

Module M1102: Initiation à la téléphonie d'entreprise

L. Sassatelli

sassatelli@unice.fr

<http://www.i3s.unice.fr/~sassatelli/teaching>

Situation dans la formation DUT R&T

| Semestre 1 | | | | | | | |
|---|--|-----------|----|-----|-----|--------------------------------------|---------|
| UE11 : Découverte métiers | | | | | | Volume horaire étudiant en formation | |
| Référence | Nom du module | Coeff | CM | TD | TP | encadrée | dirigée |
| M1101 | Initiation aux réseaux d'entreprises | 3 | 9 | 15 | 36 | 60 | |
| M1102 | Initiation à la téléphonie d'entreprise | 2 | 6 | 9 | 15 | 30 | |
| M1103 | Architecture des équipements informatiques | 1,5 | 9 | 9 | 12 | 30 | |
| M1104 | Principes et architecture des réseaux | 2 | 12 | 9 | 9 | 30 | |
| M1105 | Bases des systèmes d'exploitation | 2 | 6 | 6 | 18 | 30 | |
| M1106 | Initiation au développement Web | 1,5 | 3 | 6 | 21 | 30 | |
| M1107 | Initiation à la mesure du signal | 1,5 | 6 | 9 | 15 | 30 | |
| M1108 | Acquisition et codage de l'information | 1,5 | 6 | 9 | 15 | 30 | |
| M1109 | PT : Mise en application de la communication et des techniques documentaires | 1 | | | | | 60 |
| Total UE 11 | | 16 | 57 | 72 | 141 | 270 | 60 |
| UE 12: Mise à niveau des compétences transversales et scientifiques | | | | | | Volume horaire étudiant en formation | |
| Référence | Nom du module | Coeff | CM | TD | TP | encadrée | dirigée |
| M1201 | Anglais général de communication et initiation au vocabulaire technique | 2 | | 9 | 21 | 30 | |
| M1202 | EC: Éléments fondamentaux de la communication | 2 | | 9 | 21 | 30 | |
| M1203 | PPP: Connaître son champ d'activité | 1 | | 3 | 12 | 15 | |
| M1204 | Mise à niveau en numération et calculs | 2 | 6 | 18 | 6 | 30 | |
| M1205 | Harmonisation des connaissances et des outils pour le signal | 2 | 9 | 9 | 12 | 30 | |
| M1206 | Circuits électroniques : mise à niveau | 2 | 6 | 12 | 12 | 30 | |
| M1207 | Bases de la programmation | 2 | 6 | 6 | 18 | 30 | |
| M1208 | Adaptation et méthodologie pour la réussite Universitaire | 1 | | 15 | | 15 | |
| Total UE 12 | | 14 | 27 | 81 | 102 | 210 | 0 |
| Total semestre 1 | | 30 | 84 | 153 | 243 | 480 | 60 |

- **Organisation :**

- Cours : 6h
- TD : 3h
- TP : 12h

- **Notation :**

- DS (dont QCM) : coeff 1
- TP : coeff 1

Références principales

- Téléphonie analogique : Claude Rigault, *Principes de commutation numérique. Du téléphone au multimédia*
- VoIP : Lecture Series on Broadband Networks by Prof. Karandikar , Department of Electrical Engineering, IIT Bombay.

Plan général du cours

1. Historique et électronique du téléphone analogique
2. Numérisation de la voix humaine
3. Commutation et multiplexage
4. Voix sur IP : challenges et solutions

Plan général du cours

1. Historique et électronique du téléphone analogique
2. Numérisation de la voix humaine
3. Commutation et multiplexage
4. Voix sur IP : challenges et solutions

Dates et inventions clés

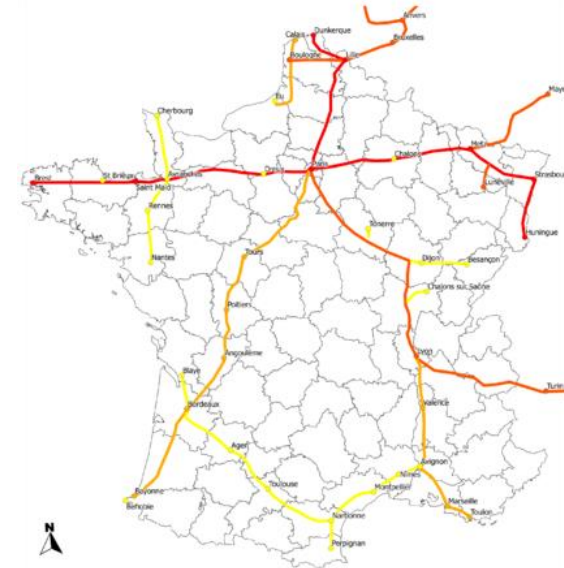
| | |
|-----------|--|
| - 500 000 | Feu |
| - 3 200 | Écriture : Les Sumériens créent l'écriture cunéiforme |
| - 3 000 | Roue : Les Sumériens remplacent la glisse sur tronc d'arbres par la roue |
| 770 | Imprimerie |
| 1642 | Calculatrice de Pascal |
| 1793 | Télégraphe de Chappe |
| 1801 | Volta présente sa pile électrique à Bonaparte |
| 1850 | Calculateur de Babbage avec cartes perforées |
| 1861 | Le vélo(cipède): les frère Michaux |
| 1876 | Téléphone inventé par Graham Bell (Écosse) |
| 1877 | Edison crée le phonographe |
| 1879 | Edison invente la lampe à incandescence |
| 1895 | Cinématographe: les frères Lumière |
| 1903 | Avion à moteur : les frères Wright |

Dates et inventions clés

| | |
|------|---|
| 1946 | Ordinateurs: Le premier (États-Unis) : ENIAC 30 tonnes et 18 000 tubes à vide |
| 1954 | Texas Instrument fabrique le premier transistor en silicium |
| 1958 | Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| 1961 | Le premier circuit intégré comporte 6 composants |
| 1971 | Le microprocesseur 4004 sort des usines Intel avec 2300 transistors pour \$200 |
| 1973 | Micro ordinateur par André Truong (France) (le Micral -> société R2E -> rachetée par Bull 1978) |
| 1974 | Internet fait ses premiers pas (Arpanet) |
| 1978 | France Télécom lance Transpac, premier réseau de transmission de données par paquets en France |
| 1980 | Le Télétel 3V ou Minitel (Modem V.23 à 1200 - 600 bit/s en réception/émission) |
| 1982 | Premier PC (Personal Computer d'IBM) |
| 1997 | L'ordinateur bat le champion d'échecs (Deep Blue / Gary Kasparov) |
| 2002 | Génome humain décodé |
| 2003 | Internet avec plus de 100 millions d'ordinateurs reliés |

Le télégraphe optique : télégraphe de Chappe

- **Télégraphe** (du grec *têlé*, loin et *graphie*, écrire) : système destiné à transmettre des messages d'un point à un autre sur de grandes distances, à l'aide de codes pour une transmission rapide et fiable.
- **Télégraphe optique** : Le premier télégraphe exploité était optique et totalement manuel.
Il s'agit d'un premier réseau de télécommunications d'envergure nationale au monde.
Pendant la Révolution française, **Claude Chappe** imposa à l'État français son système révolutionnaire de transmission par sémaphores, notamment grâce au soutien de Joseph Lakanal : la **Tour Chappe**.
- **Sémaphore** : tour pour transmettre des signaux (le mot sémaphore vient du grec *sema* : signe et *phoros* : qui porte)



Le réseau Chappe en France
Directions (date de création)
● 1793-1800
● 1800-1815
● 1815-1830
● Après 1830
Lignes (date de création)
— 1793-1800
— 1800-1815
— 1815-1830
— Après 1830

Le télégraphe électrique : le télégraphe de Morse

- **Télégraphe électrique** : En 1832, Samuel Morse : Une ligne électrique relie deux points.
- À chaque extrémité est placée une machine constituée d'un émetteur et d'un récepteur.
- L'émetteur est un manipulateur manuel, un simple interrupteur alimenté avec une batterie plus ou moins brièvement la ligne. Le récepteur est un électroaimant connecté directement sur la ligne, actionnant un mécanisme chargé de transcrire le code par le marquage d'une bande de papier.
- Le code inventé par Morse est la transcription en une série de points et de traits des lettres de l'alphabet, des chiffres et de la ponctuation courante. Le point est une impulsion brève et le trait une impulsion longue.



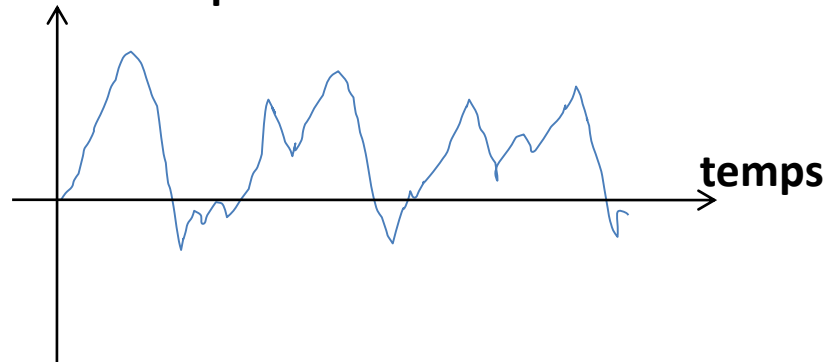
L'invention du téléphone : brevet en 1876

- Alexander Graham Bell est souvent considéré l'inventeur du telephone car détenteur du premier brevet effectif.
- Cependant d'autres inventeurs tels Elisha Gray et Antonio Meucci ont aussi développé un "télégraphe parlant".
- Antonio Meucci, un immigrant italien, a commence dès 1849 et fait une declaration d'invention en 1871. Son role dans l'invention du telephone a été négligé, et la chamber des représentants en 2002 a vote une resolution honorant les contributions de Meucci.
- Elisha Gray, un ingénieur électricien, a deposé une declaration d'invention au bureau des brevets américain, le même jour que Bell y a depose son brevet de telephone. Mais pour d'obscures raisons, le bureau des brevets a descerné à Bell le premier brevet pour un telephone.

Qu'est-ce que le son ?

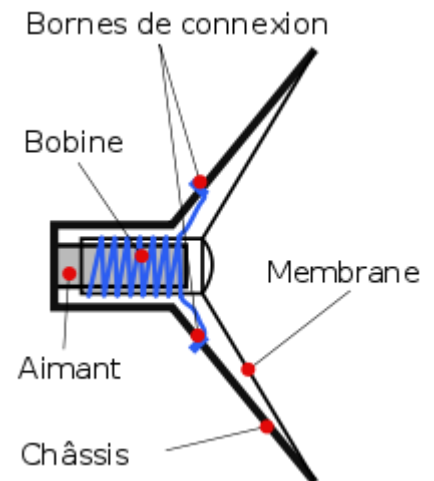
- **L'onde sonore** : Une onde acoustique est une perturbation mécanique (onde de compression-dilatation du milieu) qui se propage dans un milieu matériel.
C'est une vibration.
 - L'onde va "compresser" et "décompresser" le milieu puis, après le passage de l'onde, le milieu reste inchangé.
- > ne marche pas dans le vide

**Densité de molécules
à un point P de l'espace**



Télé-communication vocale

- But : transformer le signal sonore en un signal électrique pour le transporter loin et sans autant d'atténuation que le son dans l'air.
- Rappel : une tension électrique est _____
- $v(t)$ variations de la densité de l'air est transformé en $s(t)$ variations de la tension électrique
- Principes du microphone et du haut-parleur :
 - Membrane pour variations de l'air
 - Bobine pour courant produisant un champ magnétique
 - Aimant pour transformer la force magnétique en force mécanique

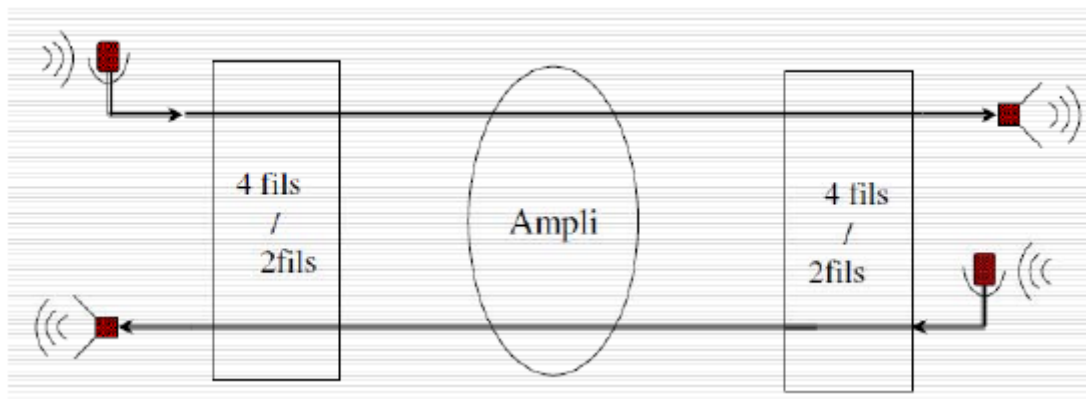


La ligne d'abonné

- la liaison d'abonné est une **paire de fils de cuivre**
- relie l'abonnée au **central téléphonique**
- la ligne assure la transmission:
 - de la **voix** (fréquence vocale de 300 à 3 400 Hz),
 - de la **numérotation** (10 Hz pour la numérotation décimale - au cadran - et 697 à 1 633 Hz pour la numérotation fréquentielle)
 - et de la **signalisation générale** (boucle de courant, fréquences vocales)

Besoin du full-duplex

- Communication **simplex** : possible que dans un sens
- Communication **duplex** : possible dans les 2 sens
 - **half-duplex** : un seul sens à un instant donné
 - **full-duplex** : les deux sens en même temps
- Téléphonie : requiert full-duplex ! (on doit pouvoir parler en même temps)



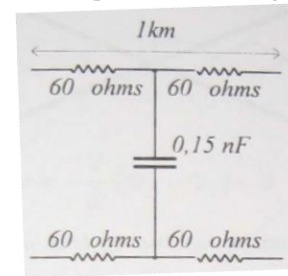
Le problème du duplex sur 2 fils

- L'investissement principal des opérateurs téléphoniques est constitué par les câbles reliant les abonnés aux centraux téléphoniques.
- Mettre 4 fils par abonné, au lieu de 2 -> augmentation du capital, déjà gigantesque
- Circuit duplex avec 2 fils ?
- 1^{ère} solution : mettre le micro et le haut-parleur en série sur la même ligne
-> ça ne fonctionne pas à cause de **l'effet local**

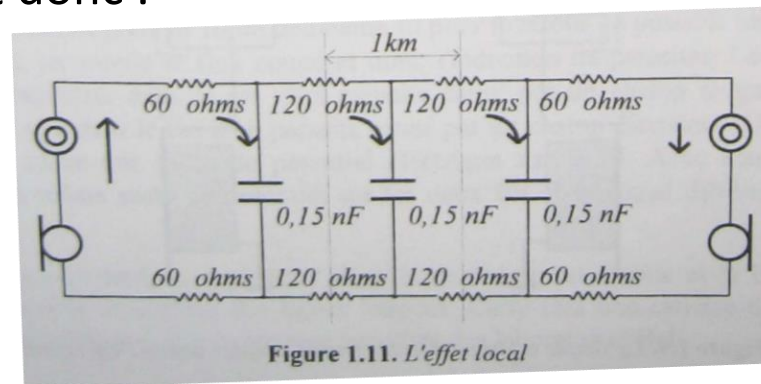
Duplex sur 2 fils: le problème de l'effet local (side tone)

- On obtient un schéma équivalent de la ligne en juxtaposant des cellules en T :

Chaque kilomètre de ligne est assez bien représenté par une cellule de 4 résistances séries de 60 ohms et un condensateur parallèle de 0,15 nF.



