

R316-ROM

Ingénierie de la téléphonie sur IP

Sami Evangelista
IUT de Villetaneuse
Département Réseaux et Télécommunications
2025–2026

<http://www.lipn.univ-paris13.fr/~evangelista/cours/R316-ROM>

Sources des images utilisées dans ce document:

<http://www-lipn.univ-paris13.fr/~evangelista/cours/credits.html>

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons "Attribution – Pas d'utilisation commerciale – Partage dans les mêmes conditions 3.0 non transposé".

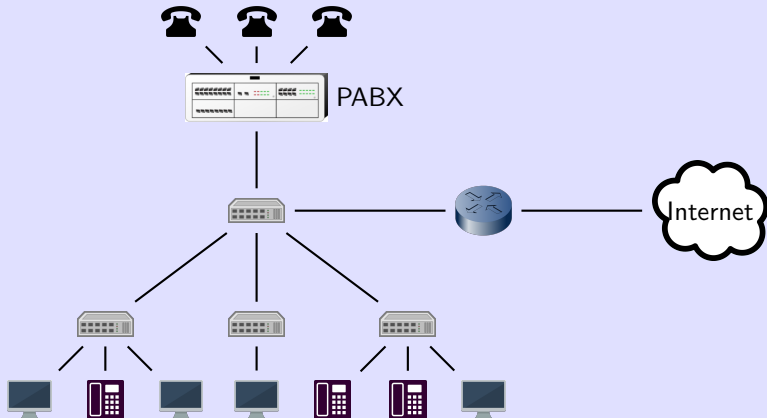


1. Introduction
2. Architectures et protocoles de ToIP
3. SIP : Établissement et libération de sessions
4. SIP et NAT
5. RTP et RTCP : Transport de la voix
6. Éléments de qualité de services

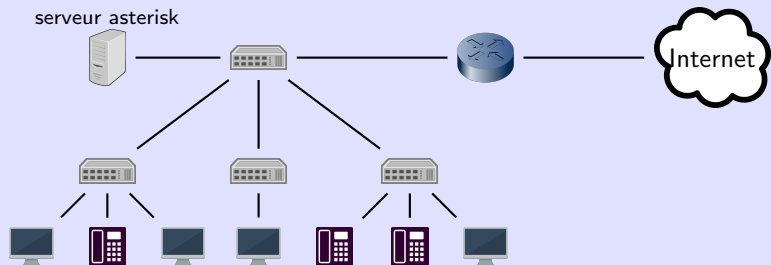
R316-ROM — Ingénierie de la téléphonie sur IP

- ▶ Objectif : étude des protocoles et mécanismes de qualité de service utilisés en téléphonie sur IP
- ▶ Organisation :
 - ▶ 6h de Cours/TD
 - ▶ 5 × 3h de TP
 - ▶ 1 × 2h de contrôle
- ▶ Évaluation : TP notés + contrôle

- ▶ ToIP = Telephony on IP
- ▶ Techniques de téléphonie qui utilisent uniquement le réseau IP (plus de réseau téléphonique).
- ▶ Équipements téléphoniques avec une pile TCP/IP.
- ▶ Avantages :
 - ▶ baisse des coûts (abonnements et communication)
 - ▶ simplification du câblage (un seul réseau avec un seul type de câble)
 - ▶ flexibilité :
 - ▶ mobilité des utilisateurs (grâce aux registres, voir plus loin)
 - ▶ travail à distance
 - ▶ facilité d'ajout/suppressions de lignes
- ▶ Inconvénients :
 - ▶ problèmes réseau : latence, baisse de la qualité de la communication
 - ▶ pas de service pendant une coupure électrique



- ▶ utilisation de téléphones analogiques (☎) et IP (☎)
- ▶ Tous les appels (entrants, sortants et en interne) transitent par le PABX.
- ▶ Rôles du PABX :
 - ▶ proxy et registrar SIP (voir plus loin)
 - ▶ passerelle VoIP (traduction flux analogiques ↔ flux numériques)



- ▶ plus de téléphones analogiques
- ▶ asterisk = logiciel libre, serveur SIP sous Linux
- ▶ Le serveur asterisk remplace le PABX.

