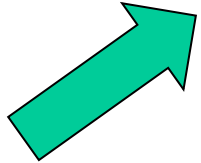


Evolution des télécom



■ Introduction

- Telecom et complexité
- Quelques principes de base

■ Evolution des réseaux

■ Le cellulaire

- Une complication au carré
- La 5G: évolution ou révolution ?

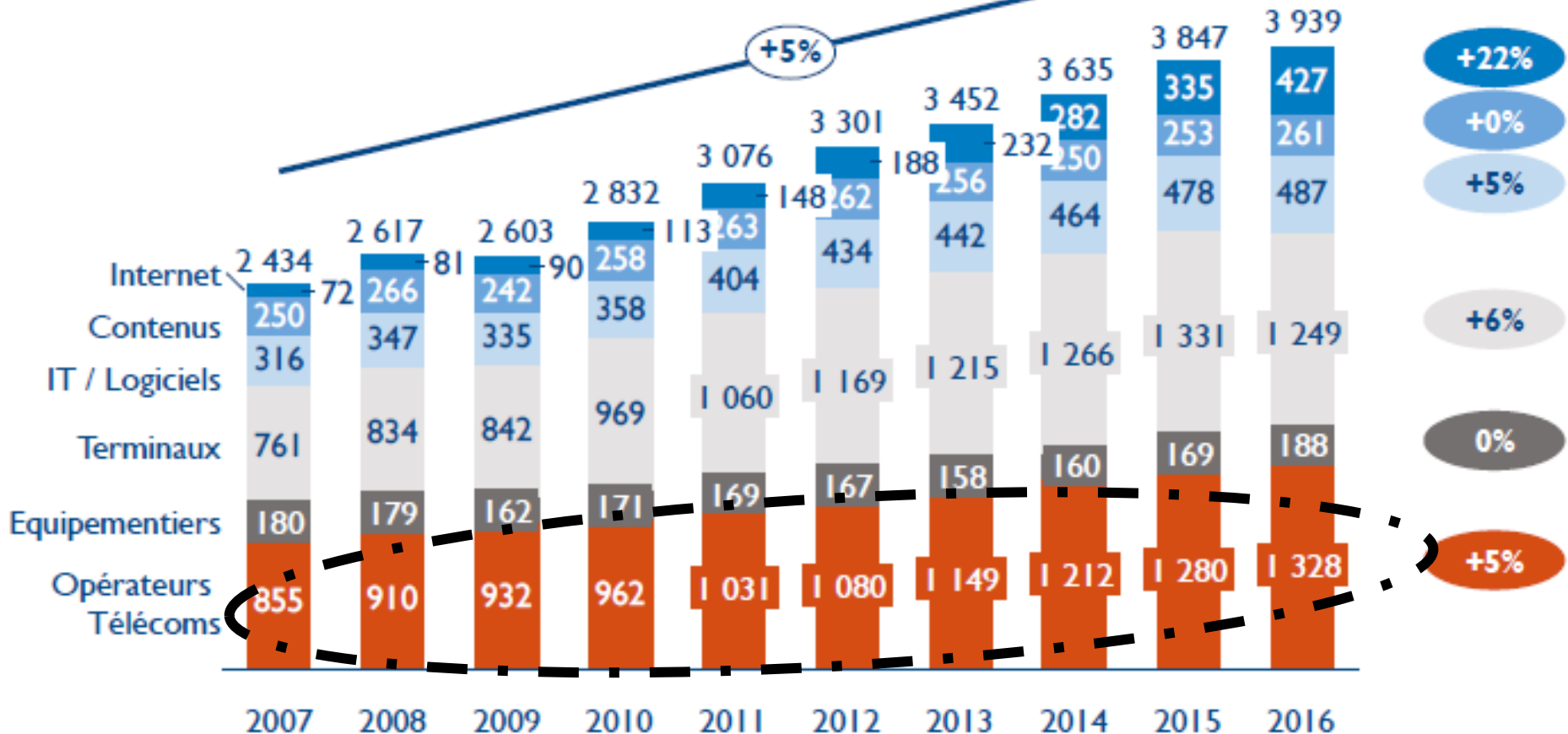
Glossaire

SIGLE	DEFINITION	TELECOM		INTERNET	
		TECH	ORG	TECH	ORG
3GPP	3rd Generation Partnership Project		X		
AS	Autonomous System (réseau composant Internet)			X	
BGP	Border Gateway Protocol, routage sur Internet entre AS			X	
CDMA	Code Division Multiple Access	X			
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (Ethernet)			X	
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol			X	
ETSI	European Telecom Standard Institute		X		
FDM/FDMA	Frequency Division Multiplexing/Access	X			
FTTH	Fiber To The Home	X			
GPRS	General Packet Radio Service, service IP en GSM	X			
HLR	Home Location Register	X			
IANA	Internet Assigned Numbers Authority, Département de l'ICANN				X
ICANN	Internet Corporation for Assigned Names and numbers				X
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers				X
IMS	IP multimedia subsystem, architecture de téléphonie sur TCP/IP	X			
IMSI	International Mobile Subscriber Identity (mobiles)	X			
MAC	Media Address Control (adresse physique Ethernet et WiFi)			X	
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (4G, 5G, ADSL)	X			
RIR	Regional Internet Registry (gestion des Adresses IP et N° AS)				X
RNIS (ISDN)	Réseau Numérique à Intégration de Service	X			
SS7	Signaling System #7, protocole de signalisation dans le RNIS et le GSM	X			
TCP/IP	Transport Control Protocol/Internet Protocol			X	
TDM, TDMA	Time Division Multiplexing/Multiple Access	X			
TTL	Time To Live, Nombre maximum de routeurs (<255) traversant IP			X	
UIT-R	Division de l'UIT traitant des radiocommunications (anciennement CCIR)		X		
UIT-T	Division de l'UIT traitant de la normalisation (anciennement CCITT)		X		
VOIP	Voice Over IP, téléphonie sur un réseau IP	X		X	
WAP	Wireless Application Protocol, version primitive de WEB sur GSM	X			
WDM	Wavelength Division Multiplexing	X			
WiFi	Wireless Ethernet Compatibility Alliance			X	
X25	"Norme CCITT" (1976) pour la commutation de paquets	X			

Ecosystème numérique mondial

Revenu mondial en G€

TCAM
2007-2016



Source: Fédération Française des Télécom et

Philippe Picard, le 1^{er} octobre 2018....

Arthur D Little

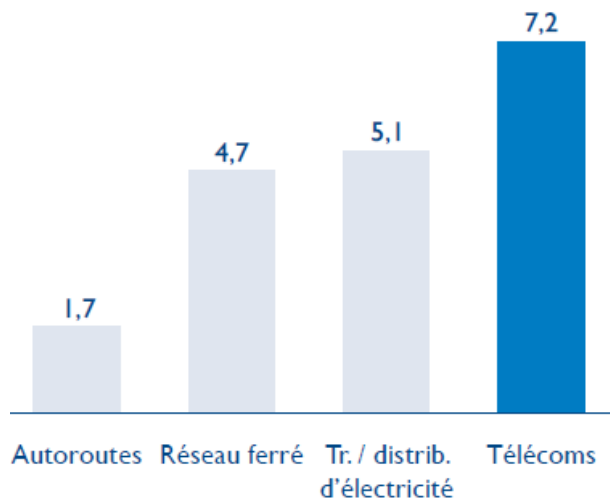
Page 3

Poids économique des télécom (France)

Des investissements toujours plus élevés

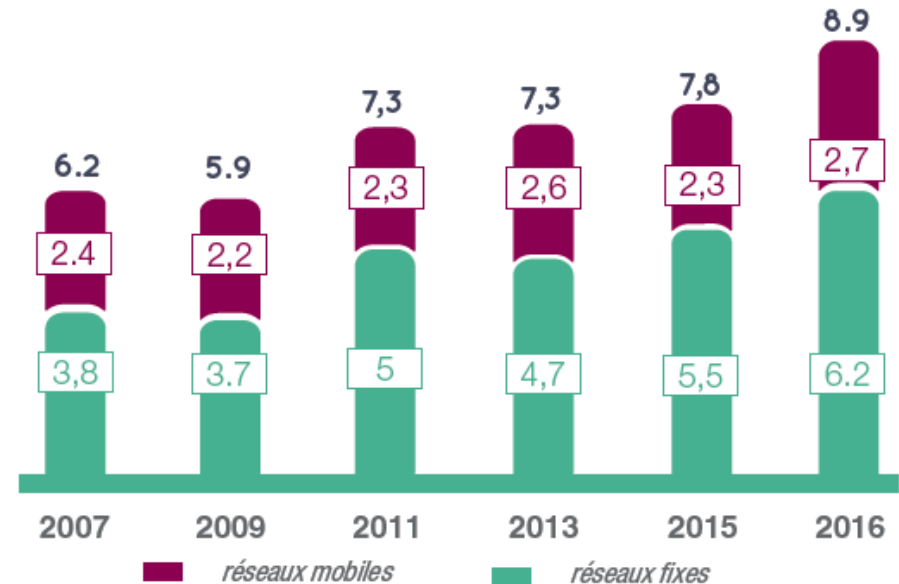
71 milliards d'euros investis entre 2007 et 2016

+7 milliards avec l'acquisition des fréquences



INVESTISSEMENTS DES OPÉRATEURS TÉLÉCOMS*

France, 2007-2016, milliards d'euros



*Investissement hors achats de fréquences mobiles

Source : ARCEP, analyse Arthur D. Little

Télécom: les plus grands investisseurs des infrastructures de réseau

Source: Fédération Française des Télécom et

Arthur D Little

Télécom, systèmes complexes ?

■ Oui:

- Réseaux complexes: topologie émergente, auto-organisation, routage auto adaptatif**
- Intrication de niveaux de complication (par ex. mobiles: réseau backbone / cellules radio)**
- Sélection darwinienne rapide des technologies, « road map » compliquées et vieillissement entropique**
- Vulnérabilité à la cybercriminalité**

■ Non:

- Systèmes compliqués mais maîtrisables**
- Conception humaine, donc compréhensible**

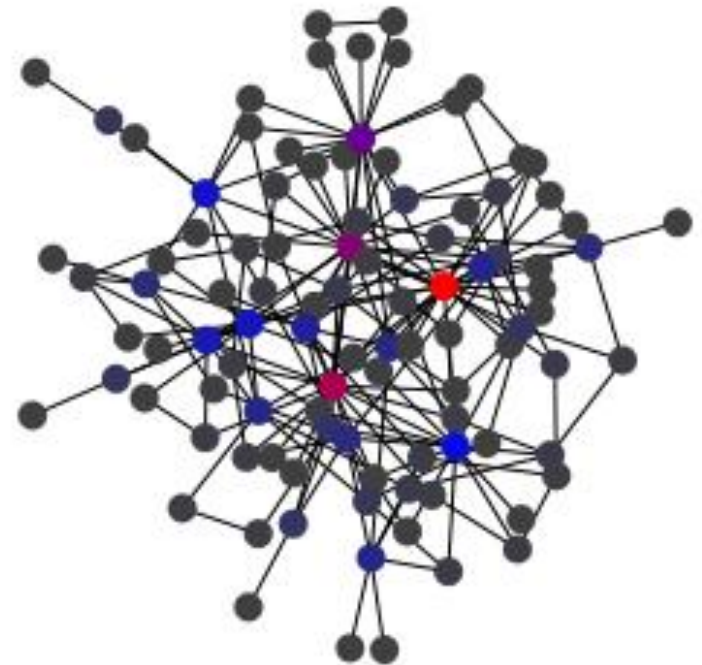
Les grands graphes de terrain

Les grands graphes de terrain ont le plus souvent des propriétés remarquables :

Faible densité +

1. Distribution des degrés en loi de puissance ;
2. Propriété du petit monde ;
3. Structure fractale (ou encore dite sans échelle) ;

Ces 3 propriétés liées
s'appliquent à de nombreux cas

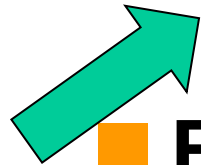


Evolution des télécom

■ Introduction

- Telecom et complexité

- Quelques principes de base



■ Evolution des réseaux

■ Le cellulaire

- Une complication au carré

- La 5G: évolution ou révolution ?