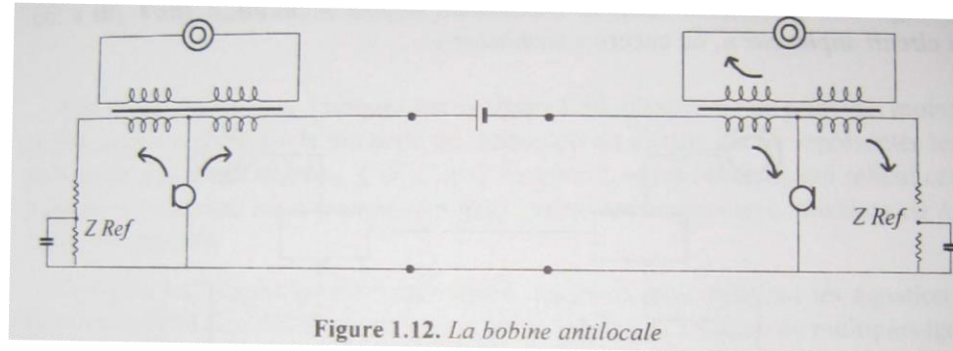
- Avec le micro et le haut-parleur en série, le montage entre les 2 interlocuteurs est donc :



- > toute l'énergie générée par le microphone va dans l'écouteur de celui qui parle et qu'une beaucoup plus faible partie arrive dans l'écouteur de celui qui écoute !

Duplex sur 2 fils: le problème de l'effet local (side tone)

- -> pas bon car celui qui parle, s'entendant fort, va naturellement baisser sa voix
- Cet effet pernicieux, par lequel celui qui parle s'entend plus fort que celui qui l'écoute, est appelé l' « *effet local* »
- La solution : utiliser un transformateur particulier appelé « *bobine antilocale* »



- L'énergie émise par le micro se répartit en 2 moitiés: une moitié part dans la ligne, l'autre moitié est perdue dans une impédance dite « *impédance d'équilibrage* » censée imiter exactement l'impédance de la ligne
- -> aucun courant ne circule dans l'écouteur de celui qui parle

Pour évoluer de...

- Téléphone sans possibilité de numéroté
- Nécessitant des opératrices humaines dans les centraux téléphoniques



A large Bell System international switchboard in 1943

... à une automatisation relative

- Téléphone permettant de composer le numéro destinataire
- Sans besoin d'humain pour commuter chaque appel, mais toujours avec des signaux analogiques



Commutateur téléphonique électro-mécanique (crossbar).
D'environ 1920 à 1980

Circuit de signalisation du poste:

Signalisation nécessaire

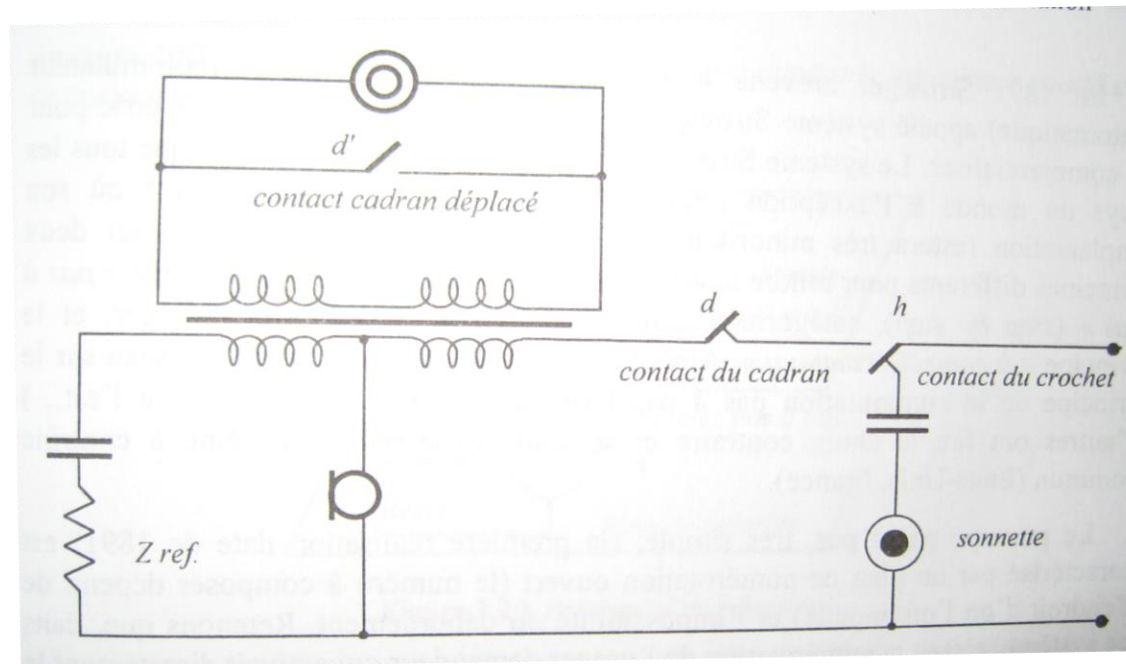
- Le téléphone doit transmettre au central, ou recevoir de celui-ci, des données de signalisation:
 - On appelle « *signaux de ligne* » les signaux correspondant à un état du poste
 - On appelle « *signaux d'enregistreur* » les signaux correspondant à l'envoi d'un numéro

| Sens | Signaux de ligne | Signaux d'enregistreur |
|--|---|------------------------|
| Téléphone vers central Central vers téléphone | Décrochage / Raccrochage Signal d'appel (sonnerie) | Numérotation |

Circuit de signalisation du poste:

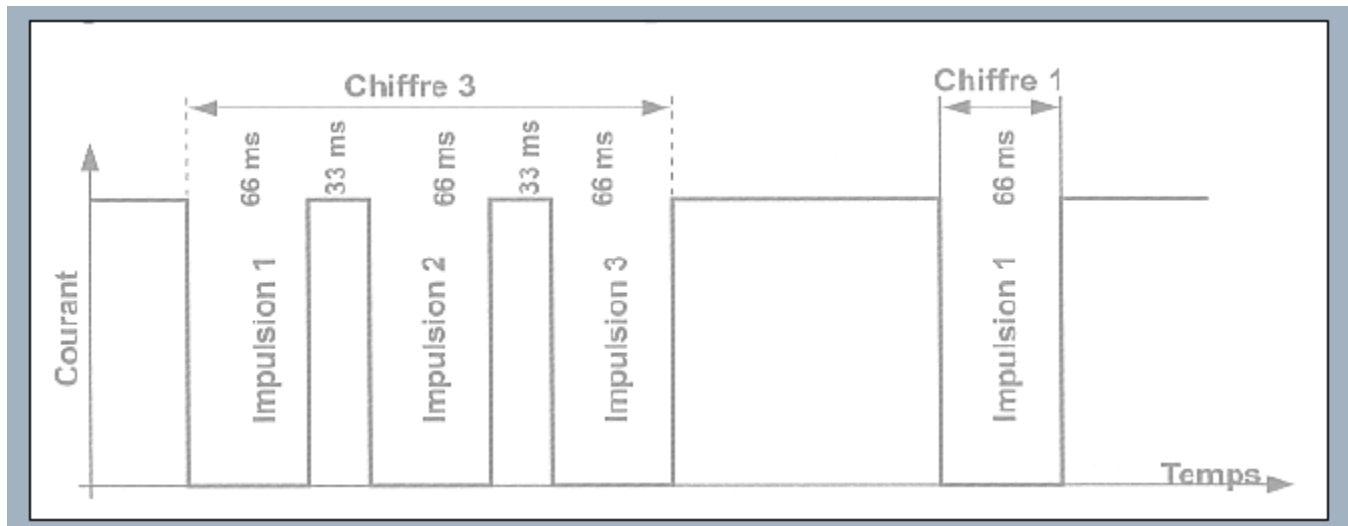
Schéma d'un poste de téléphone avec cadran

- Indication « décroché ou raccroché »: crochet « h » -> état perçu par le central
- Contact « d » pour la numérotation (« d' » pour que l'appelant n'entende pas les impulsions)



Numérotation décimale (anciens postes à cadrans rotatifs)

- Décimale (impulsions)
 - le combiné provoque des coupures de ligne calibrées
 - les numéros sont envoyés au CAA sous forme d'impulsions (66-33ms) selon le chiffre (0=10 impulsions) avec un intervalle minimum de 350ms entre deux chiffres



Notre fournisseur de téléphonie historique

PTT - France Telecom - Orange

- **1792**, le premier réseau de communication voit le jour pour permettre d'acheminer rapidement les informations dans un pays en guerre et peu sûr réseau de télégraphie optique de **Chappe**.
- **1878**, après l'invention du téléphone et du télégraphe se crée en un **ministère des Postes et Télégraphes qui annexe bientôt les services du téléphone qui sont nationalisés en 1889**
- **1923**, le ministère des P & T devenant celui des **PTT**.
- **1941**, une Direction Générale des Télécommunications est créée
- **1944**, le **CNET, Centre National d'Études des Télécommunications, est créé -> principales création en 70's: la commutation numérique, le minitel, la norme GSM**
- **1988**, la Direction générale des télécommunications devient **France Télécom** (directive européenne et séparation des PTT)
- **1990**, France Télécom est transformé en exploitant de **droit public**
- **1998**, une loi est votée en juillet 1996 transformant l'exploitant public en société anonyme dont l'État français est le seul actionnaire
- **2000**, le groupe a racheté la grande majorité d'**Orange plc**
- **2003**, fusion des activités mobiles (Itinériss, OLA, Mobicarte) en Orange SA
- **2004**, France Télécom devient une **entreprise privée**
- Aujourd'hui, c'est **220 000 personnes - 90 millions de clients** dans le monde



Plan général du cours

1. Historique et électronique du téléphone analogique
2. Numérisation de la voix humaine
3. Commutation et multiplexage
4. Voix sur IP : challenges et solutions

La numérisation pour finalement arriver à :

- Téléphone avec numérotation fréquentielle et téléservices possible
- Appels commutés automatiquement ET efficacement



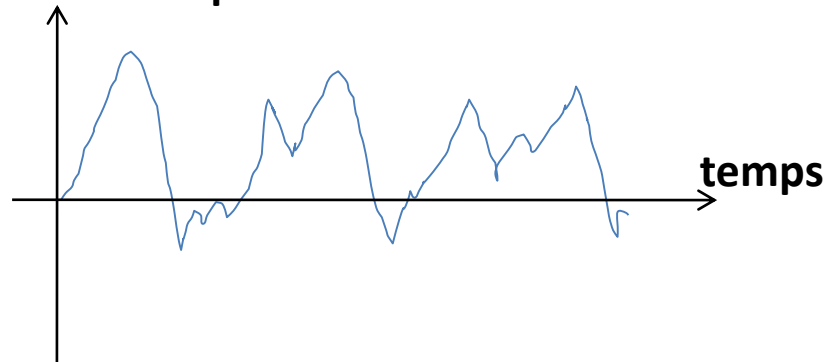
1980: DM100, contrôle 100000 lignes de téléphones analogiques, pour opérer un réseau numérique



Qu'est-ce que le son ?

- **L'onde sonore** : Une onde acoustique est une perturbation mécanique (onde de compression-dilatation du milieu) qui se propage dans un milieu matériel.
C'est une vibration.
 - L'onde va "compresser" et "décompresser" le milieu puis, après le passage de l'onde, le milieu reste inchangé.
- > ne marche pas dans le vide

**Densité de molécules
à un point P de l'espace**

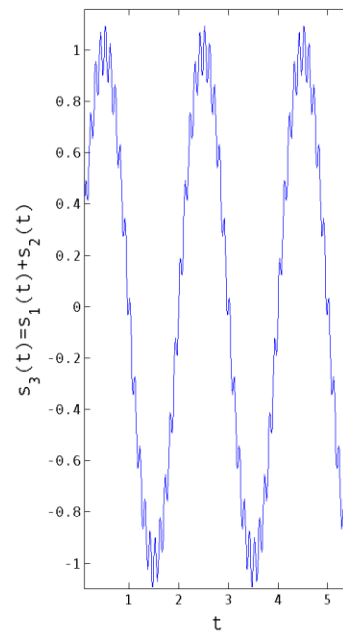
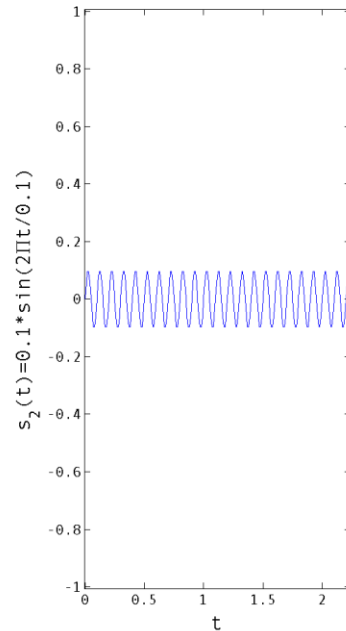
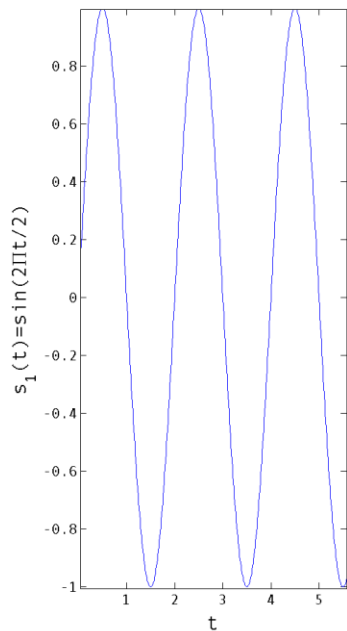


Propagation du son

| <u>Milieu</u> | <u>Vitesse</u> | <u>Note</u> |
|---------------|----------------|---|
| air | 340m/s | Fonction de la température: 331m/s à 0°C et 343m/s à 20°C |
| eau | 1.440m/s | dans les liquides la vitesse est nettement plus élevée |
| cuivre | 3.500m/s | |
| acier | 5.000 m/s | |

Composition du signal sonore

- Un signal complexe est la somme de plusieurs signaux simples :
 - Prenons $s_3(t) = s_1(t) + s_2(t)$
 - Avec $s_1(t) = \sin(2\pi t/2)$ et $s_2(t) = 0.1 * \sin(2\pi t/0.1)$



• La **fréquence** est l'inverse de la période : nombre de variations par unité de temps (s).