1. Introduction
2. Architectures et protocoles de ToIP
3. SIP : Établissement et libération de sessions
4. SIP et NAT
5. RTP et RTCP : Transport de la voix
6. Éléments de qualité de services

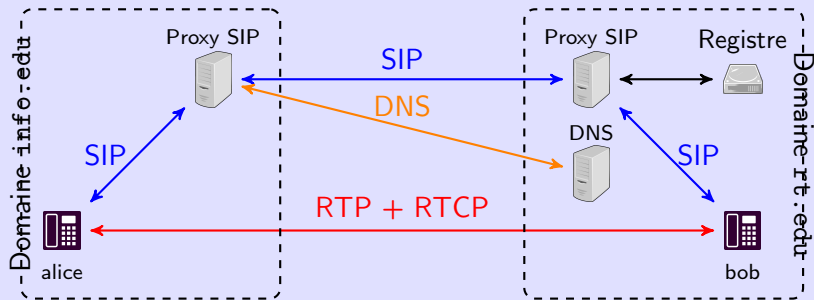
Participants :

- ▶ **UA** (User Agent) : logiciel ou équipement de téléphonie
- ▶ **Registrars** : les serveurs d'enregistrement des UA
- ▶ **Proxys SIP** : intermédiaires entre les UA
- ▶ **Serveurs DNS** : renseignent sur les proxys SIP de leur domaine

- ▶ UA = n'importe quel logiciel (linphone, ekiga, ...) ou téléphone IP qui comprend le protocole SIP.
- ▶ Pas skype, par exemple, car il utilise un protocole propriétaire.
- ▶ Un UA est identifié par son **URI** (Uniform Resource Identifier).
- ▶ forme générale d'une URI :
`sip:identifiant[:motdepasse]@où[:port] [?paramètres]`
- ▶ entre crochets : ce qui est optionnel
- ▶ Donc dans la forme la plus simple on a :
`sip:identifiant@où`
- ▶ où peut être :
 - ▶ l'IP ou le nom de l'UA
 - ▶ l'IP ou le nom de son proxy SIP
 - ▶ le nom du domaine de l'UA

- ▶ Les utilisateurs peuvent se connecter avec leurs UA sur différentes machines.
- ▶ Problème : comment retrouver son IP pour lui transmettre des appels ?
- ▶ La **registrar** maintient une base de données des localisations dans un **registre** sous forme de couples
(identifiant, IP + port)
- ▶ registrar = n'importe quel serveur qui traite les requêtes SIP **REGISTER** des UA
- ▶ Un registrar stocke uniquement les localisations de son domaine.

- ▶ proxy SIP : intermédiaires entre deux UA qui ne connaissent pas leurs localisations respectives
- ▶ Le proxy SIP consulte le registre de son domaine pour récupérer la localisation d'un UA appelé.
- ▶ Généralement, le proxy et le registrar sont une seule et même entité.



alice@info.edu passe un appel à bob@rt.edu

1. Établissement de la session

- ▶ utilisation de SIP entre les proxys et les UA
- ▶ Le proxy SIP de info.edu interroge le DNS de rt.edu pour avoir l'IP du proxy SIP de rt.edu.
- ▶ Le proxy SIP de rt.edu interroge son registre pour connaître la(es) localisation(s) actuelle(s) de bob.