Fonctions génériques des télécom

- **Fonctionnalités à plusieurs dimensions:**
 - Transmission selon Maxwell : cuivre, fibre, radio (en gestation, la téléportation quantique)
 - Multiplexage (partage d'un canal de transmission)
 - FDM: en fréquence (ou en longueur d'onde optique WDM)
 - TDM: temporel (fixe ou statistique)
 - Aiguillage : **commutation** ou **routage** associés à un plan de numérotation ou d'adressage
 - Accès multiple: réseaux locaux, cellules radio
 - Contrôle de flux et de congestion
- **Influence croissante des technologies issues de la culture informatique et d'internet**

Les filières culturelles

- Jusqu'aux années 1980, la **constellation AT&T** (Bell Lab, Western Electric) dominait la culture et la techno des télécom (y compris le cellulaire avec MOTOROLA)
- Un changement majeur a été amorcé avec le projet de **réseau ARPA**, puis **Internet** et la technologie TCP/IP.
- CISCO est devenu le leader mondial des équipementiers télécom et a inspiré de nombreuses architectures (MPLS, SIP pour la VOIP)
- La culture réseaux locaux a été initiée par les « californiens » (PARC) et longtemps dominée par 3COM
- L'influence culturelle des Européens a été limitée. Leur plus belle réussite contemporaine fut le GSM qui a permis un certain leadership industriel avec NOKIA et ERICSSON. L'influence des Européens s'est atténuée progressivement

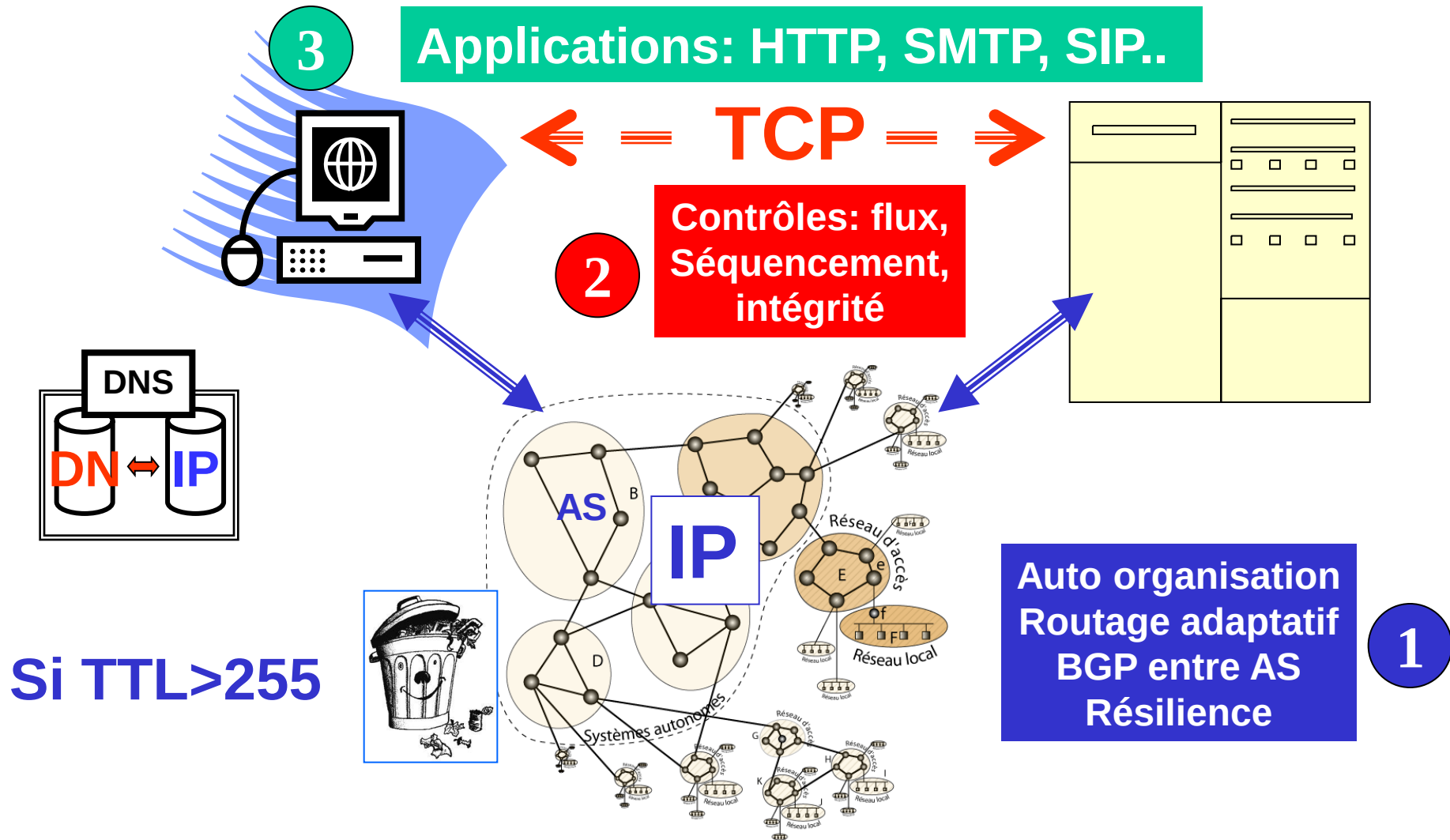
Gestion mondiale des biens communs

	TELECOM	INTERNET	IEEE
Spectre Hertzien	UIT-R		IEEE 802
Adressage, Domaines	UIT-T	ICANN, RIR, IANA	Adresses MAC
Normes	UIT-T, ETSI, 3GPP	IAB IETF	Ethernet, WIFI, WIMAX

Plusieurs pouvoirs de gestion des biens communs:

- L'**UIT**, émanation de l'ONU et ses prolongements régionaux
- Le monde **Internet** à domination américaine:
 - Le domaine technique (IAB, IETF)
 - Le nommage (adresse IP et N° d'A.S.) et les noms de domaines
- L'**IEEE**, pour les réseaux locaux (Ethernet, WiFi, etc)
- Les applications populaires sont propriétaires (Tweet, Facebook, WhatsApp, WeChat, Skype, etc...)

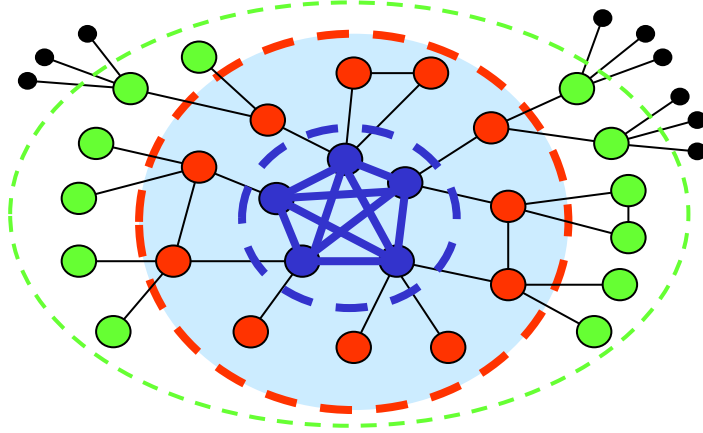
Le modèle TCP/IP (Internet)



Topologie planifiée vs autoorganisée

Réseau traditionnel

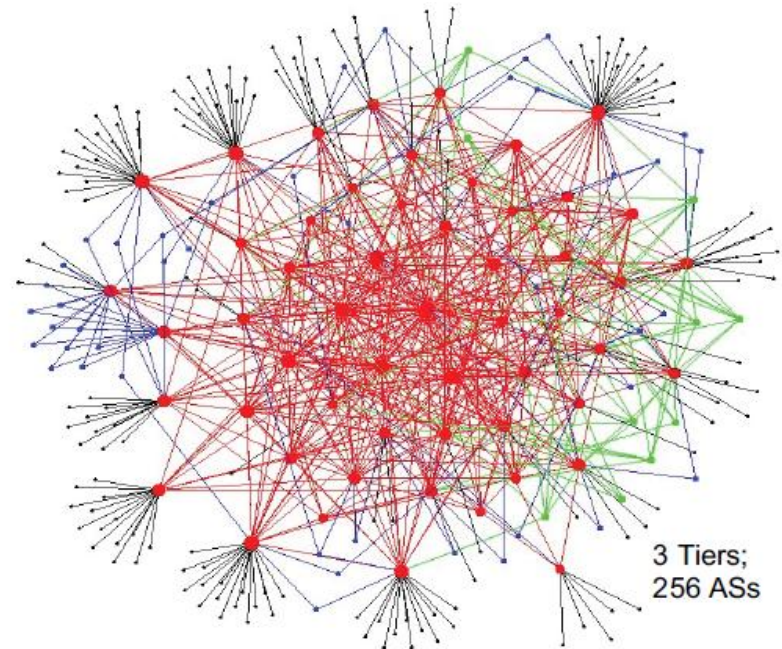
La partie non hiérarchique du
graphe est limitée à
 ≈ 50 nœuds & arêtes



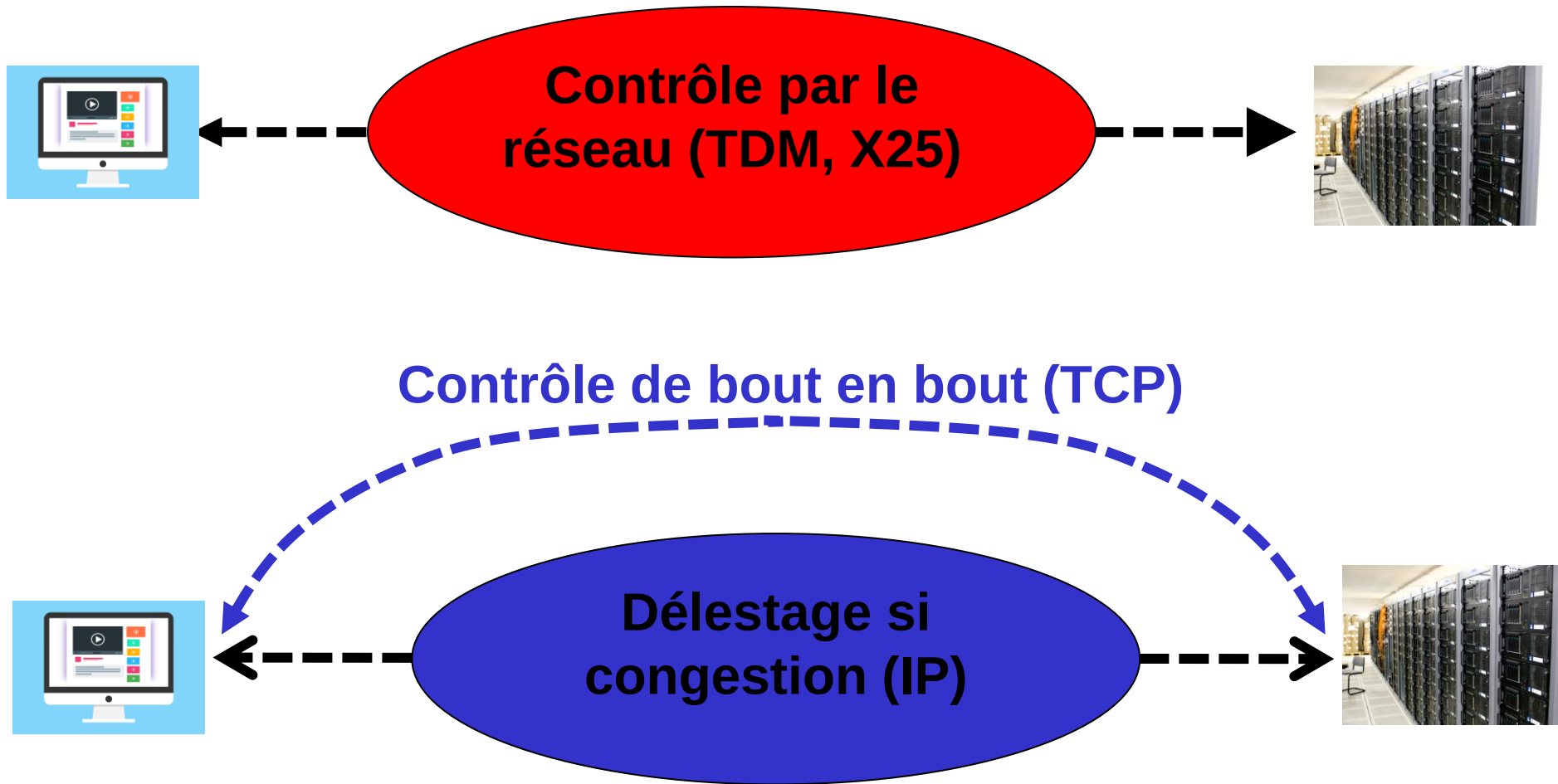
5	CTP, transit principal
39	CTS, transit secondaire
430	CAA, autonomie d'acheminement
13 000	CL, centres locaux