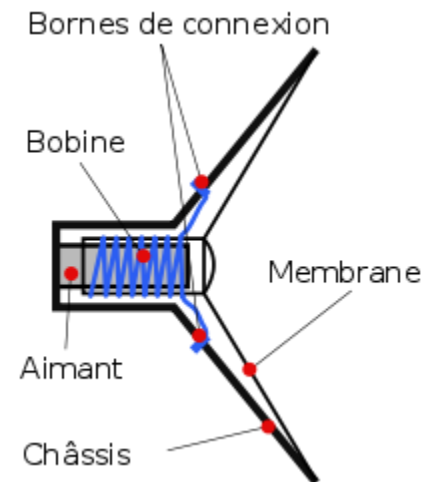
$$-f_1 = 1/T_1 = 1/2 = 0.5 \text{ Hz}$$

$$-f_2 = 1/T_2 = 1/0.1 = 10 \text{ Hz}$$

• La **fréquence fondamentale** f_0 est la plus petite fréquence présente dans un signal ($f_0 = f_1$ ici).

Caractéristiques fondamentales

- Tension mesurée aux bornes d'un microphone
- Voix humaine : fréquence maximale de 4KHz
- Audition humaine : fréquence maximale de 18KHz



La numérisation pour finalement arriver à :

- Téléphone avec numérotation fréquentielle et téléservices possible
- Appels commutés automatiquement ET efficacement



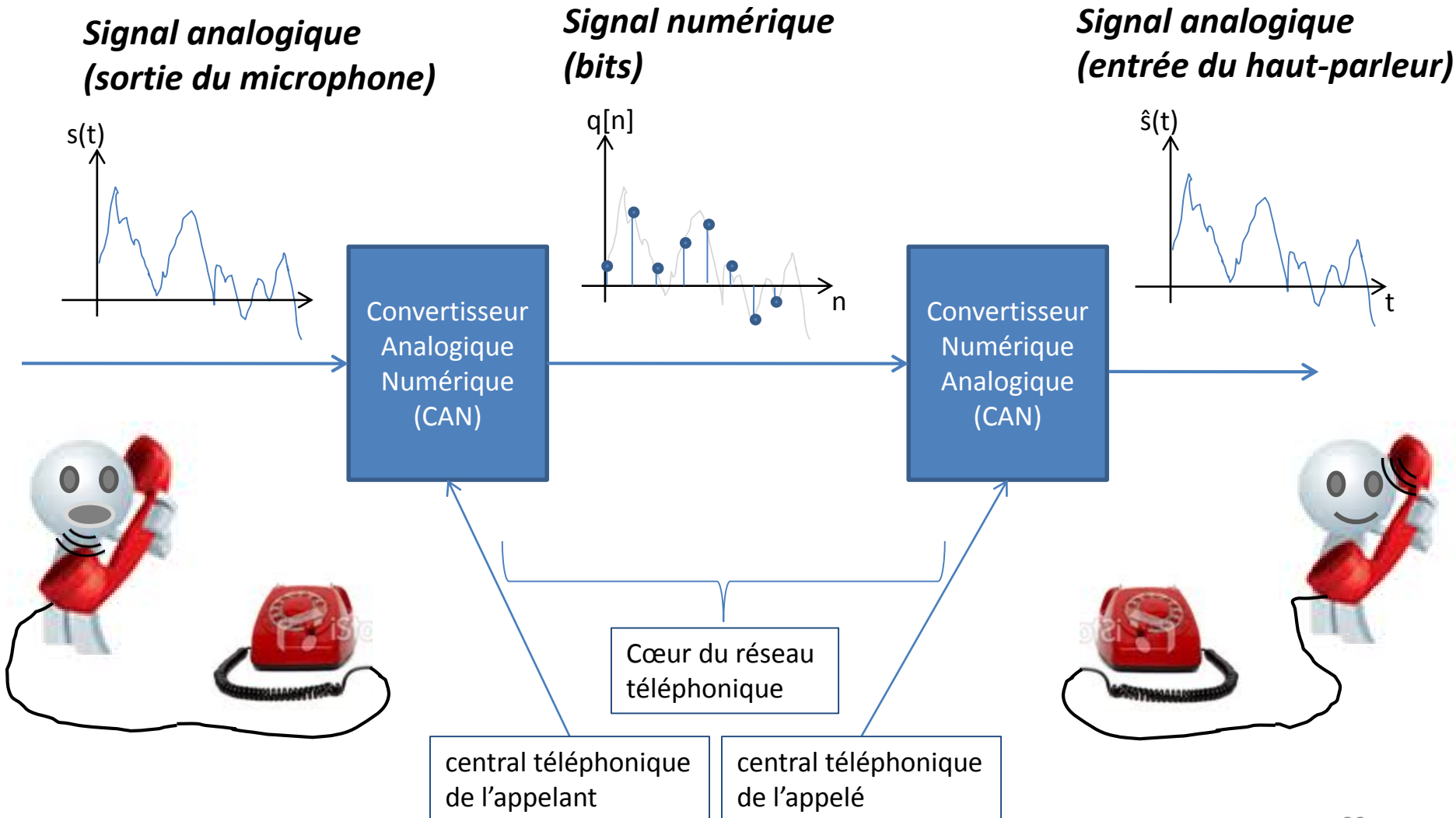
1980: DM100, contrôle 100000 lignes de téléphones analogiques, pour opérer un réseau numérique



Les besoins pour le transport de la voix

- A grande distance : donc sans trop de pertes, d'atténuation
- Sans trop tirer de câbles : un câble doit pouvoir être utilisé pour plusieurs communications téléphoniques
- Les 2 interlocuteurs doivent pouvoir parler dans les 2 sens et en même temps.

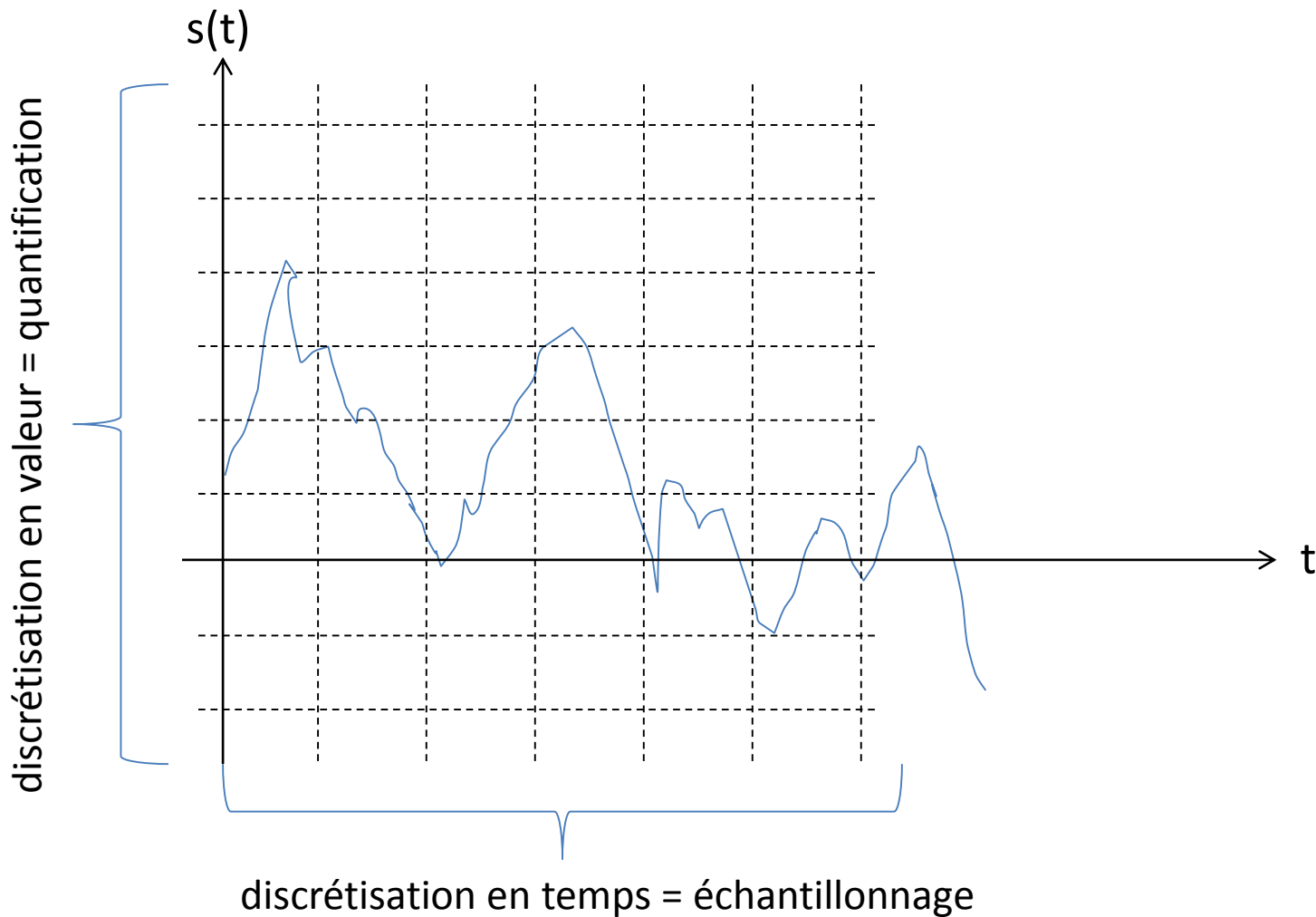
La numérisation



La numérisation : principe

- Conversion Analogique -> Numérique
- **Numérisation** = transformation d'un signal continu dans le temps et à valeurs continues en une suite discrète en temps et discrète en valeurs
=> Permet de représenter un signal continu sur un intervalle de temps fini, en un nombre fini de bits
- La discrétisation permet de transformer un espace borné infini en un espace borné fini.
Exemple : l'ensemble des nombres réels entre 1 et 10, $[1;10]$, peut être discrétisé en $\{1;2;3;4;5;6;7;8;9;10\}$ qui est un ensemble fini.
- **Discrétisation dans le temps**: prélèvement de l'amplitude du signal à des instants précis
= **échantillonnage**
- **Discrétisation en valeurs** : l'amplitude est projetée sur un ensemble fini de valeurs
= **quantification**
- Récepteur : devra **reconstituer** le signal continu d'origine à partir des échantillons quantifiés transmis

La numérisation : principe

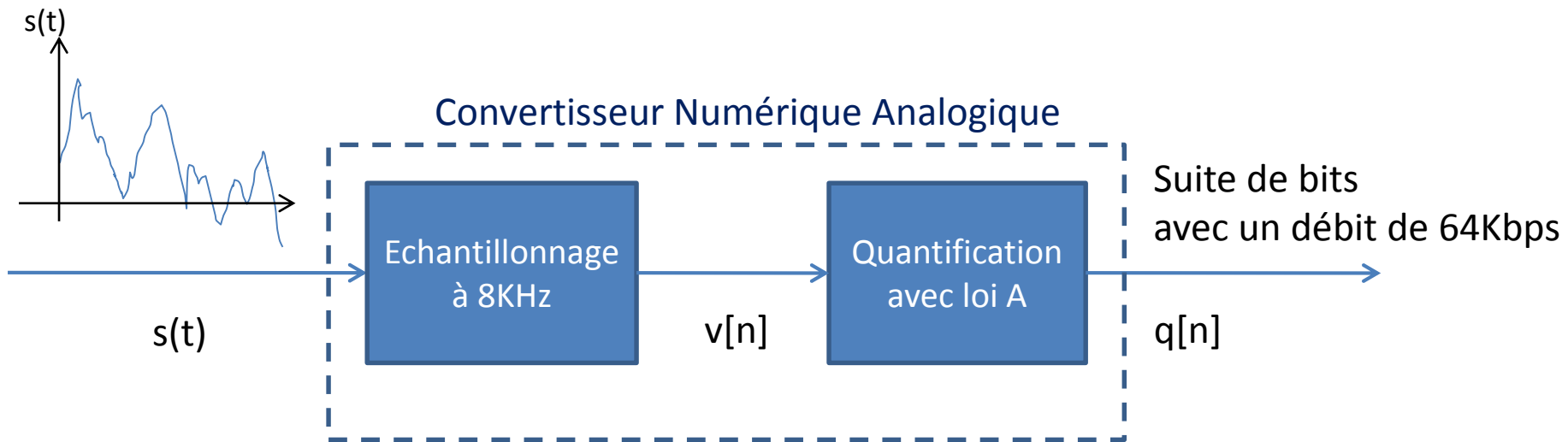


La numérisation : intérêt

- Comparé aux systèmes analogiques, le système numérique permet une plus grande qualité de transmission: il suffit de reconnaître la présence du signal et non sa forme pour le reconstituer.
- Il est ainsi possible de régénérer le signal au récepteur en éliminant les erreurs introduites par le bruit.
- La numérisation permet d'utiliser moins de ressources (de câbles, de temps et de bande de fréquence) pour transmettre beaucoup de communications à la fois.

La numérisation en téléphonie

- La transformation d'un signal analogique en suite d'échantillons quantifiés s'appelle **PCM : Pulse Code Modulation**, et constitue la **norme G711** de téléphonie internationale.



L'échantillonnage : condition de reconstruction

- **Théorème de Shannon-Nyquist** : la reconstruction parfaite d'un signal analogique $s(t)$, à partir du signal $v[n]$ obtenu par un échantillonnage de période T_e , est possible si et seulement si

$$F_e > 2 F_{\max}$$

où F_{\max} est la fréquence maximale présente dans le signal $s(t)$.