2. Lors de l'appel

- ▶ transport du flux audio entre les deux UA avec RTP+RTCP

3. Libération de la session

- ▶ utilisation de SIP entre les proxys et les UA

- ▶ Dans le scénario précédent, on a vu qu'un proxy interroge un serveur DNS quand il doit relayer un message SIP au proxy d'un domaine, disons `rt.edu`.
- ▶ Dans ce cas, le DNS du domaine `rt.edu` doit définir (au moins) un enregistrement SRV ayant la forme suivante :
`_sip._prot SRV prio poids port nom-du-proxy-sip`
avec :
 - ▶ `prot` = protocole de transport utilisé par le proxy
 - ▶ `prio` = classe de priorité du serveur
 - ▶ `poids` = poids relatif du serveur dans sa classe de priorité
 - ▶ `port` = numéro de port sur lequel il faut contacter le proxy sip
- ▶ Quand un proxy voudra communiquer en UDP avec un proxy de `rt.edu`, il demandera les enregistrements SRV concernant `_sip._udp.rt.edu`.

Fichier de la zone rt.edu :

```
;;                priorité  poids  port  nom-du-proxy
_sip._udp SRV  1          2      5060  sip1
_sip._udp SRV  1          1      5060  sip2
_sip._udp SRV  2          1      6589  sip3
```

```
;;  adresses IP des trois serveurs
```

```
sip1 A  1.2.3.1
```

```
sip2 A  1.2.3.2
```

```
sip3 A  1.2.3.3
```

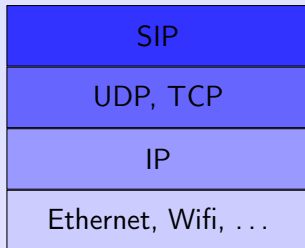
- ▶ Le domaine rt.edu a trois proxys SIP utilisant UDP : sip1, sip2 sur le port 5060 et sip3 sur le port 6589.
- ▶ sip1 et sip2 ont une priorité de 1 : c'est eux qu'il faut tenter de contacter en premier. Si aucun des deux ne répond, on contacte sip3.
- ▶ sip1 et sip2 ont la même priorité mais pas le même poids. Les poids relatifs indiquent que dans 2 cas sur 3 il faut contacter sip1 et dans 1 cas sur 3 il faut contacter sip2.

- ▶ Dans l'exemple précédent on a vu qu'un enregistrement SRV permet de découvrir l'identité d'un serveur SIP.
- ▶ Ce type d'enregistrement a été créé pour découvrir n'importe quel type de service proposé sur un domaine.
- ▶ Par exemple, si l'administrateur du domaine veut rendre visibles deux serveurs HTTP et FTP, il peut rajouter dans le fichier de zone :

```
;;                priorité  poids  port  nom de la machine
_http._tcp  SRV  1      1     80   www
_ftp._tcp   SRV  1      1     21   ftp
```

1. Introduction
2. Architectures et protocoles de ToIP
3. SIP : Établissement et libération de sessions
4. SIP et NAT
5. RTP et RTCP : Transport de la voix
6. Éléments de qualité de services

- ▶ SIP = Session Initiation Protocol
- ▶ première version de SIP dans la RFC 3261 (juin 2002)
- ▶ protocole de signalisation pour l'établissement/libération de sessions interactives entre utilisateurs
- ▶ utilisé en téléphonie et plus généralement pour les communications multimédias
- ▶ port par défaut = 5060
(utilisé par tous les équipements SIP : UA, proxys, registrars)
- ▶ pile protocolaire :



- ▶ (En général c'est plutôt de l'UDP au niveau transport.)

- ▶ structure similaire aux messages HTTP
- ▶ Requêtes et réponses ont le même format :
 - ▶ 1 ligne avec
 - ▶ pour une requête : le type de la requête
 - ▶ pour une réponse : le code d'état
 - ▶ N ligne(s) d'en-tête avec différents champs
 - ▶ 1 ligne vide qui marque la fin de l'en-tête
 - ▶ un corps

Les types les plus utilisés :

- ▶ **INVITE** = demande d'initiation d'une session
- ▶ **ACK** = confirmation des paramètres d'une session
- ▶ **REGISTER** = enregistrement de sa localisation auprès d'un registrar
- ▶ **BYE** = fin d'une session (\Leftrightarrow un des UA raccroche pendant l'appel)
- ▶ **CANCEL** = annulation d'une session (\Leftrightarrow l'appelant raccroche avant que l'appelé ne décroche)