Internet

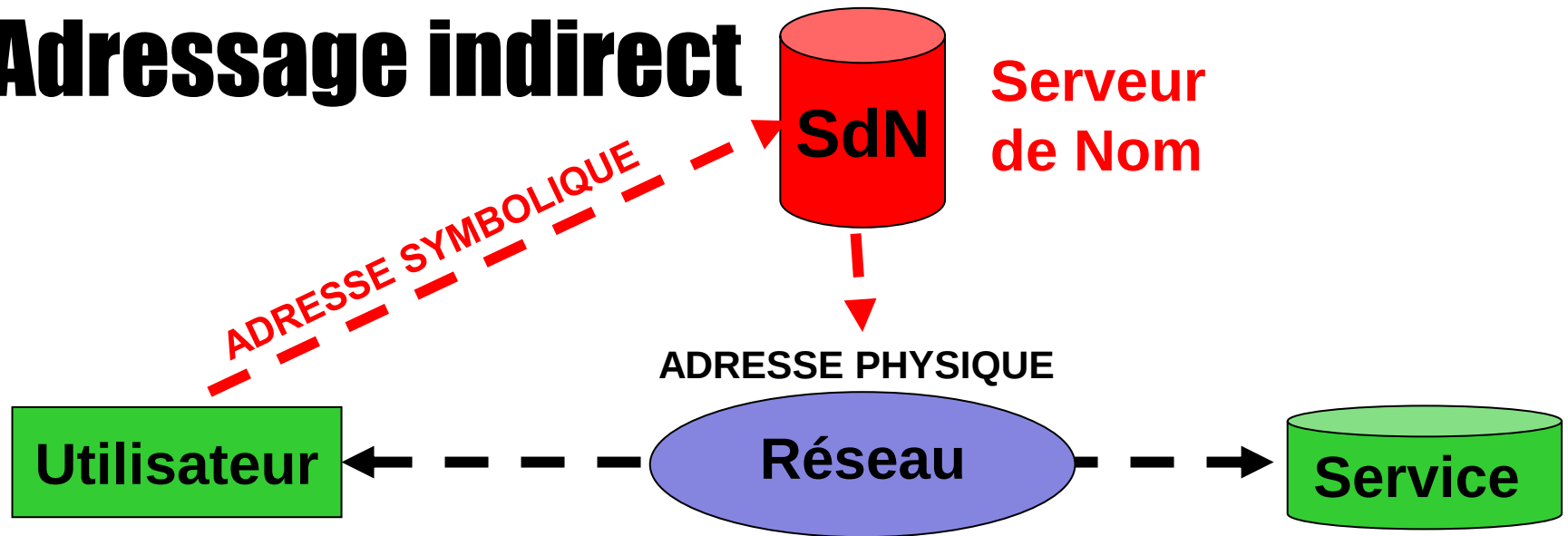
$\approx 40\,000$ Autonomous Systems
Table BGP $\approx 600\,000$



Contrôle de flux et de congestion



Adressage indirect



Exemples:

- Nom de Domaine → Adresse IP (serveur DNS)
- N° IMSI → N° de cellule mobile (serveur HLR)
- IP → Adresse MAC (serveur DHCP)

Avantages et inconvénients de l'adressage indirect

- + Simplicité, gestion de mobilité
- Centralisation et vulnérabilité

Evolution des télécom

■ Introduction

- Telecom et complexité

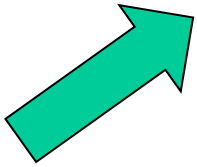
- Quelques principes de base

■ Evolution des réseaux

■ Le cellulaire

- Une complication au carré

- La 5G: évolution ou révolution ?



3 grandes phases

3

2

1

Analogique
(transmission, commut.)

Numérique TDM
FO longue distance

Numérique IP,
IMS, FTTH

Mobile Cellulaire

1G

2G

3G

4G

5G

Téléphones fixes

Intelligence des terminaux

Mobiles

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

Virtualisation croissante du réseau

- **SDN:** « *Software Defined network* »

séparation du matériel et du logiciel,
dont on peut gérer séparément les
cycles de vie



gestion du réseau à distance
et matériel banalisé facile à acheter

- **NFV:** « *Network Function Virtualization* »

automatisation de la gestion du réseau,
grâce à une "orchestration" centralisée



efficacité et rapidité plus grandes
et plus grande réactivité pour
améliorer la qualité d'expérience

➔ « Network Slicing »

Evolution des télécom

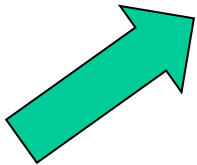
■ Introduction

- Telecom et complexité
- Quelques principes de base

■ Evolution des réseaux

■ Le cellulaire

- Une complication au carré
- La 5G: évolution ou révolution ?



Le téléphone cellulaire



So, Where are we exactly?

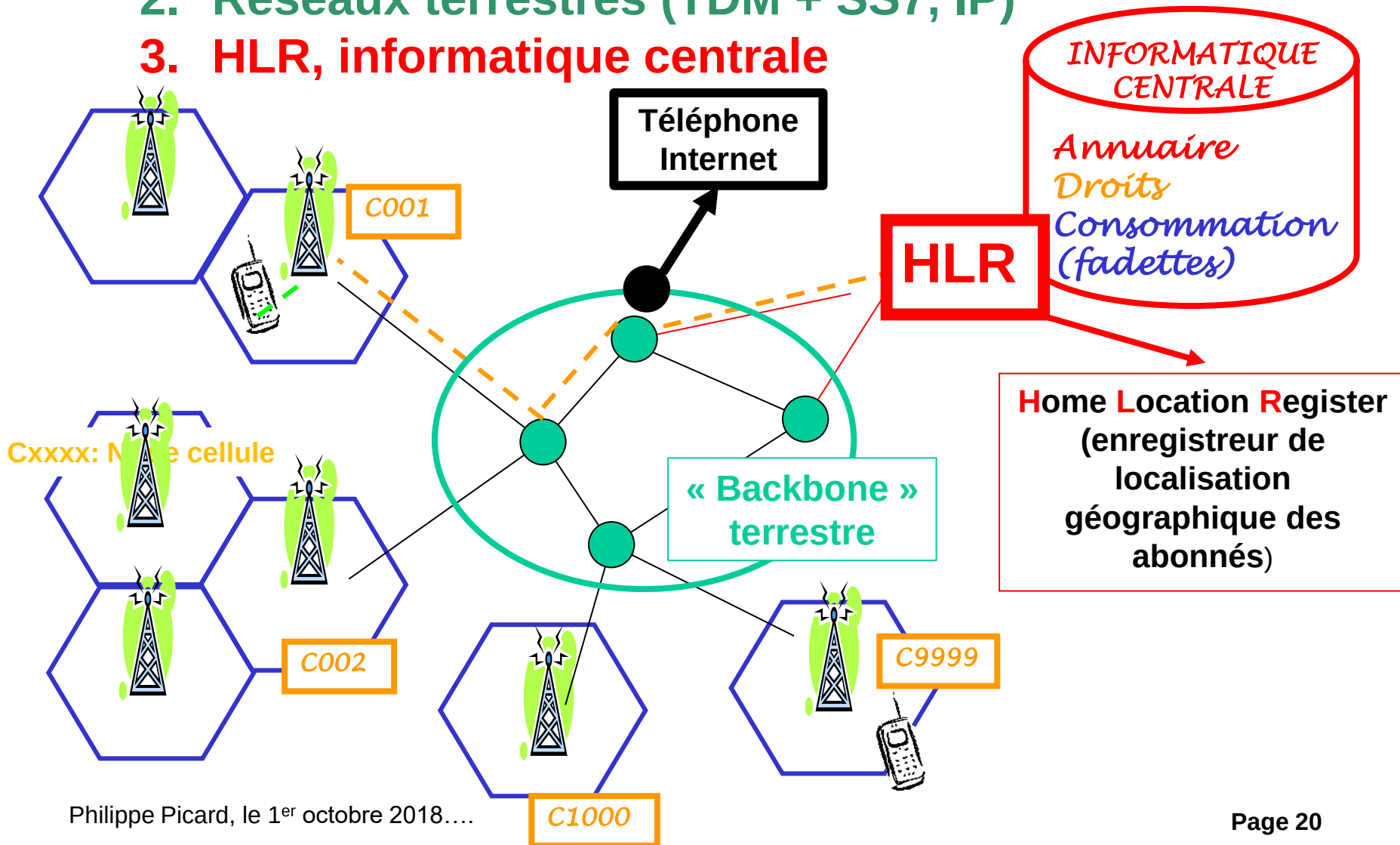
Problèmes essentiels:

1. Spectre hertzien limité => structure cellulaire
2. Accès multiple par cellule
3. Gestion de la mobilité:
 - Identification
 - Localisation
 - « Hand Over »
 - « Roaming »
4. Rythme d'introduction et coexistence des versions

Complicqué ou complexe ?