Le choix de F_e en téléphonie

- Téléphone : quelle est F_{\max} pour la voix humaine ?
 - Réponse : $F_{\max} = 4\text{KHz}$ car
 - D'où le choix : **$F_e = 8\text{KHz}$**
- Donc **$F_e = 8\text{KHz}$** signifie qu'un CAN dans un central téléphonique produit **8000 échantillons par seconde par communication** téléphonique.
- Pour s'assurer que le signal vocal sera bien reproduit, on enlève les composantes de fréquences supérieures à $F_{\max} = 4\text{KHz}$ avant d'échantillonner à $F_e = 8\text{KHz}$: on applique un « filtre anti-repliement ».
 - Vous verrez pourquoi « repliement » un peu plus tard dans l'année

Le choix de F_e dans d'autres contextes

- L'oreille humaine entend jusqu'à 15-18KHz, donc pour échantillonner des signaux autres que la voix humaine (musique) :

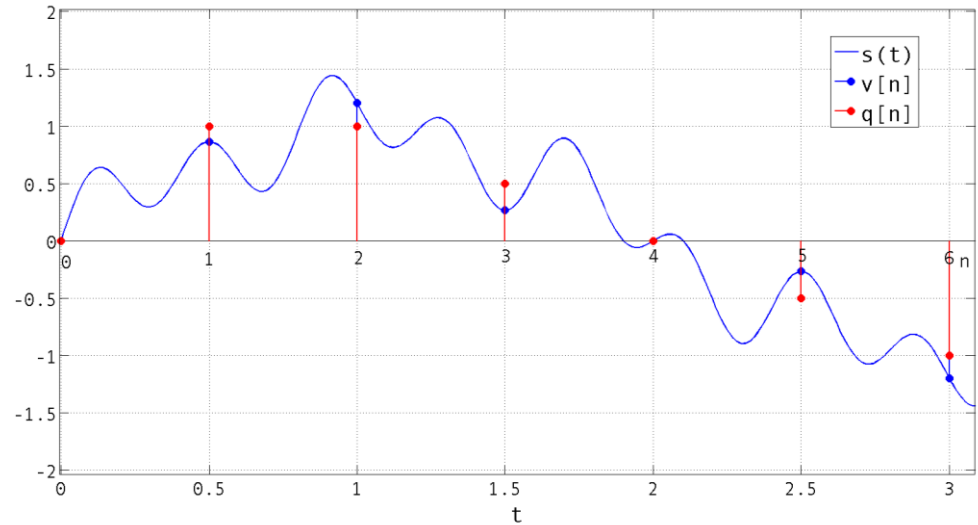
| Contexte | F_{max} | F_e |
|------------|-----------|---------|
| Radio FM | 15KHz | 32KHz |
| Qualité CD | 20KHz | 44.1KHz |

Etape 2 de la numérisation : la quantification

- Rappel : La numérisation doit permettre de représenter un signal continu sur un intervalle de temps limité, en un nombre fini de bits.
- Or un nombre fini de bits ne peut représenter qu'un nombre fini de valeurs possibles :
 - M bits ne décrivent que 2^M valeurs possibles
- Donc un nombre fini de bits ne peut pas représenter la valeur d'un échantillon tant que celle-ci peut varier dans un espace continu (par exemple valeurs réelles).
- Donc pour obtenir une représentation binaire du signal, il va falloir projeter la valeur de chaque échantillon dans un ensemble fini : c'est la quantification
= discrétisation en valeurs

Quantification : principe

- Choix de 9 valeurs possibles pour un échantillon
- Besoin de 4 bits par échantillons
- De façon générale, si on choisit V valeurs possibles,
- alors il faut [partie entière supérieure de $\log_2(V)$] bits pour les représenter, puisque $2^{\lceil \log_2(V) \rceil} = V$



→ Le débit consommé par une communication est alors
Nb bits par sec = Nb d'échantillons par sec x Nb de bits par échantillon

→ Question : pour minimiser le débit consommé par une communication tout en assurant une qualité acceptable, quel plus petit V puis-je choisir ?

Quantification : critère de qualité d'écoute

- Au moment de la reconstruction du signal au récepteur, la différence entre signal analogique reconstruit et d'origine perçue par l'oreille est fonction du **Rapport Signal sur Bruit** :

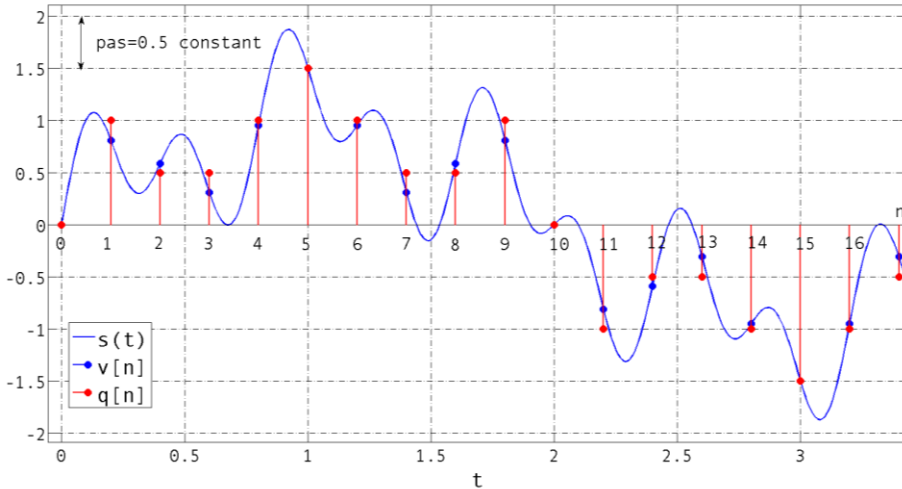
$$\begin{aligned}RSB &= \frac{\text{Puissance du signal}}{\text{Puissance du bruit}} \\ &= \frac{\text{Puissance du signal}}{\text{Puissance de l'erreur de quantification}} \\RSB &= \frac{v[n]^2}{(v[n] - q[n])^2}\end{aligned}$$

- Pour une communication téléphonique, une qualité acceptable au destinataire est obtenue si

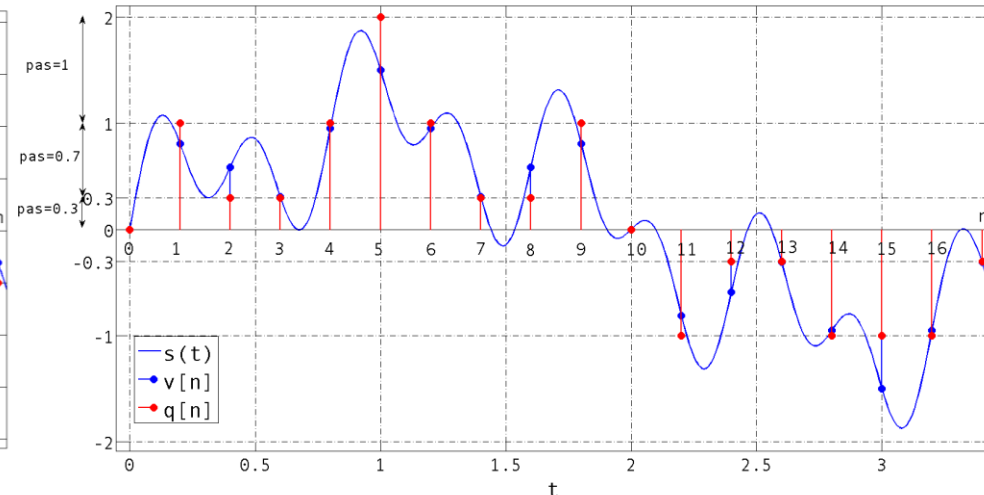
$$(C) \text{ } RSB \geq RSB_{\text{seuil}} = 6,3 \cdot 10^3 \text{ (38dB)}$$

Quantification non-uniforme

Quantification uniforme



Quantification non-uniforme



- La norme internationale **G711** de téléphonie permet d'obtenir la qualité désirée (C) avec une **quantification non-uniforme sur 8 bits** au lieu de 12 nécessaires avec une quantification uniforme.
- Débit binaire généré par une com. tél. numérisée avec quantif. non-unif :

$$\text{débit} = \text{nb d'éch par sec} * \text{nb de bits par éch} = 8000 * 8 = 64\text{Kbps}$$

Quantification non-uniforme en G711

- Obtention des 8 bits $\mathbf{b}[n]$ représentant $v[n]$:

$v[n] \rightarrow x = |v[n]/V_{\max}| \rightarrow y = F(x) \rightarrow \mathbf{b}[n]$ est le numéro de l'intervalle dans lequel tombe y

- 2 lois de quantification :

- USA et Japon :

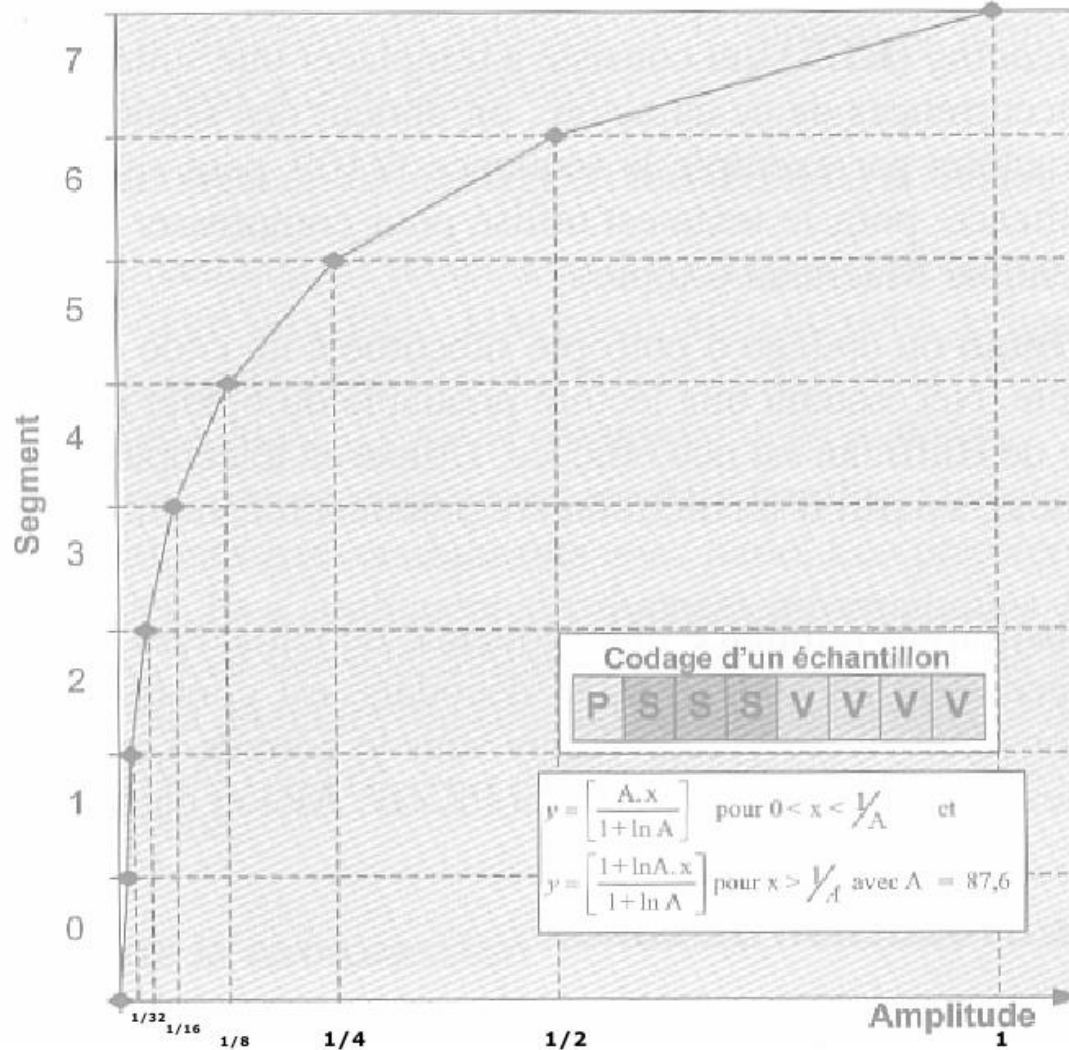
$$F(x) = \operatorname{sgn}(x) \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)} \quad -1 \leq x \leq 1$$

- Ailleurs (dont Europe) :

$$F(x) = \operatorname{sgn}(x) \begin{cases} \frac{A|x|}{1 + \ln(A)}, & |x| < \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln(A|x|)}{1 + \ln(A)}, & \frac{1}{A} \leq |x| \leq 1, \end{cases}$$

