- Opérateurs : Orange, Verizon, Vodafone, ...
- Fournisseurs de services : Google, Facebook, Amazon, Netflix, ...

Et la 6G : 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 Environnment empowered by RISs : state of the art and the road ahead, Jnl of Sel. Areas in Coms, Nov. 2020