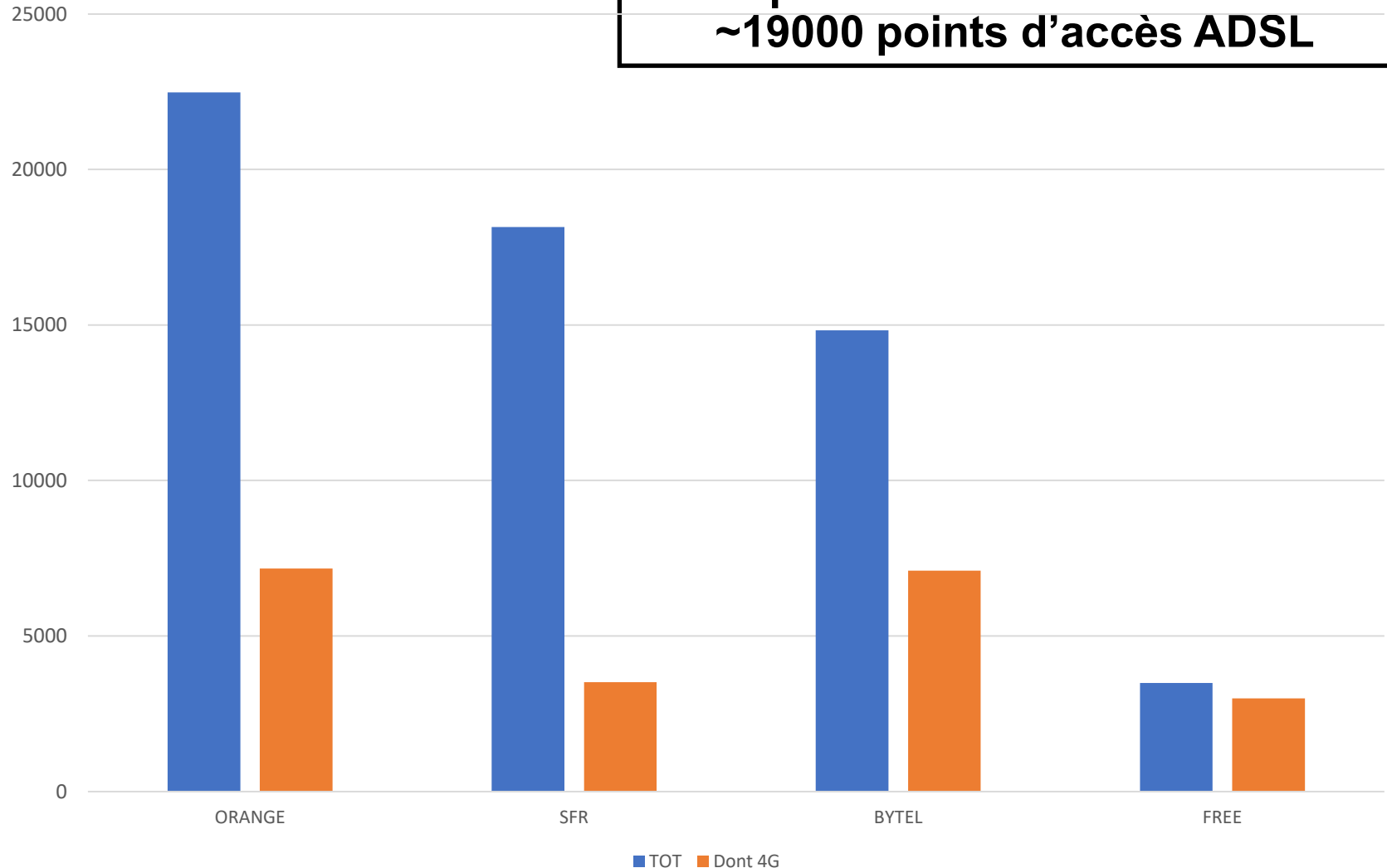
Cellulaire: le modèle générique

1. Stations de base dans cellules radio
2. Réseaux terrestres (TDM + SS7, IP)
3. HLR, informatique centrale



Densité des cellules en France

A comparer avec la densité du fixe:
~19000 points d'accès ADSL



Evolution des télécom

■ Introduction

- Telecom et complexité

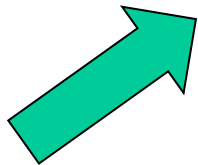
- Quelques principes de base

■ Evolution des réseaux

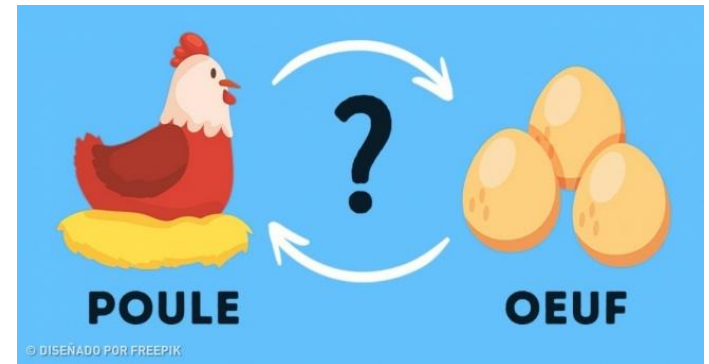
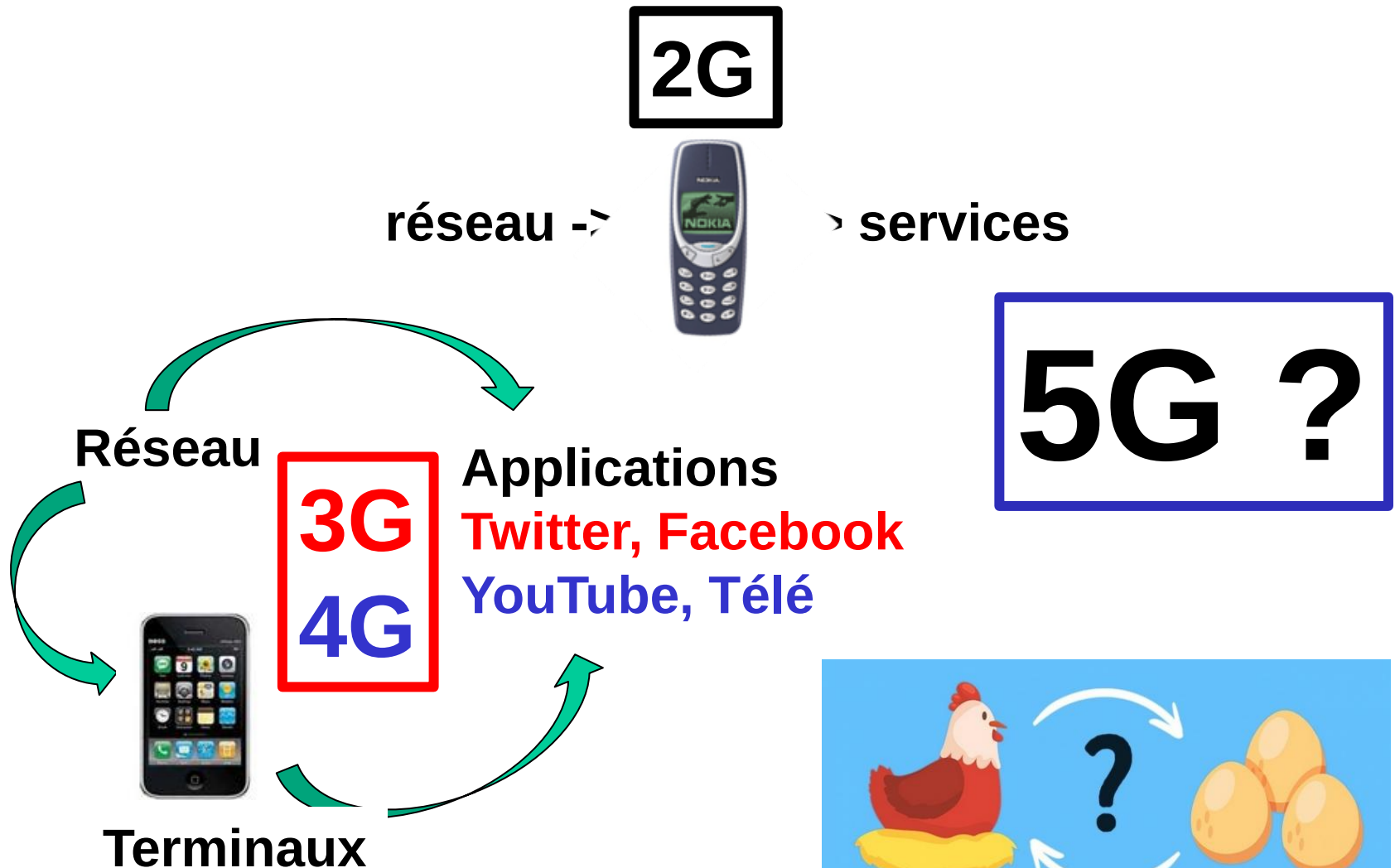
■ Le cellulaire

- Une complication au carré

- La 5G: évolution ou révolution ?



Ecosystème réseaux/terminaux/applications



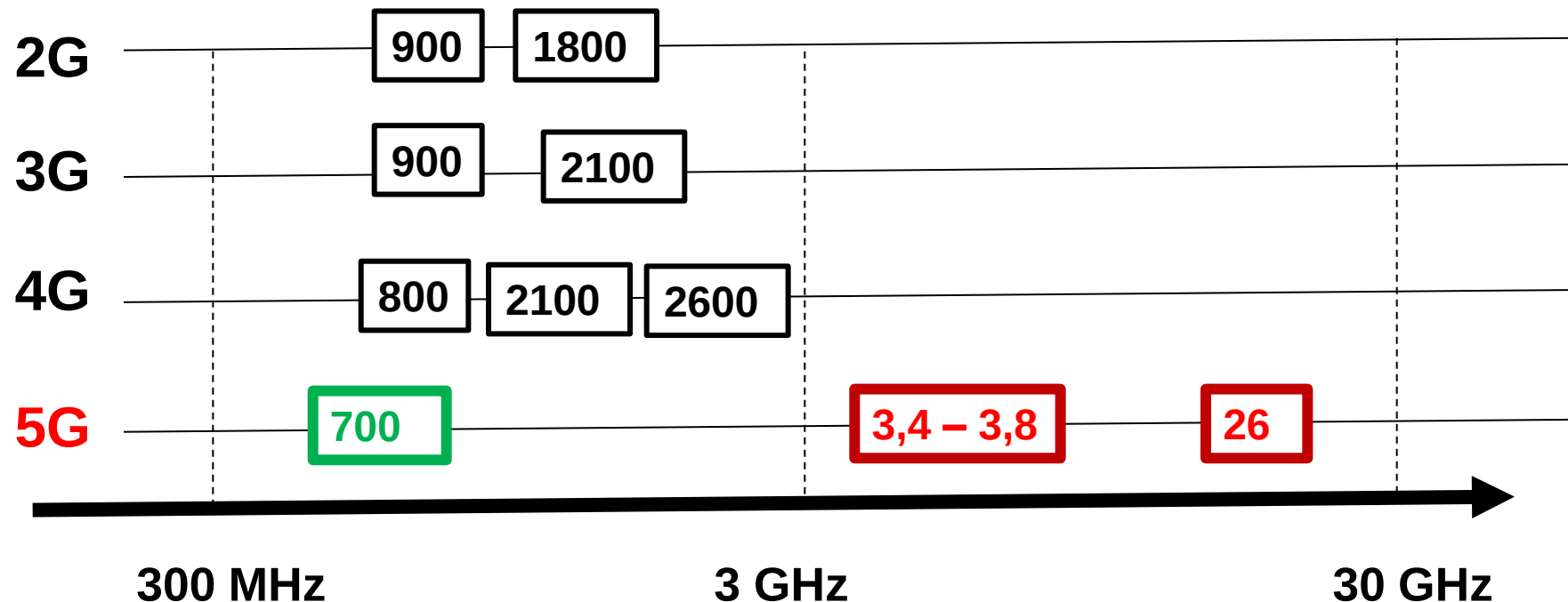
Les évolutions progressives vers la 5G

GENERATION	1G	2G	3G	4G	5G
TECHNO RADIO	FDM	FDM/TDM	CDMA	OFDM	
DEBIT DATA	NA	64 Kb/s	300 Kb/s	20 Mb/s	~Gb/s

VOIX					
SMS					
MAIL					
WEB					
IMAGES ANIMEES					
TELEVISION					



5G: ruptures des fréquences



■ Objectifs:

- Nouvelles capacités de transmission
- Plus grande densité des cellules
- Traiter l'IOT