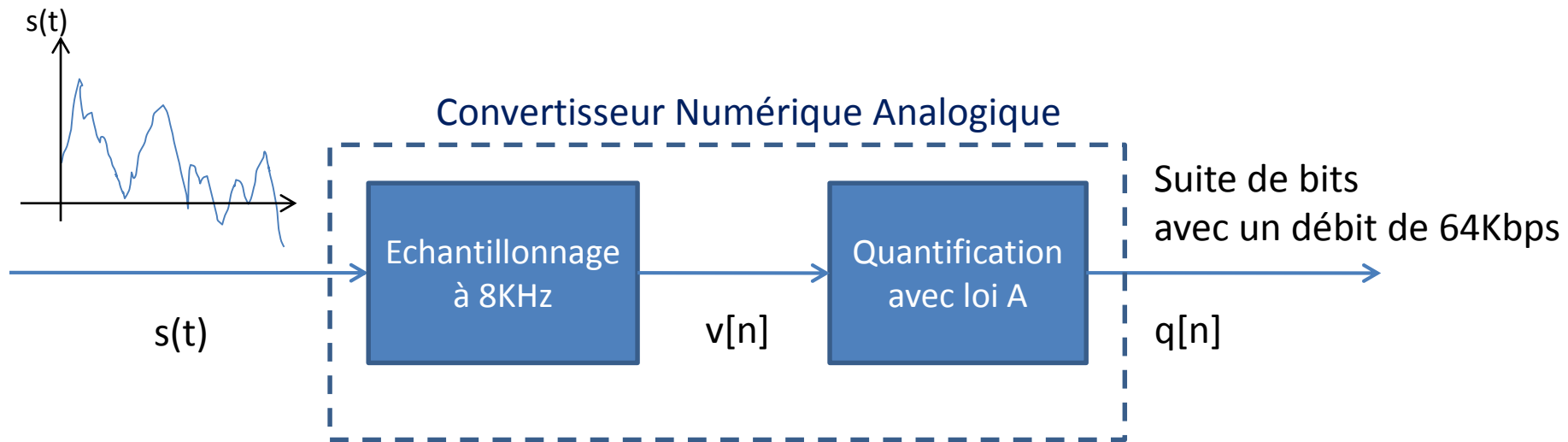
Quantification non-uniforme en G711

La loi A



La numérisation en téléphonie

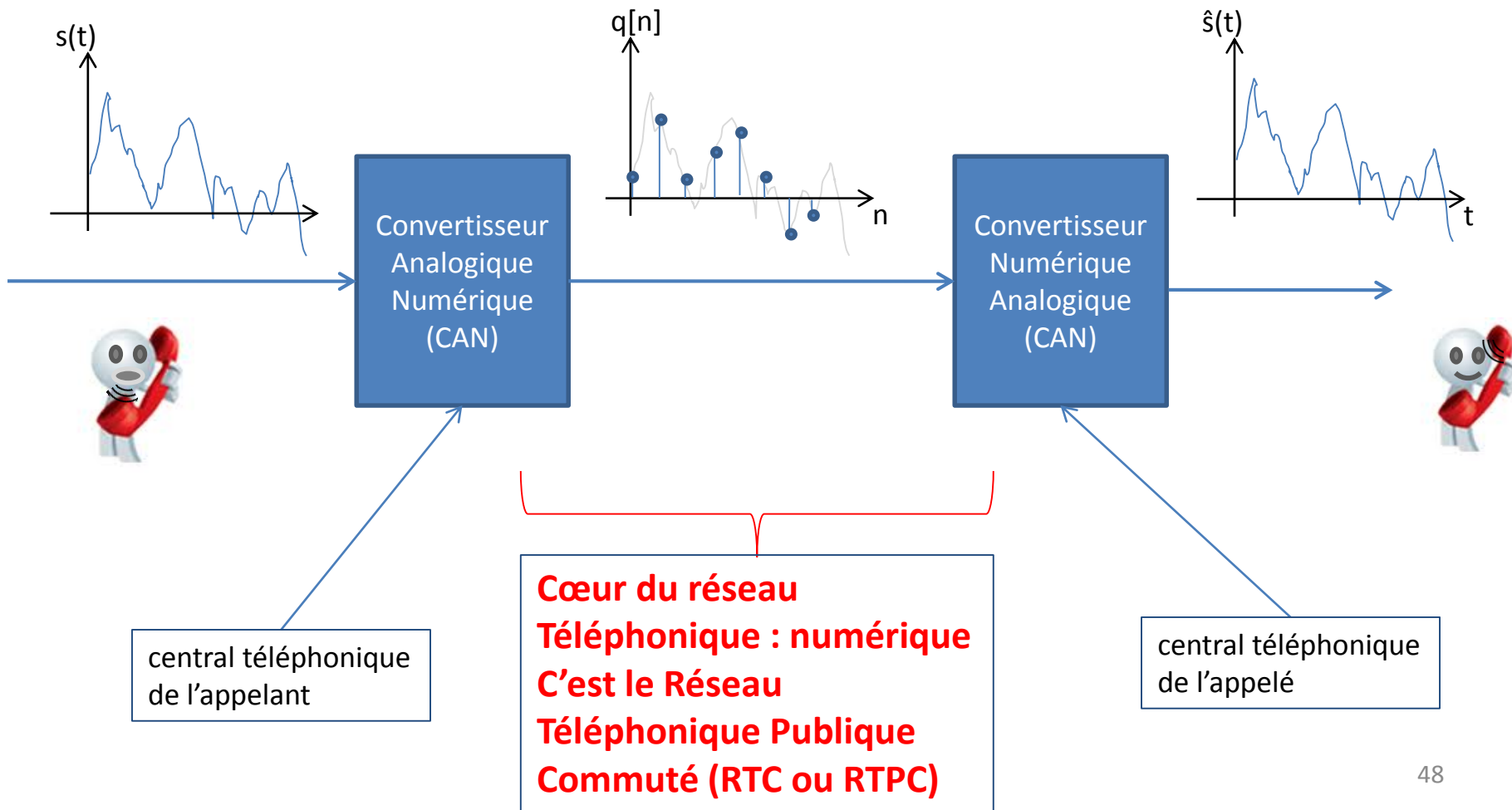
- La transformation d'un signal analogique en suite d'échantillons quantifiés s'appelle **PCM : Pulse Code Modulation**, et constitue la **norme G711** de téléphonie internationale.



Plan général du cours

1. Historique et électronique du téléphone analogique
2. Numérisation de la voix humaine
3. Commutation et multiplexage : le Réseau Téléphonique Commuté (RTC)
4. Voix sur IP : challenges et solutions

Rappel



Les contraintes dans le cœur du réseau

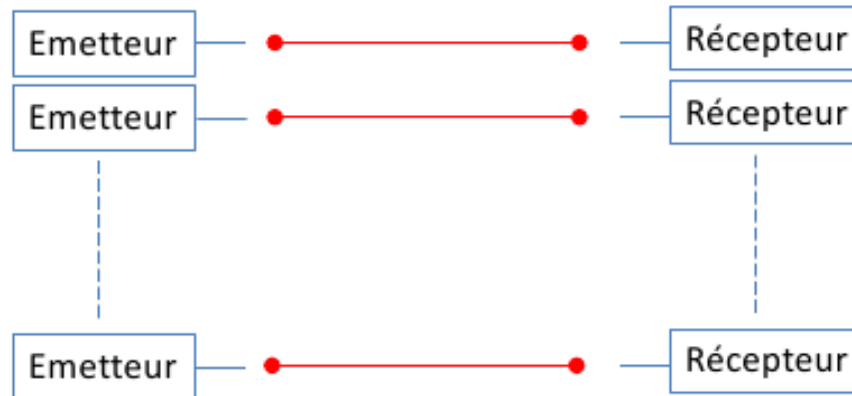
- Cœur du réseau téléphonique : ensemble des câbles et équipements entre les centraux téléphoniques (pas entre les centraux et les abonnés)
- L'infrastructure physique coûtant cher, on veut pouvoir utiliser un seul câble (ou fibre) pour transmettre plusieurs com. tél. en même temps.
P1
- Quand les signaux des com. tél. traversent un équipement intermédiaire, comment transférer ces signaux pour les orienter vers le destinataire ?
P2
- Le but étant d'avoir un échange en temps réel entre 2 personnes, la qualité de service perçue par les utilisateurs doit être constamment satisfaisante.
P3

Multiplexage (pour problème P1)

- Définition : le multiplexage est l'action de partager une ressource commune entre plusieurs communications.
- L'utilisation d'une ressource se fait dans 3 dimensions :
espace | temps | fréquence
- Une ressource ne peut pas être utilisée par 2 communications dans les même valeurs des 3 dimensions.
- Exemple : un réseau WiFi (comme unice-hotspot). 2 utilisateurs ne peuvent pas envoyer des trames en même temps, sur la même bande de fréquence, et au même endroit. Il faut :
 - soit qu'ils soient assez loin pour que leurs ondes n'interfèrent pas
 - soit qu'ils n'utilisent pas la même bande de fréquence (différents « canaux » WiFi)
 - soit qu'ils n'envoient pas au même moment
- Ceci correspond à 3 types de multiplexages différents : spatial, fréquentiel et temporel

Multiplexage spatial

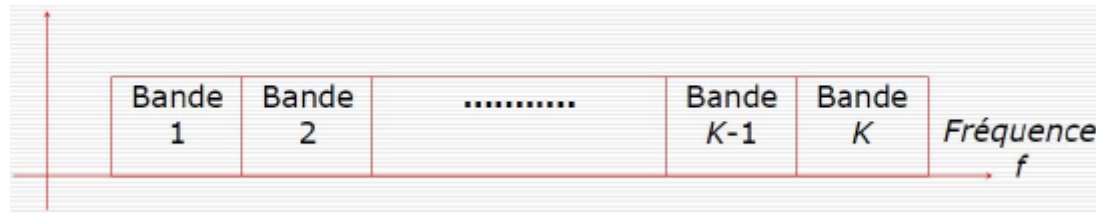
- **Multiplexage spatial** : les couples E/R se partagent le médium de transmission dans l'espace



- Exemples :
 - 2 utilisateurs WiFi connectés à 2 AP assez éloignés
 - 2 paires de fils dans un même câble portant 2 communications différentes (câble Ethernet avec 2 fils pour A vers B et 2 fils pour B vers A)
 - 2 antennes utilisées sur un même équipement pour transmettre 2 signaux différents, et augmenter le débit total : WiFi norme 802.11n, 3G et 4G,...)

Multiplexage fréquentiel

- **Multiplexage fréquentiel** : les couples E/R se partagent le médium de transmission dans les fréquences



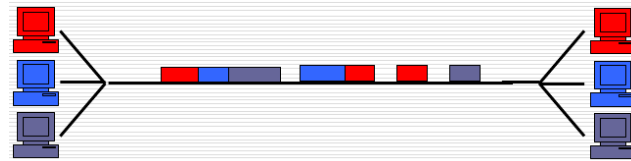
- Exemples :
 - 2 utilisateurs WiFi connectés au même AP (donc assez proches) sur 2 canaux WiFi différents (14 canaux en WiFi)
 - 1 téléphone transmettant en 4G et un ordinateur en WiFi à côté, ou réception TNT (autour des 1GHz, 2.4GHz et 500MHz)

Multiplexage temporel

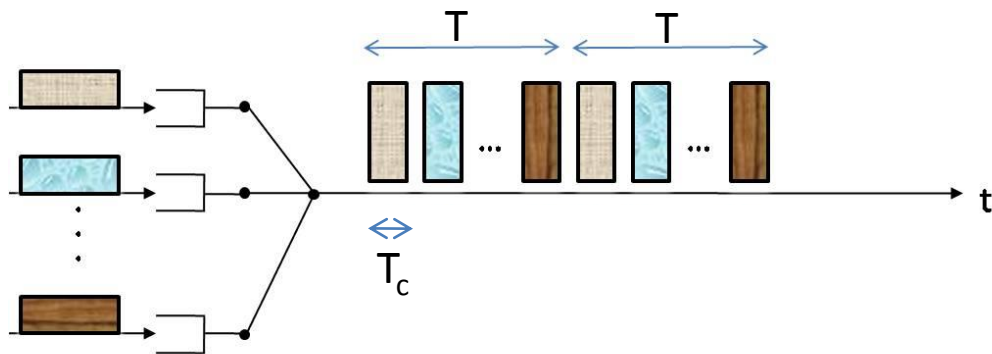
- **Multiplexage temporel:** les couples E/R se partagent le médium de transmission dans le temps

- Exemples :

- 2 utilisateurs WiFi proches, sur le même canal : chacun transmet quand il peut. Multiplexage statistique



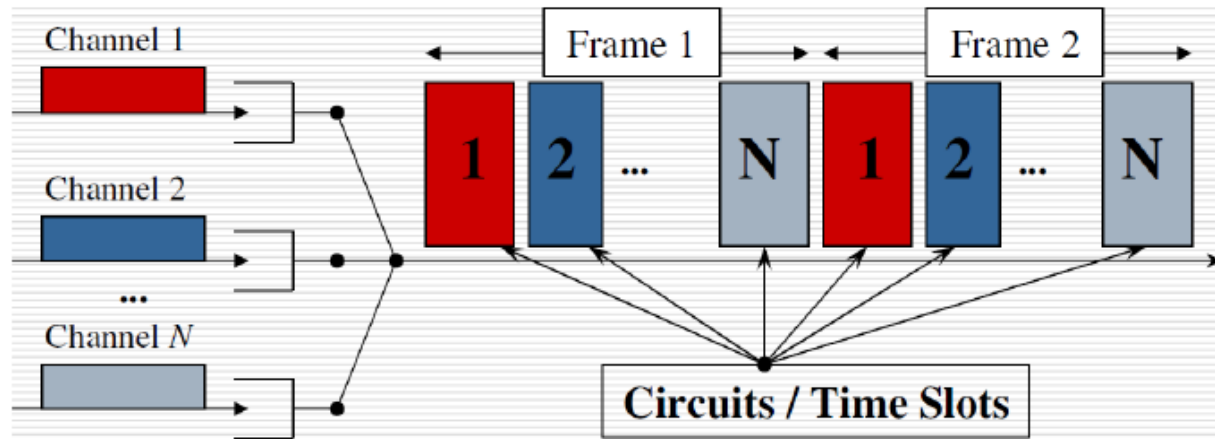
- Sur la fibre optique en sortie d'un central téléphonique, envoyer plusieurs communications sur la même bande de fréquence : Multiplexage synchrone



T_c : temps de transmission d'un échantillon

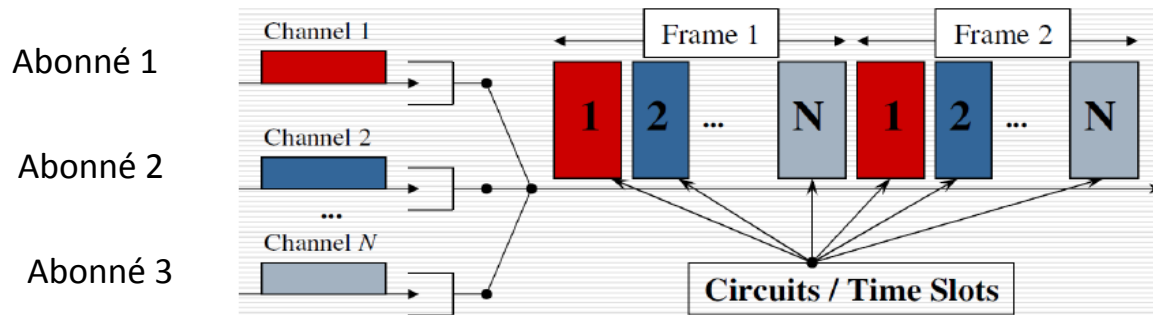
T : temps entre 2 échantillons de la même communication

TDM synchrone dans le réseau téléphonique



- Je prends une unité de temps. Ex: $T=T_e=125\mu s$
- Je divise cette durée en N intervalles. Ex: $N=10$
- Un intervalle (TS pour *time-slot*) a une durée $T_c=T/N=12.5\mu s$
- Tous les bits envoyés pendant un TS = 1 éch d'une communication
- Tous les bits envoyés pendant $T = 1$ trame
- **Le canal logique i , ou circuit i , ou voie i , occupera donc tous les i -èmes slots chaque trame**

TDM synchrone dans le réseau téléphonique : partage de débit



- Un canal correspond au signal sonore numérisé provenant d'un abonné : un échantillon de 8 bits est produit toutes les $T_e = 1/F_e = 1/8000 = 125\mu s$.
 - Ceci correspond à un débit par canal de 64Kbps.
 - **En sortie de CO, agréger N canaux signifie émettre N échantillons en $125\mu s$, donc $8N$ bits en $125\mu s$.**
- > le débit en sortie doit donc être $\geq N \cdot 64Kbps$
- La durée entre 2 échantillons du même canal ne change jamais (= T_e), le débit du câble de sortie détermine le temps mis pour envoyer les 8 bits d'un éch, et donc le nombre d'éch possibles en $125\mu s$, donc de canaux différents qui peuvent être *multiplexés*.

La commutation (pour problème P2)

- Différentes façon de résoudre P2.
- **Définition** : la commutation est un terme général désignant le mode de transfert de l'information, sous forme de signaux ou paquets, entre l'entrée et la sortie d'un équipement traversé.
- **Commutation spatiale** : la mise en relation entre l'entrée sur laquelle le signal arrive dans l'équipement et la sortie sur laquelle il est transféré se fait spatialement.



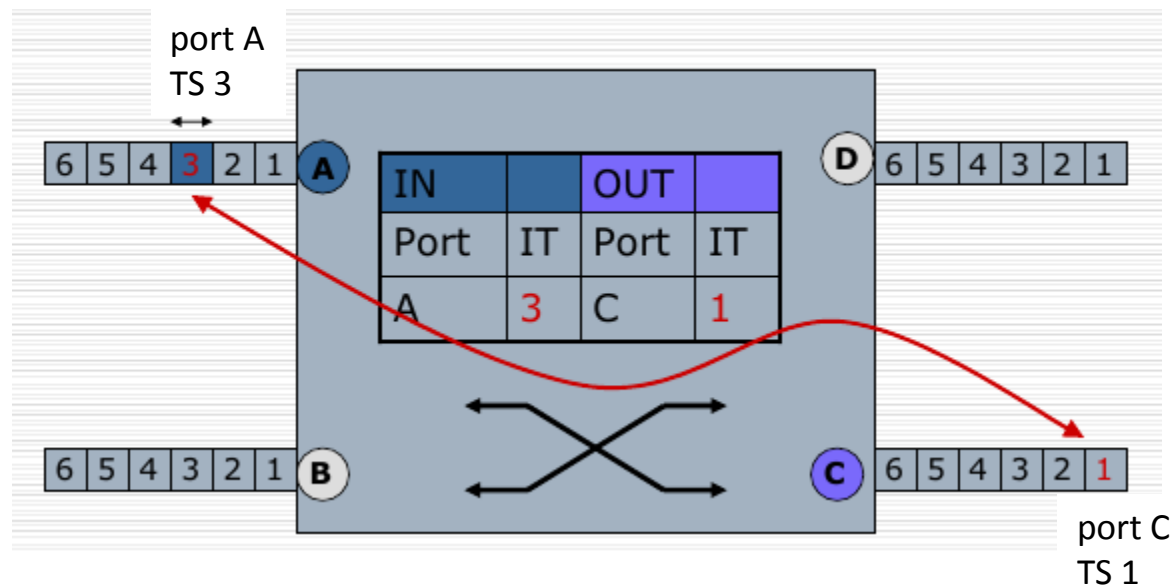
Opérateurs humains



Crossbar switch

La commutation temporelle

- **Commutation temporelle** : la mise en relation entre l'entrée sur laquelle le signal arrive dans l'équipement et la sortie sur laquelle il est transféré se fait temporellement.
- Un octet arrivant sur un certain numéro de TS dans la trame entrante est recopié sur un autre numéro de TS dans la trame sortante



La commutation de circuit

- **Commutation de circuit** : action d'établir l'équivalent d'un circuit électrique physique **dédié** entre 2 abonnés

Contraintes
d'une com. tél.

- --> le débit disponible est constant
- --> le délai d'attente dans les équipements est nul

- 2 solutions pour la réalisation de la commutation de circuit :
 - par commutation spatiale : une continuité électrique est établie (d'où le nom)
 - par commutation temporelle : avec **réservation** d'un TS dans chaque trame en sortie d'un commutateur pour une communication téléphonique

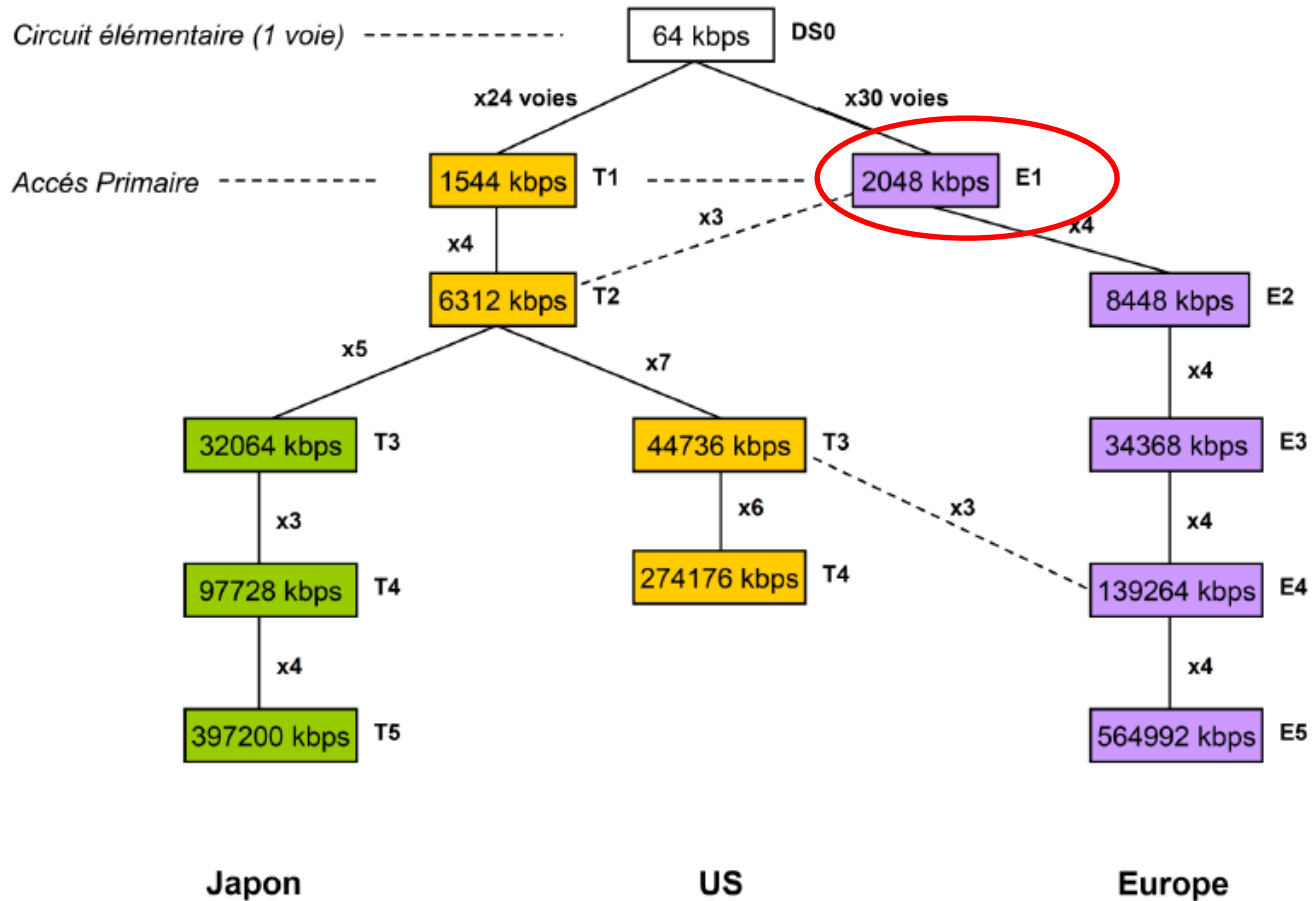
RTC : analogique (spatiale) à numérique (temporelle)

- Quand le cœur du réseau a été numérisé dans les années 1960, le multiplexage temporel a été introduit, ce qui a permis l'utilisation de débits plus élevés et donc une meilleure utilisation des infrastructures physiques.
- Et la commutation spatiale a été remplacée par la commutation temporelle, permise par la numérisation (concept d'échantillons à envoyer successivement).

TDM et hiérarchie numérique

- Jonction : terme générique désignant un câble en sortie de CO, avec un débit élevé
- Multiplex (ou trame) d'ordre N : signal issu du multiplexage temporel de N canaux (N com. tél. numérisées)
- Les différentes valeurs de N présentes dans le réseau sont normalisées : hiérarchie PDH.

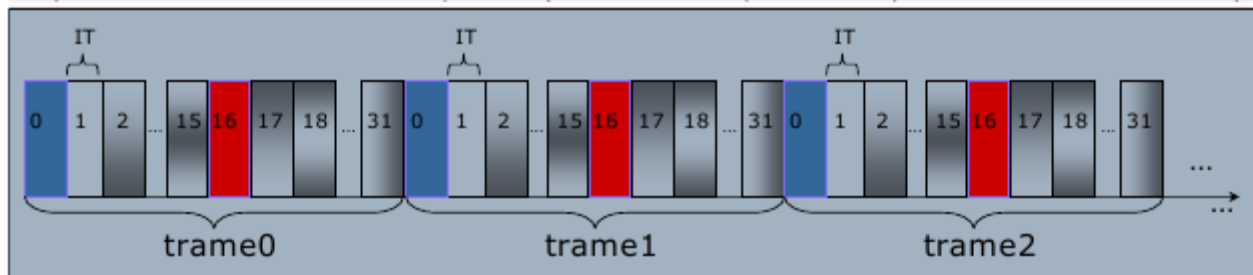
Plesiochronous Digital Hierarchy



Trame E1 = Jonction 2048 Kbps

- Multiplex de 32 voies de 64 Kbps :
 - 30 voies téléphoniques
 - +TS0 ou Mot de Verrouillage Trame (MVT) :
 - permet le repérage des IT dans les trames
 - +IT16 :
 - de la trame 0 contient les informations de supervision de la trame et de cadrage pour les multiplex d'ordre supérieur
 - des autres trames transporte la signalisation des communications (informations sur l'état du canal)

La trame E1



Plan général du cours

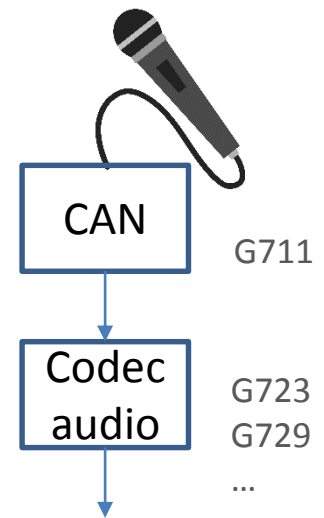
1. Historique et électronique du téléphone analogique
2. Numérisation de la voix humaine
3. Commutation et multiplexage
4. Voix sur IP : challenges et solutions

Du RTC vers le tout IP

- « Orange a engagé la modernisation de son réseau de téléphonie fixe en France afin de prendre en compte l'évolution des usages, de la technologie et donc d'être en mesure d'assurer un service de qualité dans les années à venir.
- Le service de téléphonie historique qui s'appuie actuellement sur le réseau fixe historique appelé RTC (Réseau Téléphonique Commuté) va donc évoluer et s'appuyer sur la technologie IP devenue standard mondial, nous parlons de voix sur IP.
- Cette technologie IP est déjà utilisée, fin 2016, par plus de 27 millions de clients en France, tous opérateurs confondus (source ARCEP).
- A partir du 4ème trimestre 2018, en métropole, les nouvelles lignes téléphoniques fixes ne seront plus construites sur le Réseau Téléphonique Commuté (RTC) mais le seront sur la technologie Voix sur IP. Tous les opérateurs proposeront alors des offres commerciales adaptées.
- Le RTC continuera de fonctionner pour toutes les lignes existantes, la migration progressive vers la nouvelle technologie IP de ces lignes existantes ne devant commencer qu'à partir de fin 2023. »

Codecs audio de voix à bas débit

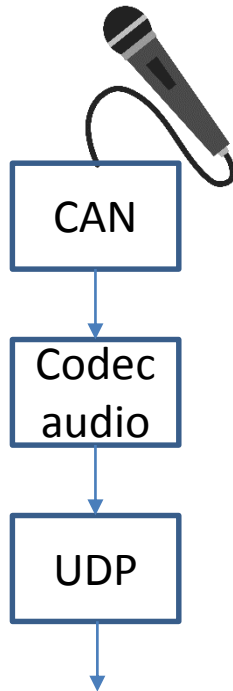
- Vocoders après le CAN: modifient les octets de PCM et leur rythme
 - > bit rate généré variable
- Différents encodeurs existent :
 - DPCM : encode la différence entre les échantillons successifs
 - ADPCM : avec en plus quantification adaptative
 - LPC : synthétise la voix par des filtres excités par entrées dépendant du type de phonème (voisé/non-voisé)
- Ont des caractéristiques différentes en :
 - complexité
 - qualité
- => choix du vocoder (du compromis) entre ces caractéristiques en fonction de l'application, du débit disponible



En plus de vocoder : détection de voix

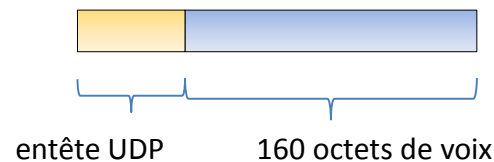
- Détecteurs d'activité de voix (VAD) détermine si le signal d'entrée est de la voix ou du bruit ambiant
 - Si du bruit est détecté, alors on n'envoie qu'une indication au récepteur pour lui indiquer de générer un bruit de confort

Voix sur IP : paquets



PCM (G711) : 64Kbits/s = 8000 Octets/s

Attente de 20ms : accumulation de 160 octets



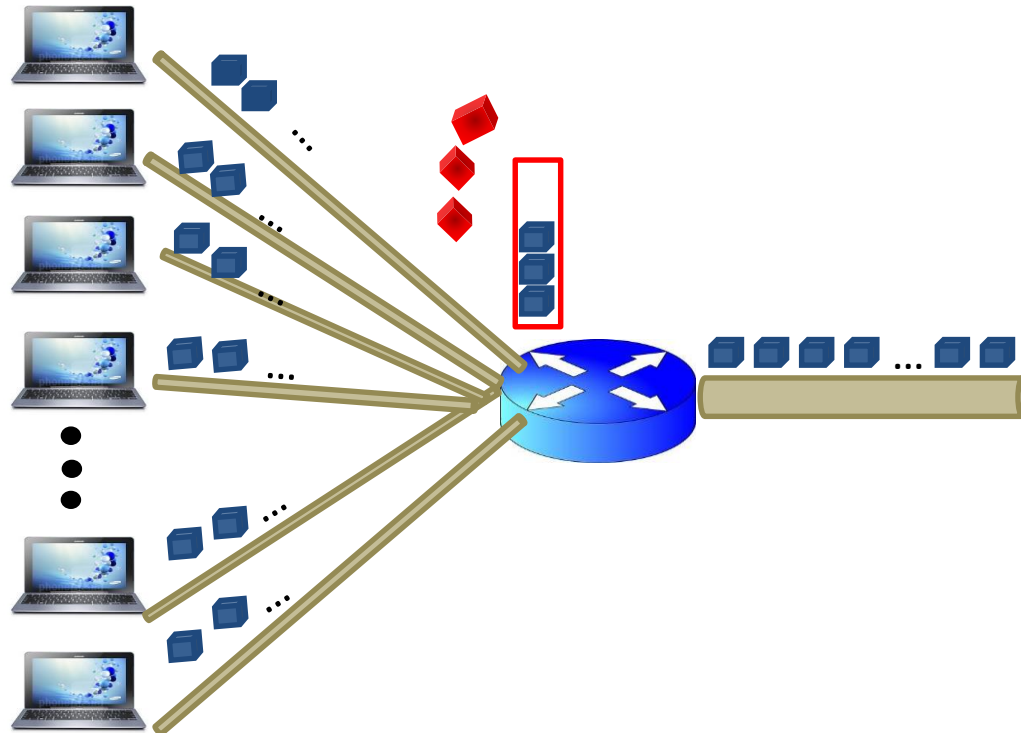
→ Quelle durée d'accumulation choisir ?

- Attente plus longue : meilleure utilisation du débit, délai augmente
- Attente moins longue : plus d'entêtes transmises, délai diminue

→ Pourquoi UDP ?