5 G : objectifs de performances

Performances maxi 5G **5G/4G**

Débit maximum (20 Gb/s) **x 20**

Efficacité spectrale **x 3**

Vitesse « handover » (500km/h) **x 1,5**

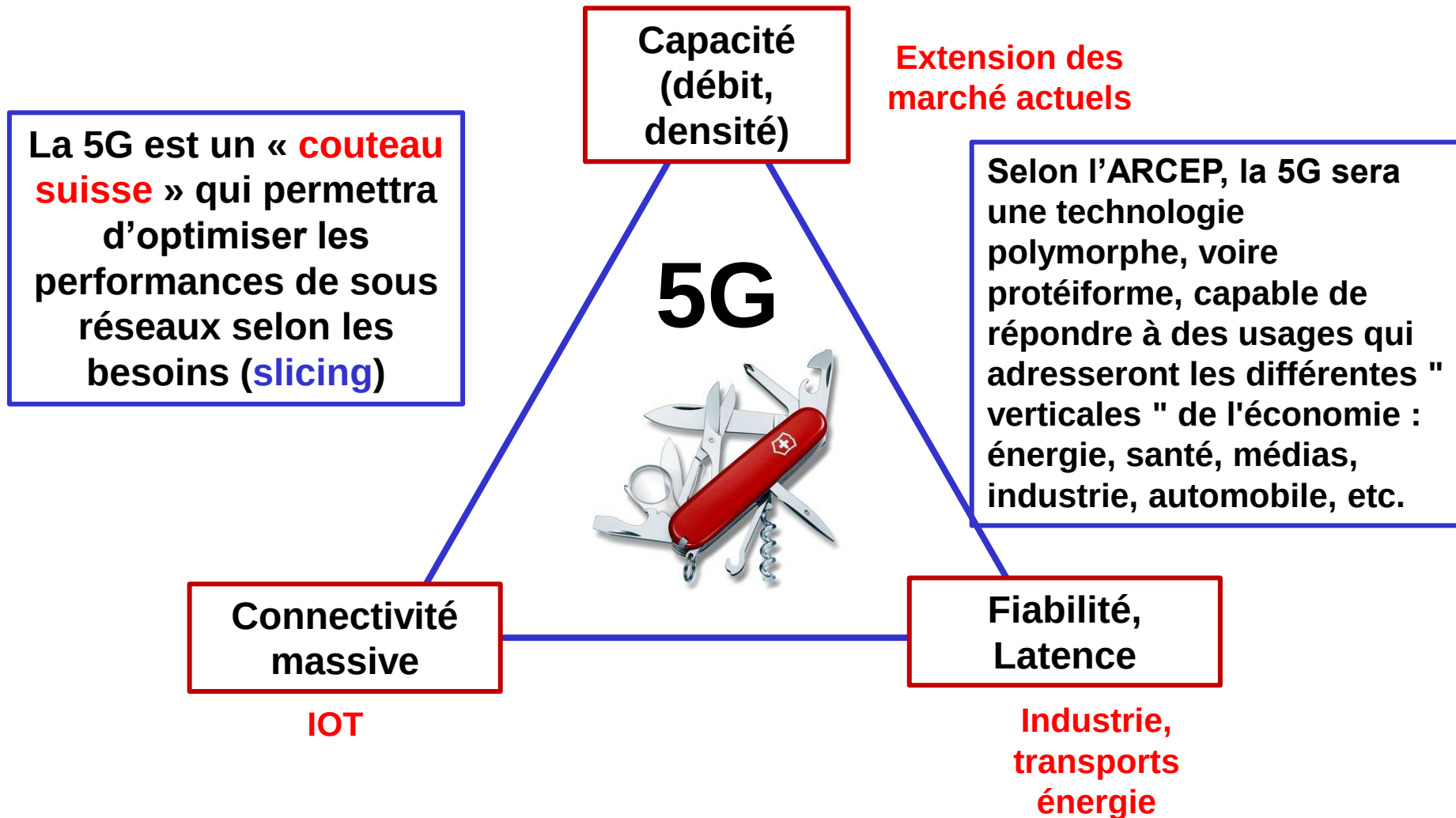
Latence (ms) **/ 10**

Nombre objets par m² (10⁶) **x 10**

+ Disponibilité: 99,999%

Toutes les performances ne pourront pas être atteintes en même temps

5 G : marchés visés multiples



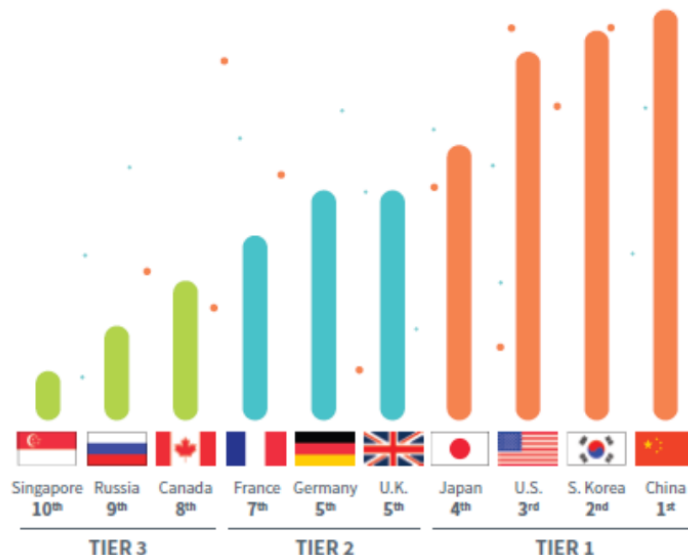
Calendrier 5G en France

2018 Expérimentation et pilotes

2019 Libération progressive des fréquences

2020 Premiers terminaux compatibles, Attribution des fréquences

2025 Couverture des axes de transport principaux



La France dans la course ?

Selon le CTIA, la France est vue dans le 2^{ème} niveau, le podium étant:

1. Chine
2. Corée
3. USA
4. Japon

A retenir

- Les télécom ont dû s'adapter depuis 50 ans à l'addition de **4** facteurs de changement:
 1. L'impact des nouvelles technologies (micro-électronique et « *loi de Moore* », optoélectronique, ingénierie logicielle)
 2. Les changements d'architecture de système: numérisation et TDM, puis révolution de l'IP
 3. Les nouveaux services:
 - Applications internet
 - Mobilité
 4. La dérèglementation
- A comparer avec les autres grands systèmes en réseau (électricité, transports terrestres ou aériens) qui ont, à ce jour, suivi une évolution plus modérée

A retenir

- Les technologies des télécom ont à ce jour été maîtrisées malgré leur complexité apparente grâce à une conception récurive et collective entre opérateurs & industriels (UIT-IMT/3-5GPP)
- La 5G, en cours de gestation, est l'objet d'une planification collective démarrée vers 2015 (système et fréquences).
- Les nouveaux usages se révéleront progressivement mais la 5G se propose d'être en **rupture** par rapport à la continuité 2G/3G/4G avec toute une nouvelles classe d'utilisations à développer (nouvel écosystème)

Pour discussion

- **Question:** interdépendances au sein d'un méga réseau : Réseaux Electrique, Télécom, Internet, Logistique, Transports, Eau, etc. ?
- **Quelques remarques:**
 - Les grands services publics en réseau ont tendance à limiter leur dépendance vis-à-vis des autres réseaux
 - La vulnérabilité est totale pour les échanges entre écosystèmes (pas de « back-up »)
 - La 5G prévoit le « network slicing » pour les applications critiques (vielle notion: GFA, VPN)
 - Distinguer défaillance technique et résistance aux cyber attaques

Réserve et compléments

- Bases scientifiques
- Fréquences
- Internet: peering et transit
- Road Map
- 5G

Références

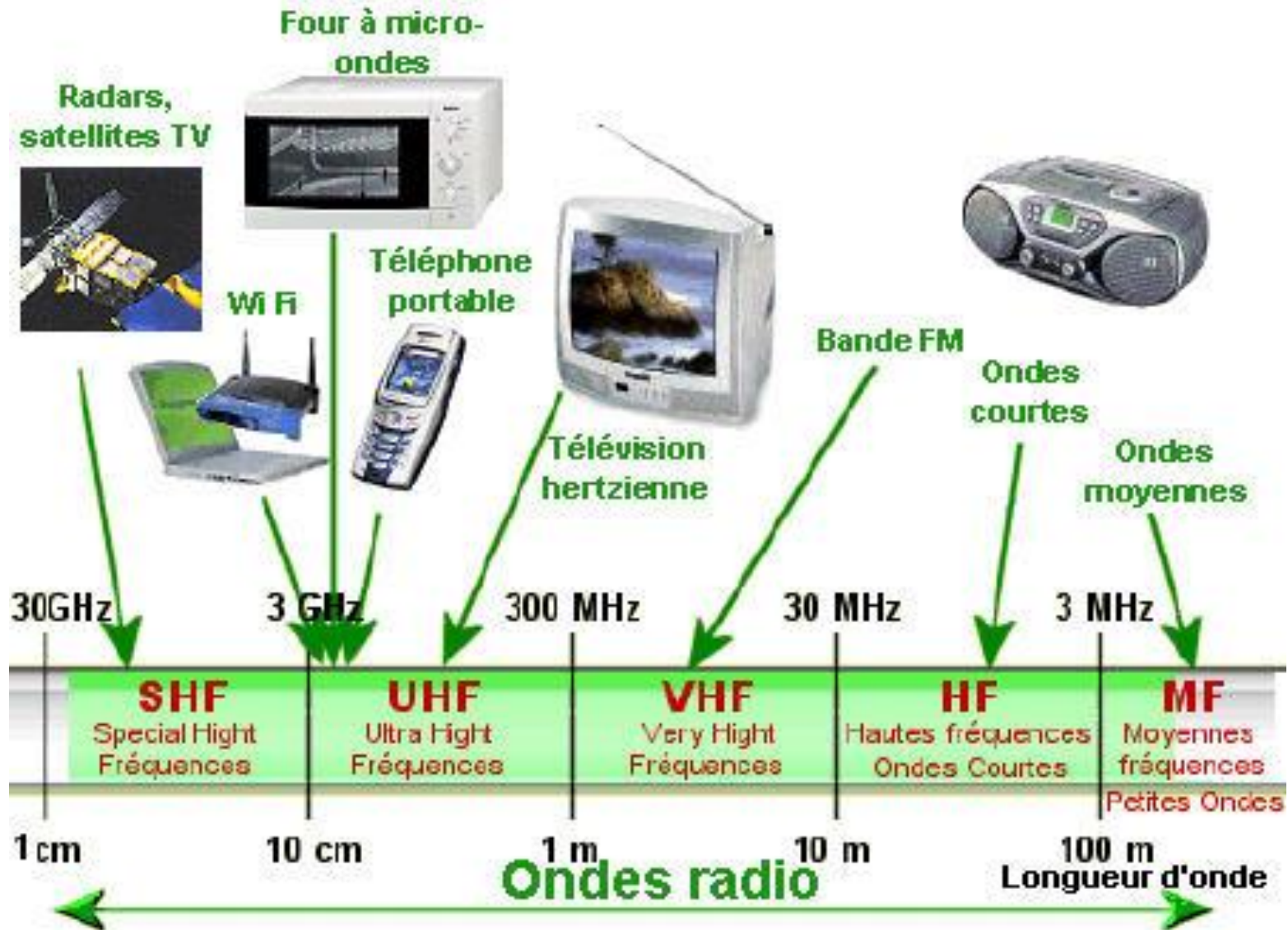
Le site de l'ARCEP est une excellente source d'informations:

- https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-enjeux-5G_mars2017.pdf
- https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1538472894/reprise/dossiers/programme-5G/Feuille_de_route_5G-DEF.pdf

Rappel: bases scientifiques des télécom

- **Physique de Maxwell et Hertz**
- **Math**
- **Théorie de la communication et du signal**
- **Cryptage**
- **Compression**
- **Algorithmique et Informatique théorique**
- **Graphes et réseaux complexes**
- **Modélisation probabiliste**
- **Etc.**

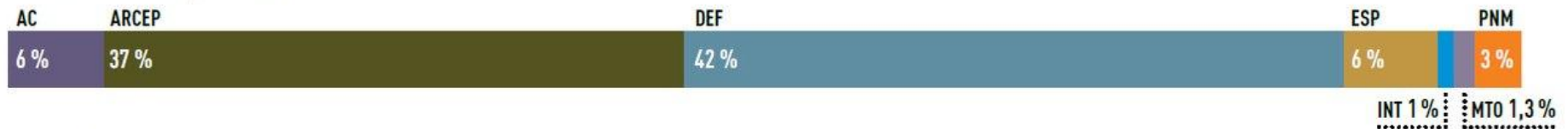
Spectre hertzien: nombreux candidats



Spectre: une ressource rare

■ AC : Aviation civile ■ ARCEP ■ CSA ■ DEF : Défense ■ ESP : Espace ■ INT : Intérieur ■ MTO : Météo ■ RST : Radioastronomie ■ PNM : Port et Navigation Maritime