Problèmes pour le transport IP de la voix

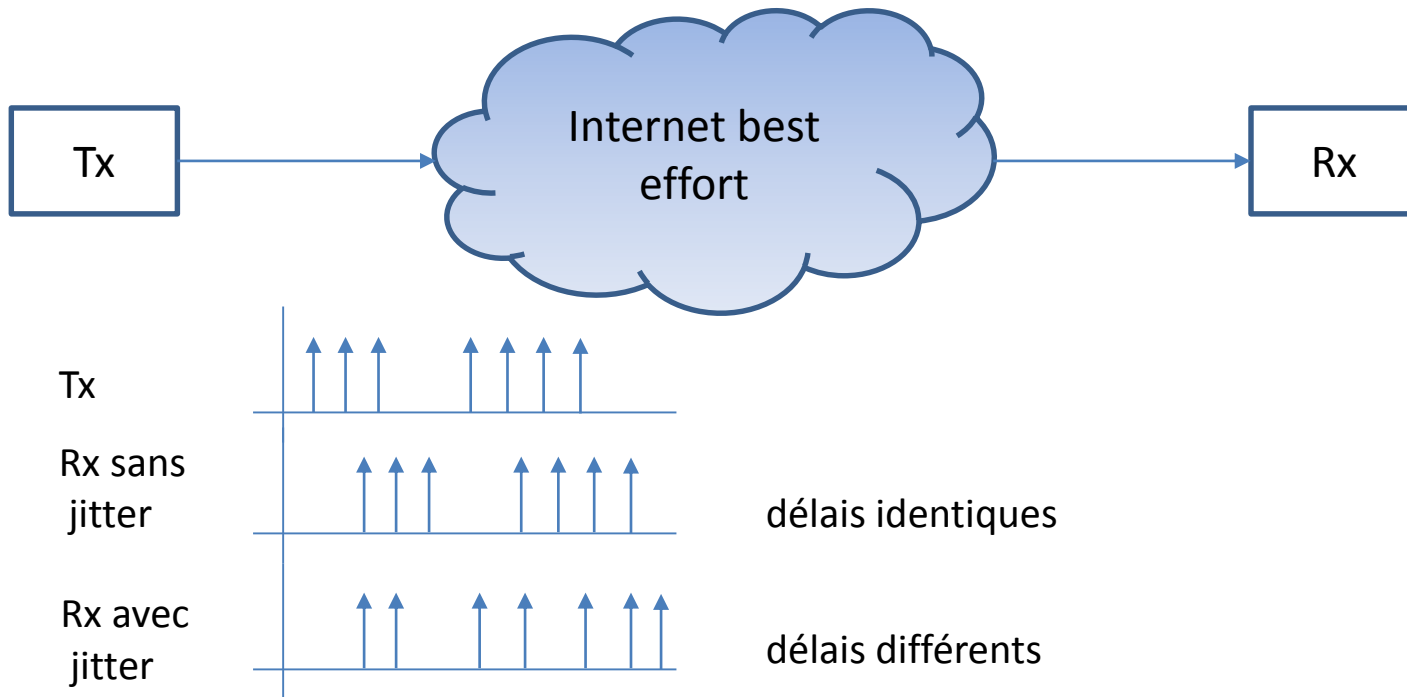
- **Hypothèse de départ** : Internet best effort, aucune garantie de qualité des opérateurs (contrairement au PSTN : **files d'attente** !)



Problèmes pour le transport IP de la voix

- **Hypothèse de départ** : Internet best effort, aucune garantie de qualité des opérateurs (contrairement au PSTN : **files d'attente** !)
- **Pertes de paquets** :
 - Mécanisme de retransmission inadapté => UDP (et pas TCP)
 - 10 à 20% de pertes de paquets peuvent être tolérées
 - FEC : peut corriger pertes sans retransmissions
- **Délai de bout en bout** :
 - Délai < 150ms pas perçu par les humains lors d'une interaction
 - 150 - 250ms peuvent être tolérées
- **Instabilité du délai (*delay jitter*)** :
 - Problème crucial
 - Différents paquets subissent différents délais
 - Due aux délais aléatoires d'attente aux routeurs

Delay jitter



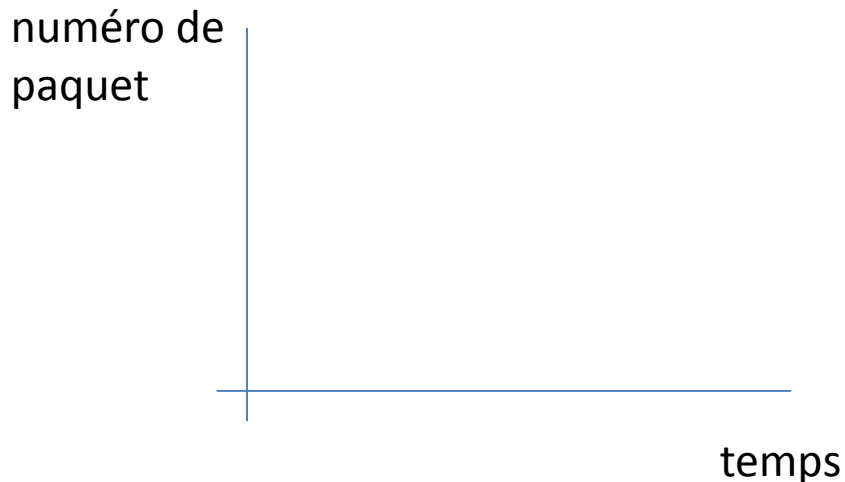
Le rythme avec lequel les paquets sont générés à l'émetteur est complètement perdu au récepteur

→ si joués ainsi, qualité de la voix très dégradée

Delay jitter

Comment éviter ce problème d'instabilité du délai ?

- avec un **buffer de lecture** stockant les paquets et les rejouant au rythme exact de génération



Algorithme de buffer de lecture fixe

- paquet i transmis à t_i , reçu à r_i , lu à l_i :

$$l_i = t_i + d_{max}$$

$$d_{i, \text{réseau}} = r_i - t_i$$

$$d_{i, \text{buffer}} = d_{max} - d_{i, \text{réseau}}$$

→ Comment connaître d_{max} ? Et s'il est trop grand ?

Algorithme de buffer de lecture adaptatif

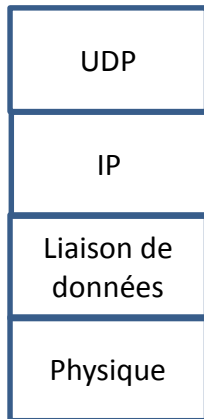
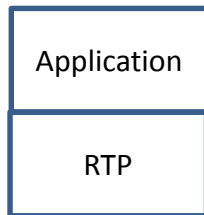
- On se fixe un délai max $d_{max,choisi}$
 - paquet i arrive à r_i :
 - si $r_i < t_i + d_{max,choisi}$: paquet i mis en file
 - si $r_i \geq t_i + d_{max,choisi}$: paquet i jeté
- => compromis entre délai et taux de pertes
- $d_{max,choisi}$ estimé et adapté en permanence
 - pour minimiser le taux de perte, mais aussi le délai

Informations nécessaires pour les algorithmes de buffer

- On a donc besoin de connaître l'instant de génération t_i de chaque paquet pour calculer $d_{max,choisi}$ au récepteur (qui connaît r_i)
- Pour savoir si un paquet a été perdu, il faut numéroter les paquets (numéro de séquence)

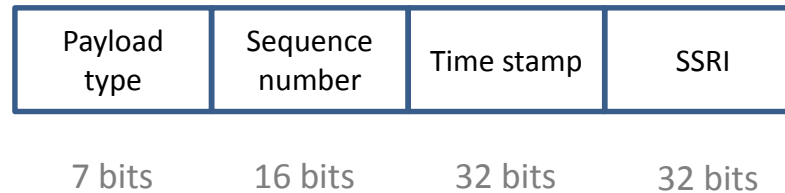
→ On a donc besoin de plus d'informations que ce qu'UDP met dans son entête : il faut un autre protocole de transport pour la VoIP : **RTP**

Real-time Transport Protocol



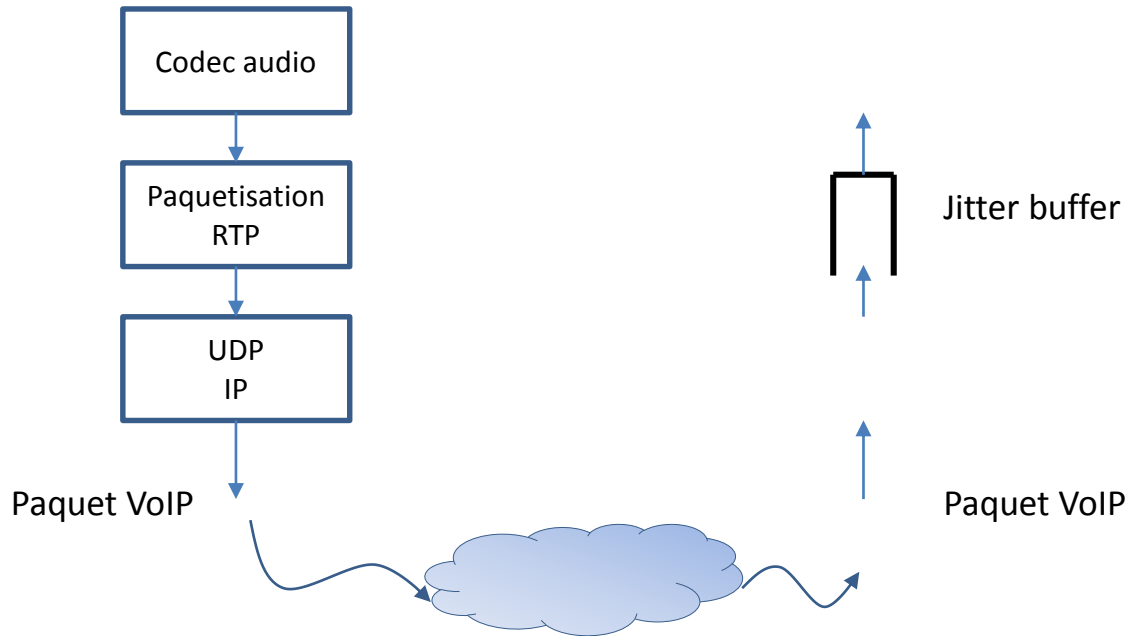
- RTP: fournit time-stamping et sequencing
- fait en général partie de l'application de VoIP, et utilise sockets UDP
- RTP ne fournit aucun mécanisme pour garantir la réception des paquets sans perte, dans un faible délai ou dans l'ordre
- RTP n'est pas vu par les équipements intermédiaires, seulement par les applications de VoIP aux extrémités

Entête RTP



- Payload type :
 - indique le codec utilisé pour l’audio (PCM, ADPCM, LPC) et la vidéo (MPEG1, MPEG2, MPEG4)
 - l’émetteur peut changer le codec pendant la transmission
- Sequence number :
 - incrémente de 1 à chaque paquet
 - utilisé pour détecter les pertes de paquet
- Time stamp :
 - instant d’échantillonnage du premier octet dans le paquet
 - utilisé pour corriger l’instabilité de délai (*delay jitter*)
- SSRI (Synchronization Source Identifier) :
 - identifie le flux RTP entre les hôtes – audio ou vidéo
 - choisi aléatoirement

Résumé du plan de donnée de la VoIP



- Plan de donnée : ensemble de paquets échangés pendant la transmission des données
- Plan de contrôle : ensemble de paquets pour le contrôle de la communication

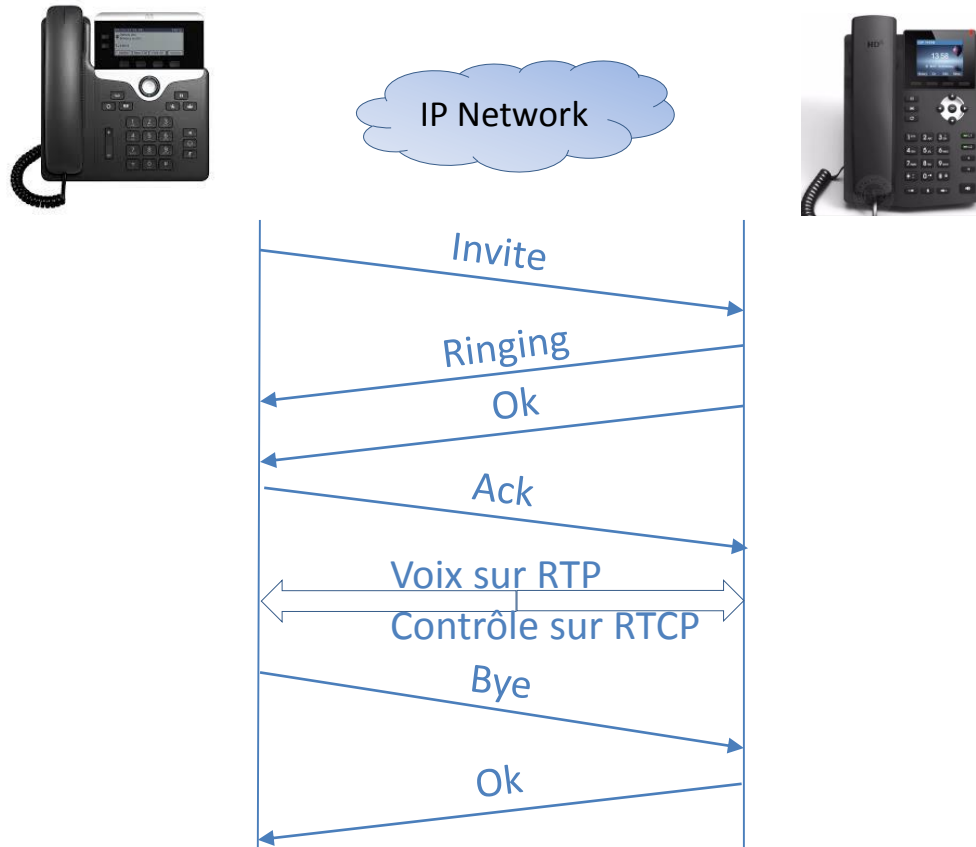
RTP Control Protocol : RTCP

- Paquets RTCP distribués à tous les participants (ex: avec multicast IP en IPTV d'opérateurs)
- Paquets RTCP contiennent des rapports de qualité :
 - nombre de paquets envoyés
 - nombre de paquets perdus
 - temps d'inter-arrivées (jitter)
- Ensuite l'application utilise ces informations de qualité comme elle le souhaite
 - exemple: change le type de quantification si le taux de perte de paquet indique une congestion sur le réseau

Mais comment entre t-on le numéro de destinataire?