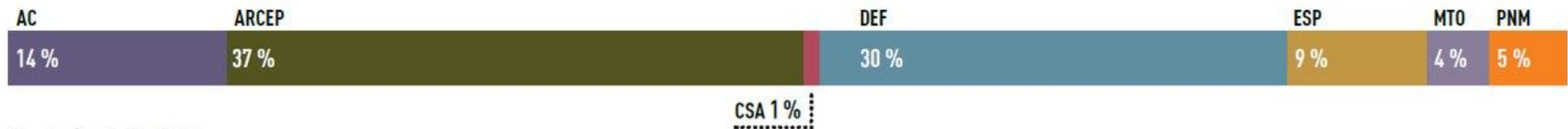
8 kHz à 29,7 MHz



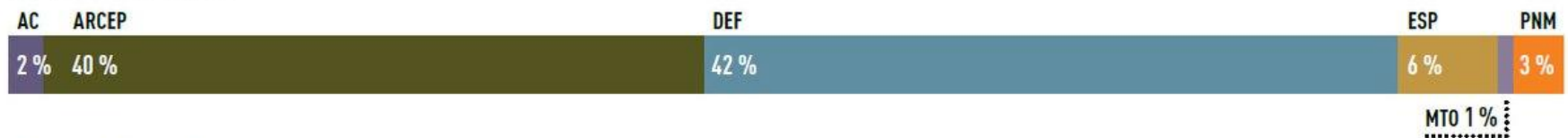
29,7 à 960 MHz



960 MHz à 3,4 GHz



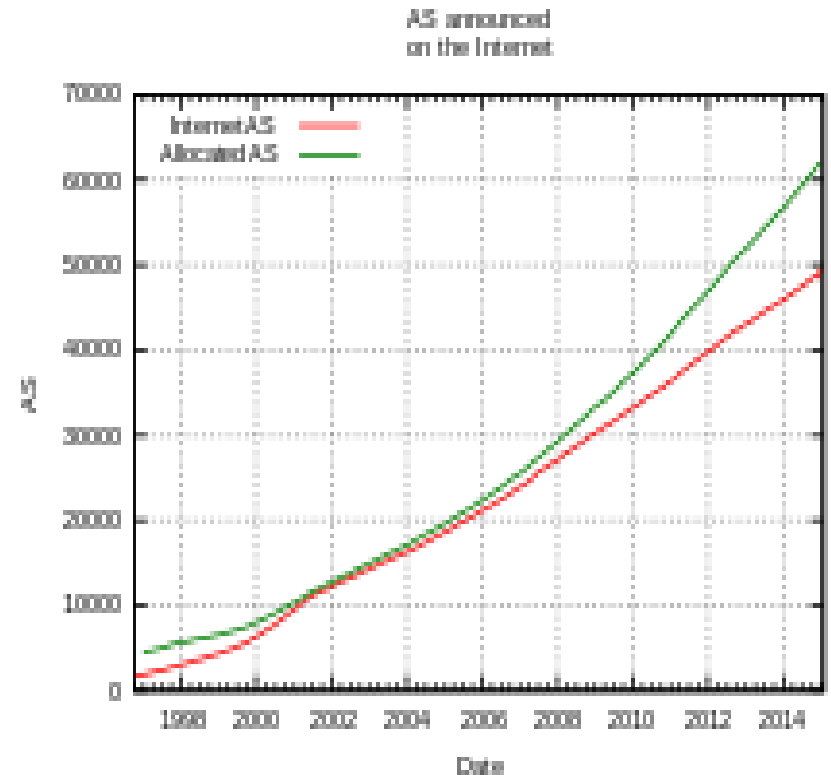
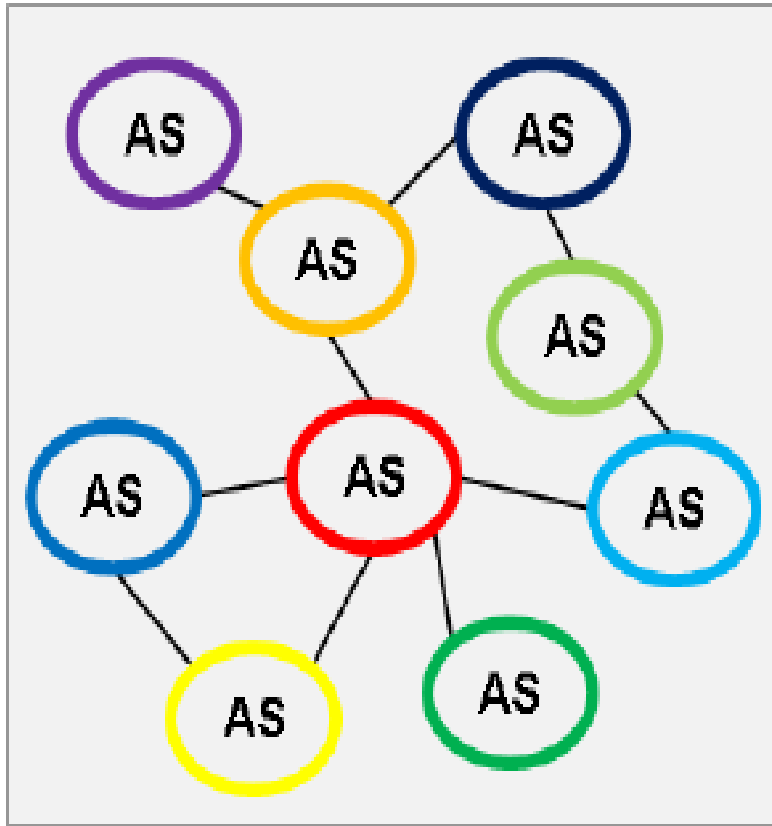
3,4 à 10 GHz



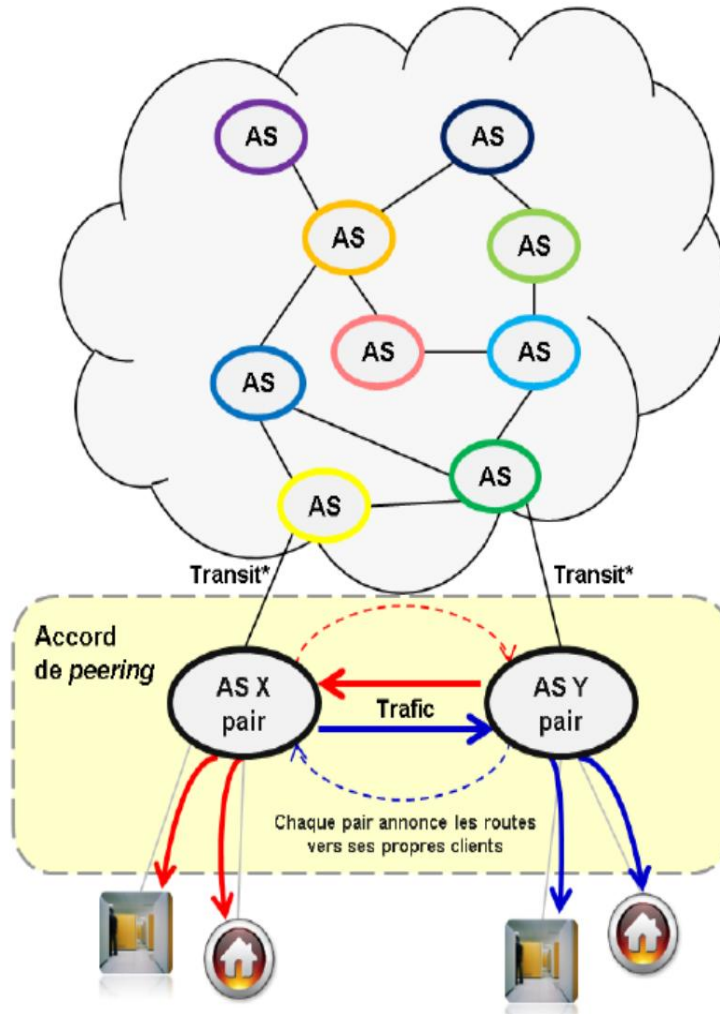
10 à 65 GHz



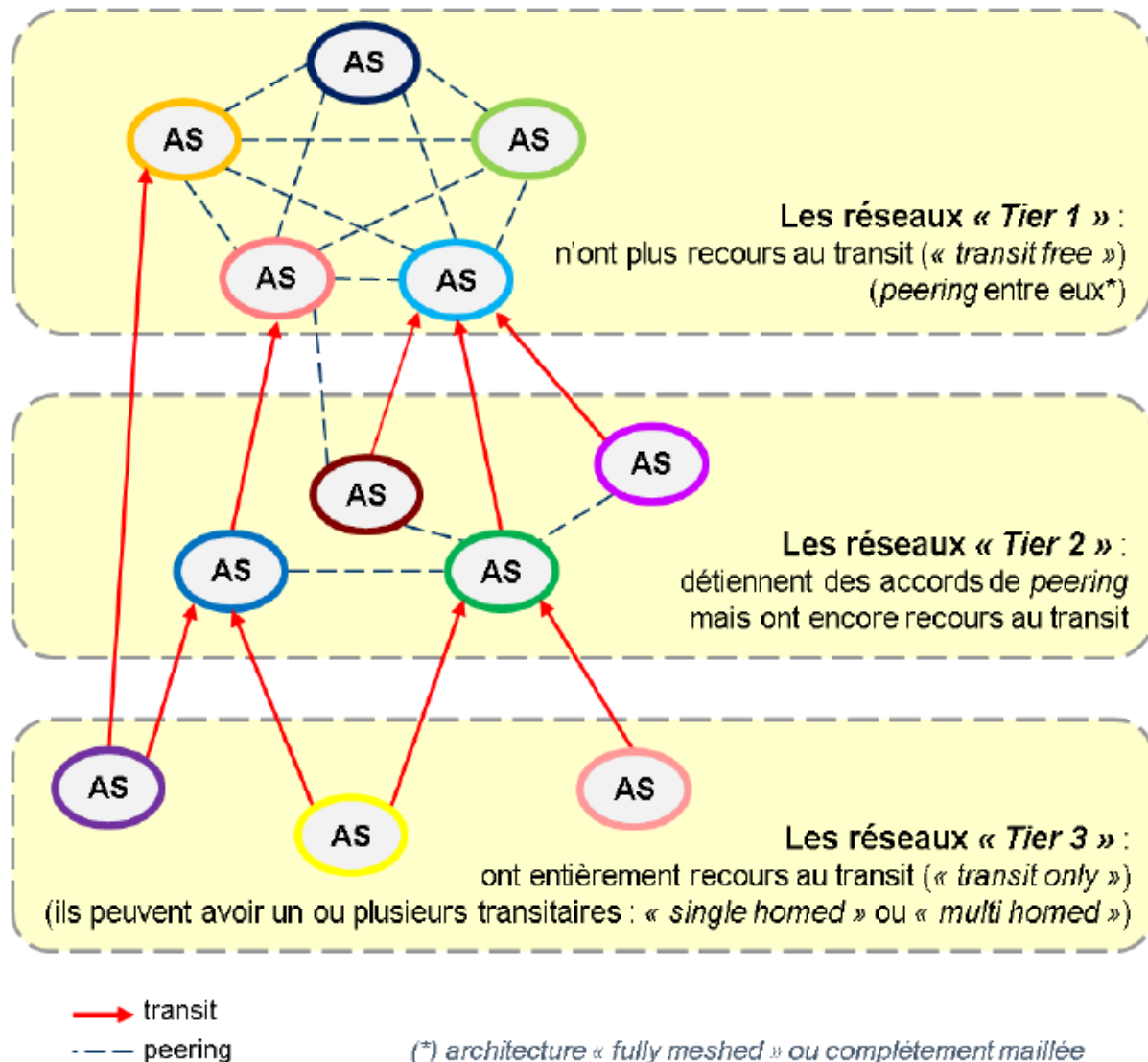
Internet: réseaux de réseaux (les A.S.)



Peering et transit



Hiérarchie des A.S. d'Internet



Accès local multiple

- Nombreux cas concernés (réseaux locaux, cellules des réseaux mobiles)
- Plusieurs principes de partage des ressources (en fréquence, en temporel, en code, déterministe ou aléatoire)

	Fréquence	Temporel	Code
Ethernet, Wifi		CSMA/CD	
2G GSM	AMRF	AMRT	
3G UMTS			CDMA
4G LTE, 5G	OFDM		

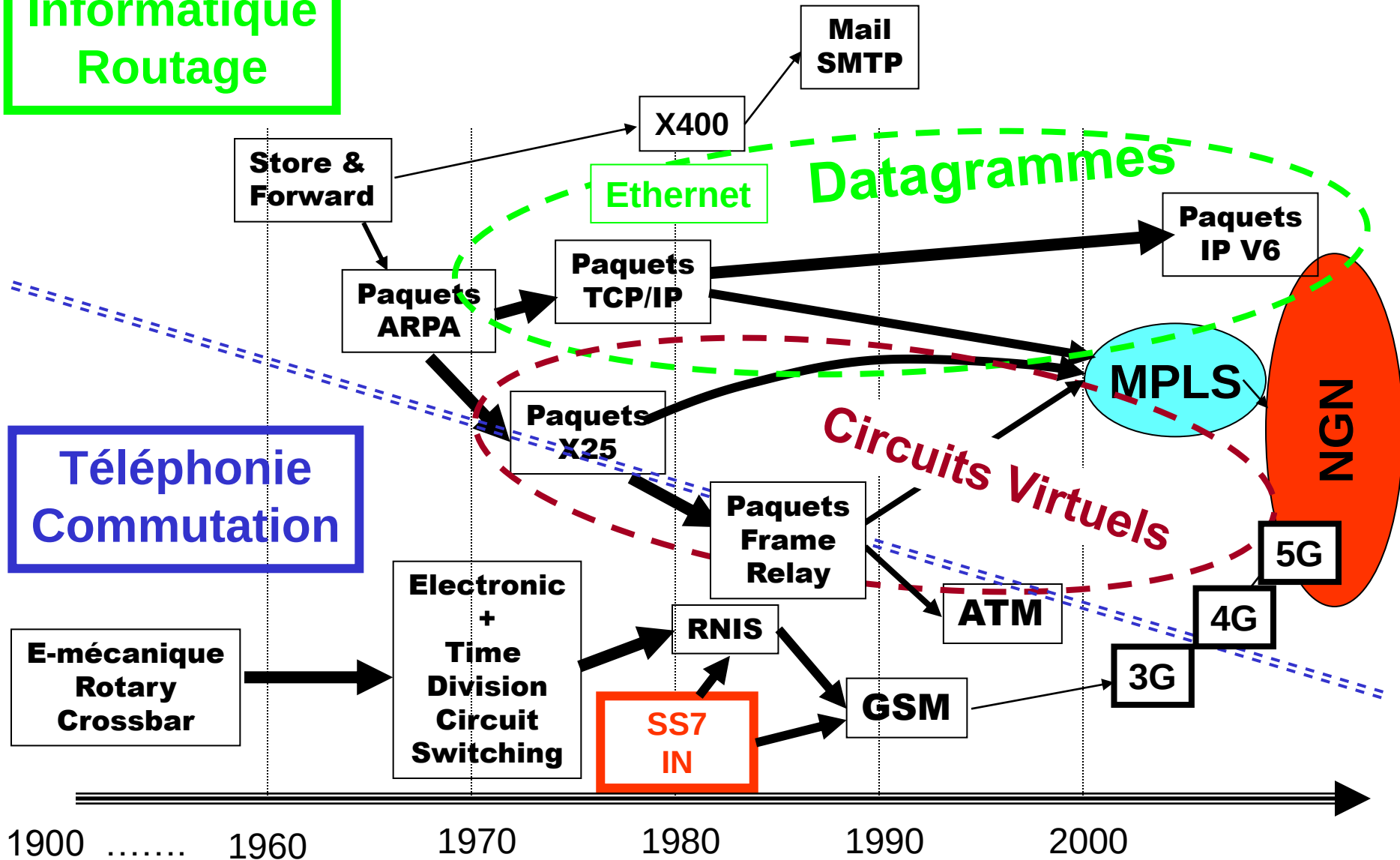
Les 2 Modes: **connecté** / **non connecté**