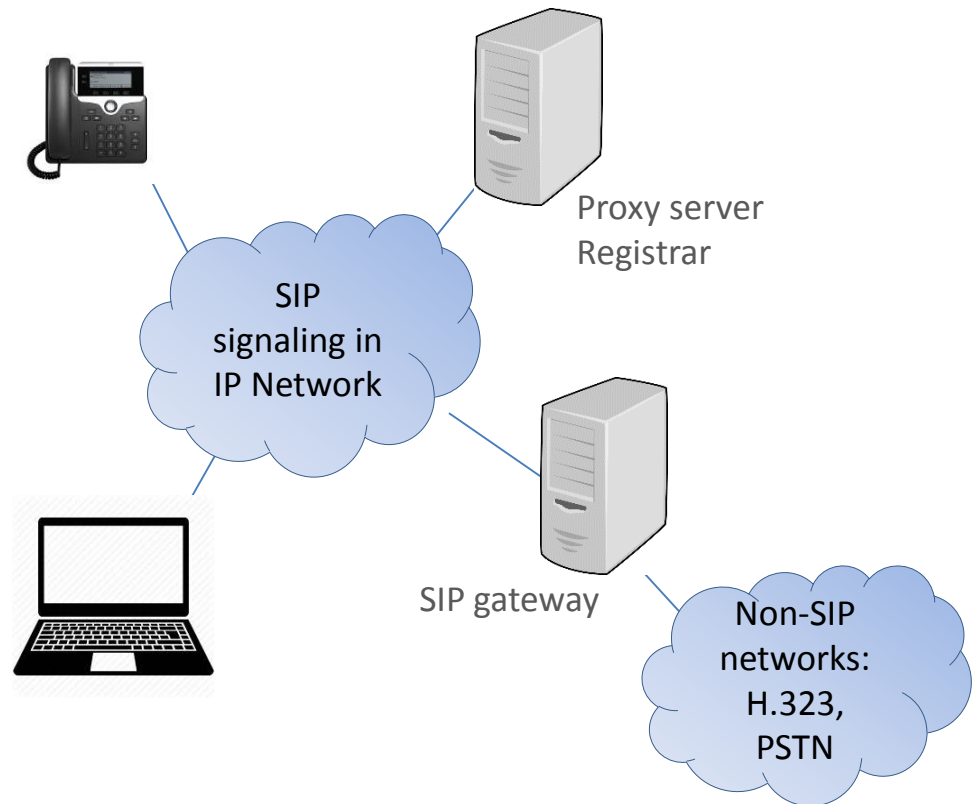
- Comment joindre la destination désirée :
 - c'est la signalisation
- Protocoles de signalisation pour la VoIP :
 - **Session Initiation Protocol (SIP)**
 - proposé par l'IETF
 - le plus répandu
 - H.323
 - proposé par l'ITU
 - moins utilisé

Un appel avec SIP

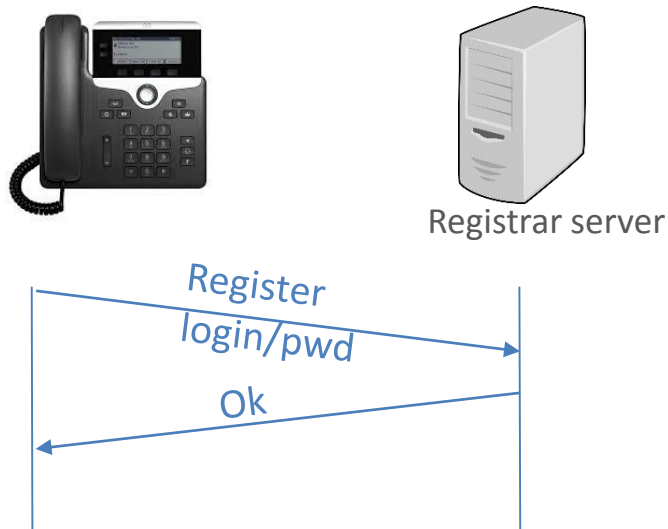


Composants et architecture pour SIP

- SIP User Agent (terminal)
- SIP Servers
 - Proxy server
 - Redirect server
 - Registration server
- SIP Gateway

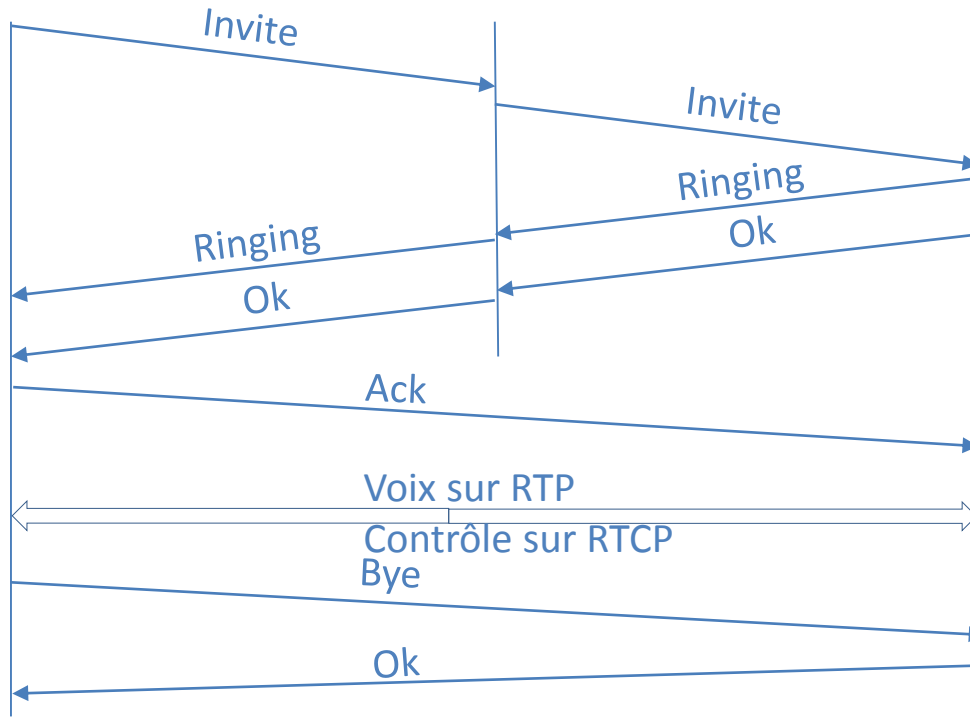


Enregistrement auprès du service de VoIP

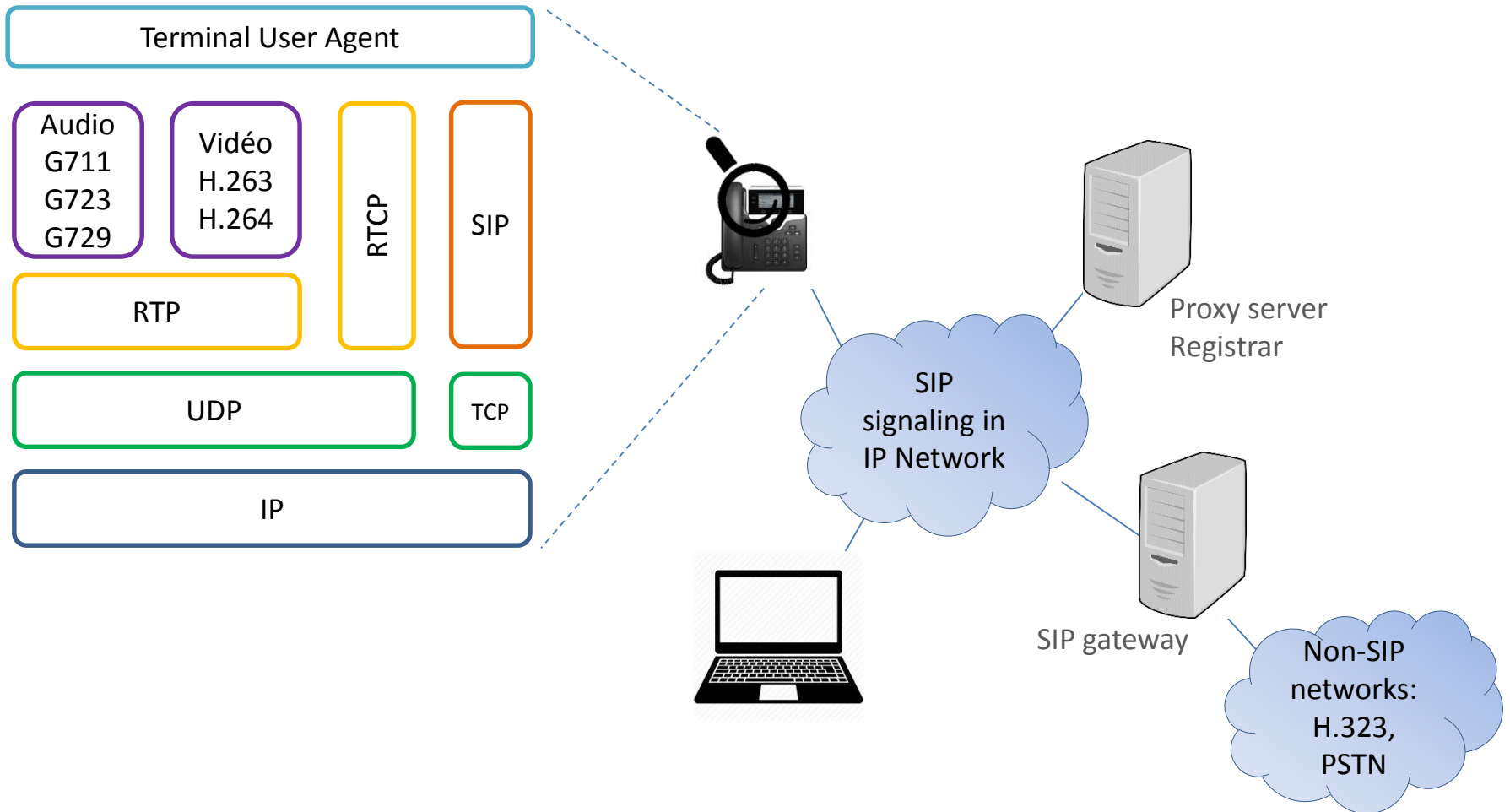


- Le téléphone doit avoir bonne @IP du registrar, bons login et password.
- Le server doit être configuré pour connaître ce login/pwd et savoir quel numéro de tél lui attribuer.

Un appel SIP à travers un server proxy



Récap'

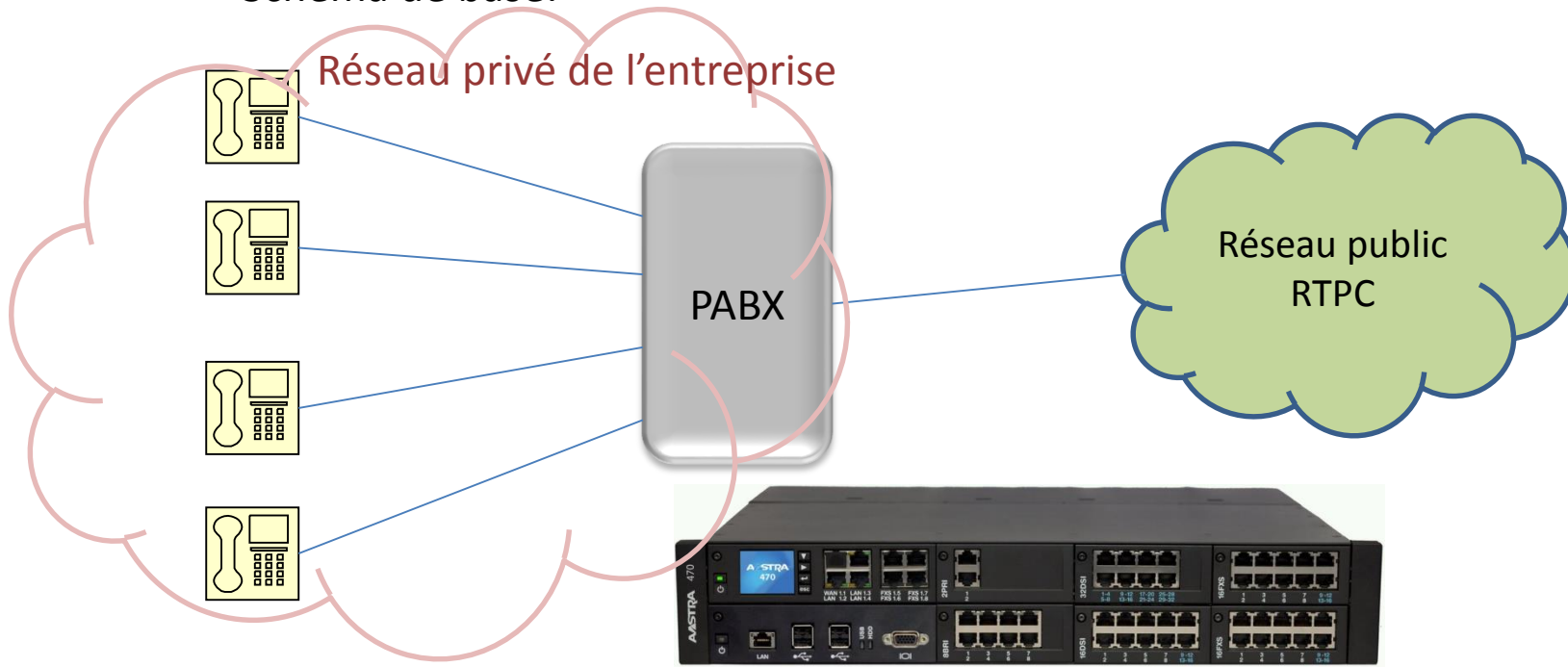


Et si on veut assurer la qualité ?

- Il faut réserver des ressources, comme en PSTN
- version QoS de SIP : QSIP

Fonctions d'un PABX

- **(Auto)Commutateur Privé**
- Private Branch Exchange (PBX)
- **Le PABX est le commutateur privé situé dans l'entreprise et assurant l'infrastructure nécessaire à un réseau téléphonique privé, indépendant du réseau public mais qui lui y est relié.**
 - Schéma de base:



IPBX (Internet-PBX)

- Dans le cas des PABX modernes, ceux-ci peuvent gérer les appels en les transformant en paquets IP.
- Un **IPBX** peut être un équipement à part entière ou un PC sur lequel tourne un programme « serveur IPBX » (par exemple l'application *Asterisk* en TP).



- **L'IPBX du réseau d'une entreprise est le serveur proxy ou registrar SIP si elle utilise SIP pour gérer son réseau VoIP.**
- Connecte :
 - Des téléphones IP utilisant un protocole non-propriétaire (comme SIP en TP)
 - Des téléphone IP propriétaires (protocole Astra en TP)
 - Des téléphones analogiques
 - Signaux analogiques -> le PABX numérise les signaux acoustiques (PCM)
 - Terminal offrant le moins de services téléphoniques
 - Des téléphones sans-fil (DECT)
 - Des téléphones logiciels (*softphones*), qui sont des petits programmes émulant un téléphone sur son PC
 -