	Télécom Traditionnelles, Mode connecté	TCP/IP Internet, Mode non connecté
Information Transportée	Canal analogique ou numérique transparent et de bout en bout	Découpage en paquets indépendants (datagrammes)
Aguillage	Commutation de circuits	Routage de proche proche (IP)
Contrôle de flux	A l'accès, piloté par le réseau	De bout en bout par TCP + délestage dans le réseau
Qualité de service	Contrôlée + Principe du service universel	"Best effort", mais gestion des priorités

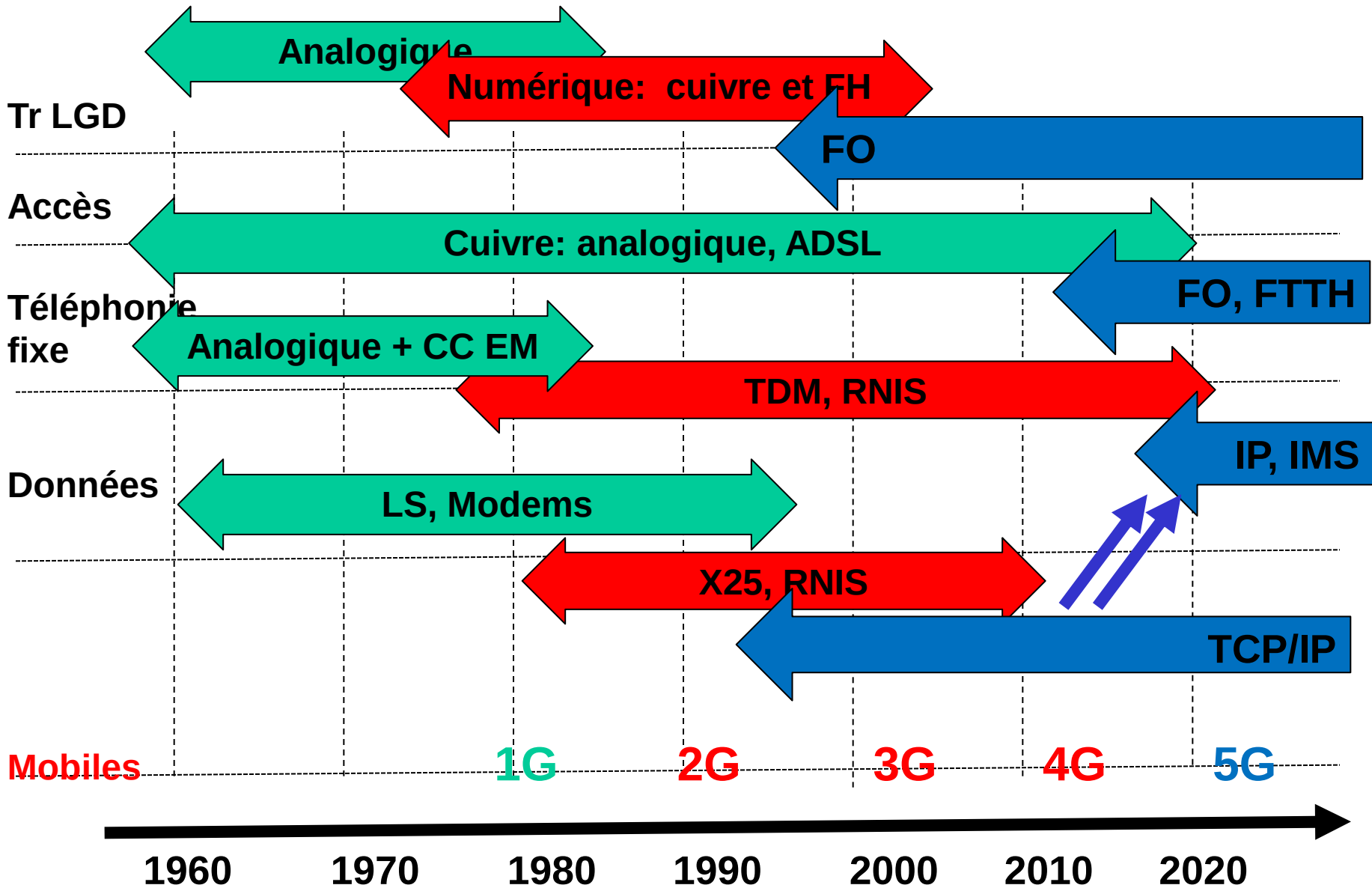
- Le mode **non connecté** s'est progressivement imposé aux Telcos avec plusieurs améliorations techniques (MPLS, IPV6)
- Le problème de congestion est largement traité par l'augmentation de capacité, grâce aux progrès de la technologie (routeurs, fibre optique et générations de mobiles)
- Les fonctions « applicatives » du monde Internet se sont imposées aux TELCO's (téléphonie SIP, Messageries, etc...)

Architecture de réseau : 2 conceptions

Informatique
Routage



Road Map difficile

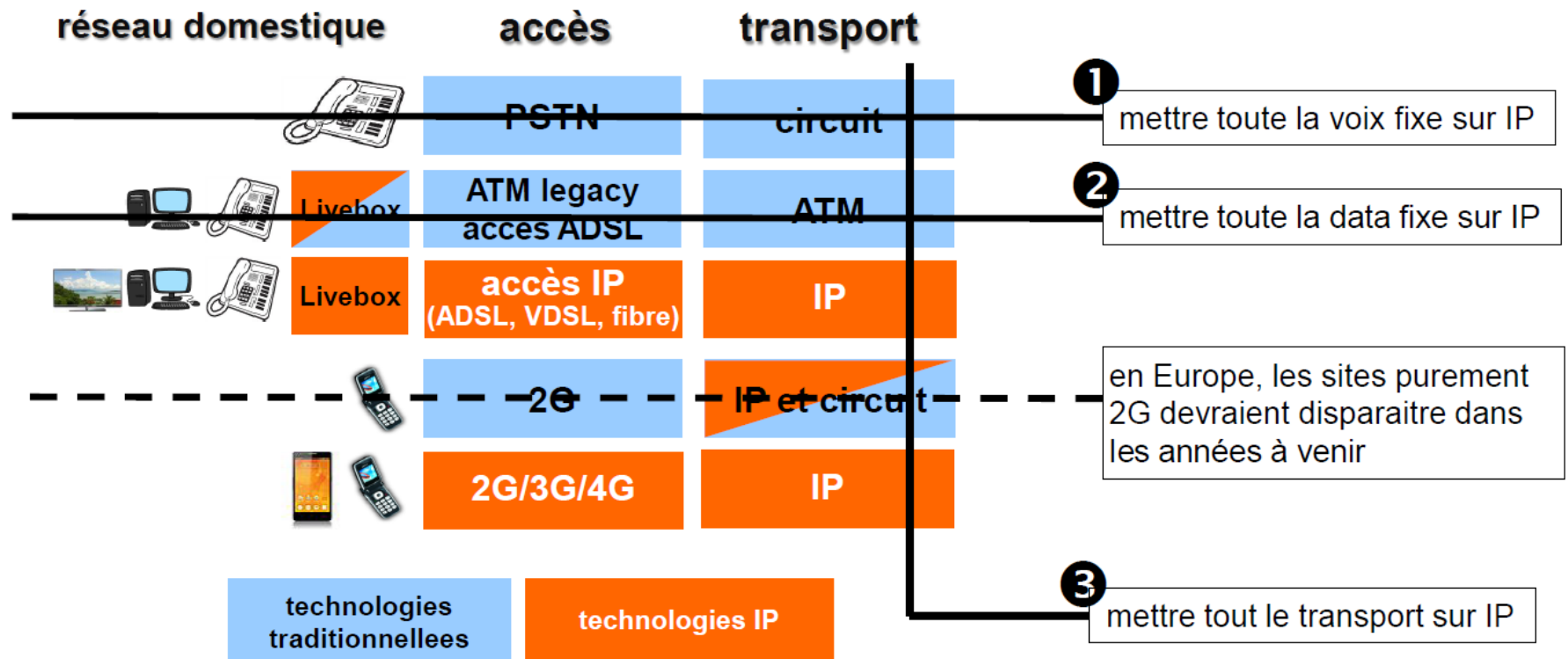


Les générations de mobiles

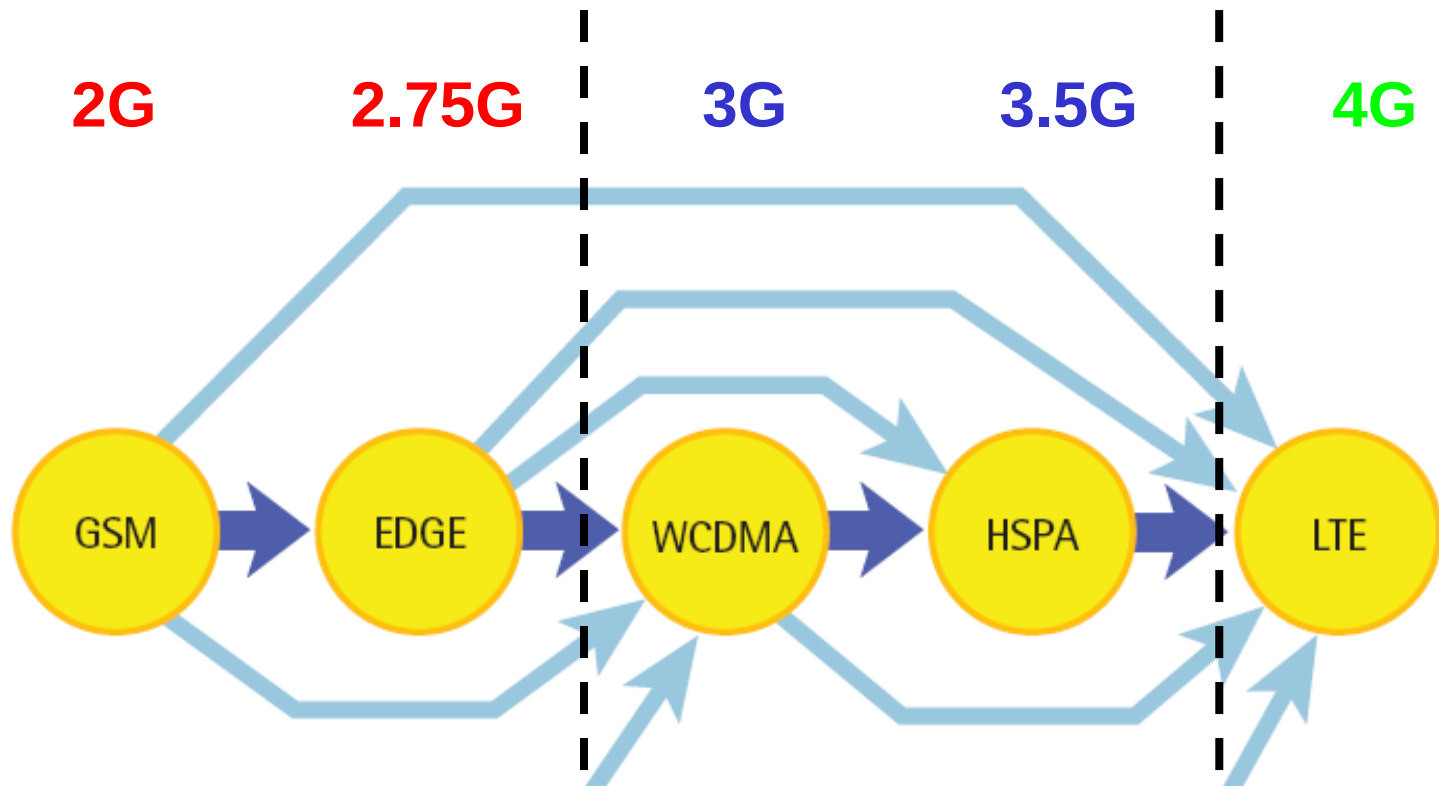
	1978	1990	2000	2015	2020
GENERATION	1G AMPS	2G GSM	3G UMTS	4G LTE	5G
ACCES RADIO	FDM	FDM & TDM	CDMA	OFDM	
CODAGE VOIX	ANALOGIQUE	NUMERIQUE			
BACKBONE VOIX		TDM			IP
DATA	NA	WAP, GPRS IP	IP		
DEBIT DATA		64 Kb/s	300 Kb/s	20 Mb/s	~Gb/s

- Plusieurs générations coexistent => terminaux multimodes
- Evolutions indépendantes: accès radio vs réseau terrestre (**TDM** puis **IP** pour la téléphonie)
- La 5G est totalement intégrée au modèle « **tout IP** »

« road map » de simplification



Les générations de mobiles : 3G, 4G, etc..



Technologie Accès Radio

FDMA + TDMA

CDMA

OFDM

Un processus collectif de conception

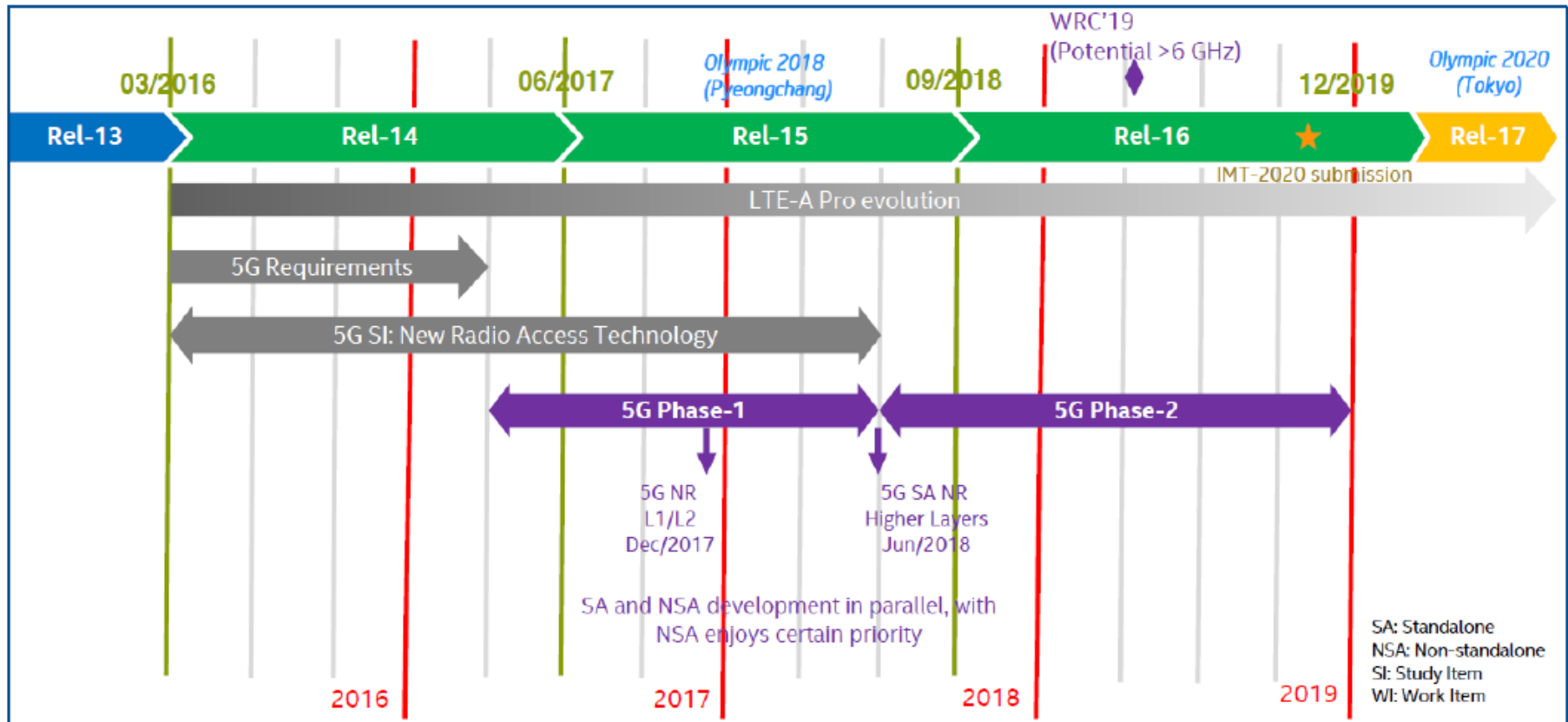
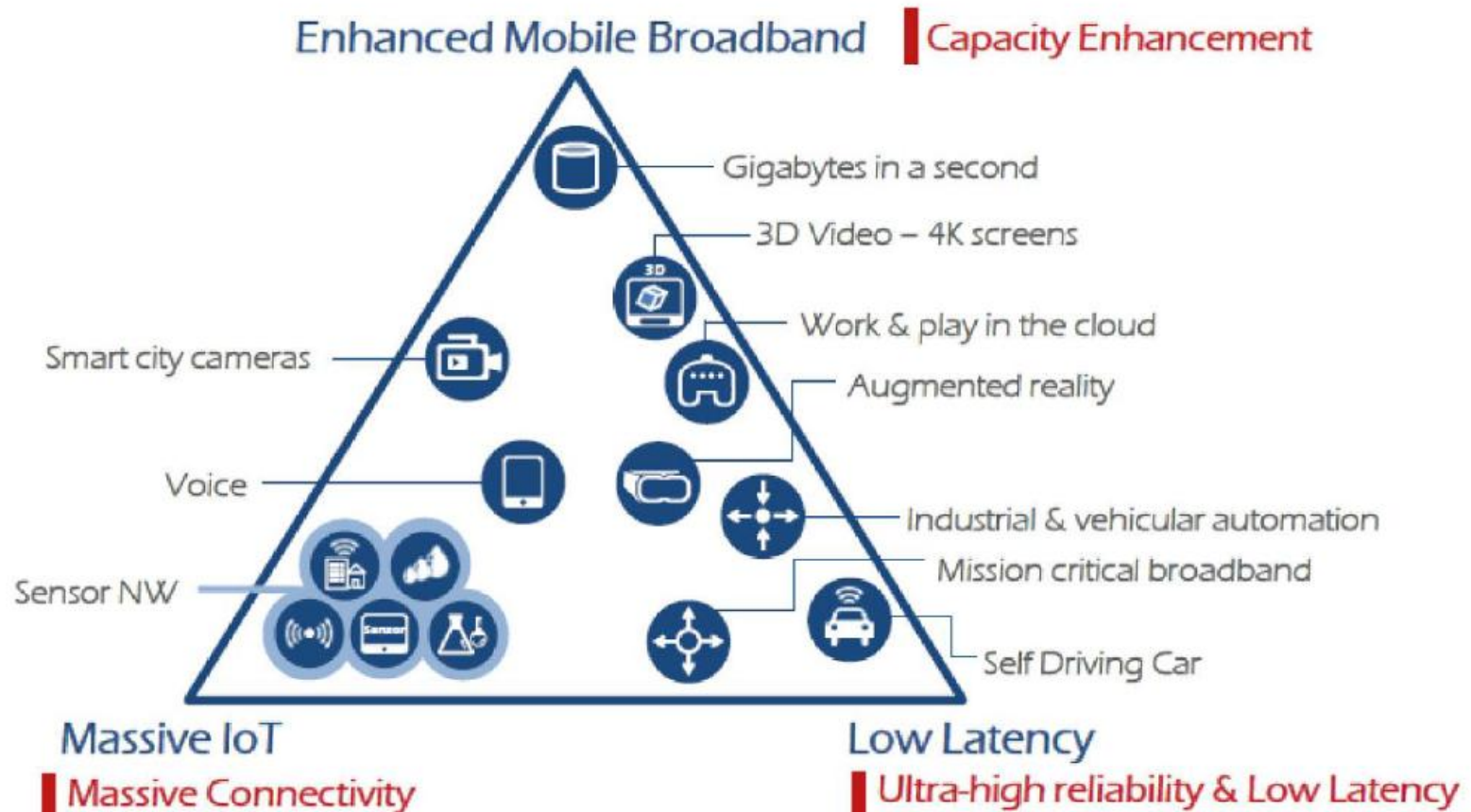
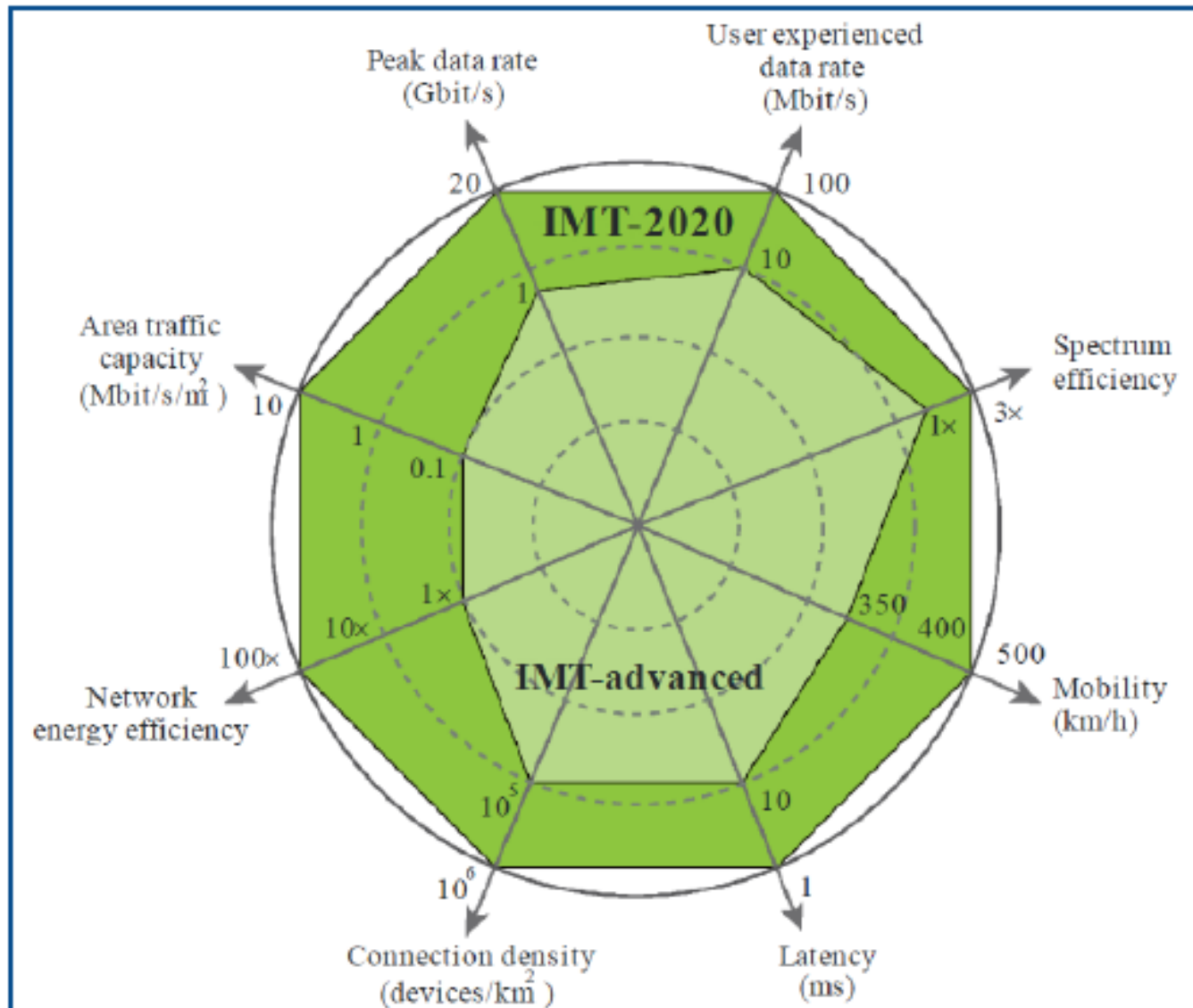


Figure 4. Calendrier de la 5G au 3GPP⁹

Les 3 objectifs de la 5G



(Source: ETRI graphic, from ITU-R IMT 2020 requirements)



Pénétration des technologies