Les codes les plus utilisés :

- ▶ 1xx = Messages d'information
 - ▶ 100 = trying
 - ▶ 180 = ringing
- ▶ 200 = OK
- ▶ 3xx = Messages de redirection
 - ▶ 301 = moved permanently (identifiant demandé n'est plus dispo.)
 - ▶ 302 = moved temporarily
- ▶ 4xx = Erreur client
 - ▶ 401 = authorisation requise (p.ex., un registrar refuse l'enregistrement)
 - ▶ 404 = utilisateur inexistant
 - ▶ 486 = utilisateur occupé
- ▶ 5xx = Erreur serveur
 - ▶ 500 = erreur interne
 - ▶ 503 = service non disponible (p.ex., serveur surchargé)

- ▶ Chaque champ de l'en-tête a la forme **Champ: Valeur**.
- ▶ Champs principaux pour les messages INVITE :
 - ▶ **From** — URI de l'appelant
 - ▶ **To** — URI de l'appelé
 - ▶ **Call-Id** — id. d'un appel
 - ▶ **User-Agent** — type de l'UA
 - ▶ **Via** — liste des UA/Proxys par lequel le message est passé (IP + ports)
 - ⇒ **La réponse au message suivra ce même chemin.**
 - ▶ **Content-Type** — type MIME du contenu
 - ▶ **Max-Forwards** — nombre max. de proxys par lesquels un message peut transiter (⇒ permet d'éviter les boucles)

- ▶ Le corps du message est optionnel.
- ▶ Il contient le descriptif des paramètres de la session :
 - ▶ **IP + port à utiliser pour le flux RTP**
 - ▶ medias souhaités pour la communication
 - ▶ codecs disponibles
 - ▶ paramètres des codecs
 - ...
- ▶ On le trouve principalement dans
 - ▶ un message INVITE (param. fournis par l'appelant)
 - ▶ un message OK envoyé en réponse à un INVITE (param. fournis par l'appelé)
- ▶ Il peut être au format HTML ou SDP (Session Description Protocol).

```
1 INVITE sip:411@ideasip.com SIP/2.0
2 CSeq: 1 INVITE
3 Via: SIP/2.0/UDP 194.254.173.6:5060
4 Via: SIP/2.0/UDP 157.12.54.87:5060
5 Via: SIP/2.0/UDP 54.21.4.7:5060
6 User-Agent: Ekiga/4.0.1
7 From: <sip:sami@194.254.173.6>
8 Call-ID: 54d5b754-cdbe-e611-885f
9 To: <sip:411@ideasip.com>
10 Content-Length: 458
11 Content-Type: application/sdp
12 Max-Forwards: 70
13
14 v=0
15 o=- 1481542778 1 IN IP4 194.254.173.6
16 s=Ekiga/4.0.1
17 c=IN IP4 194.254.173.6
18 t=0 0
19 m=audio 54678 RTP/AVP 116 0 8 101
20 a=sendrecv
21 a=rtpmap:116 Speex/16000/1
22 a=rtpmap:8 PCMA/8000/1
23 a=rtpmap:101 telephone-event/8000
24 a=fmtp:101 0-16,32,36
25 ...
```

En-tête (lignes 1 à 12)

ligne 1 — ligne de requête avec type de la requête, URI de l'appelé et num. de version SIP

lignes 3–5 — le INVITE a été émis par l'UA 194.254.173.6:5060. Il est ensuite passé par les proxys 157.12.54.87:5060 et 54.21.4.7:5060

lignes 7–9 — URI de l'appelant et de l'appelé

ligne 11 — format du contenu du message = SDP

Corps (lignes 14 et suivantes)

ligne 17 — IP à utiliser pour le flux RTP = 194.254.173.6

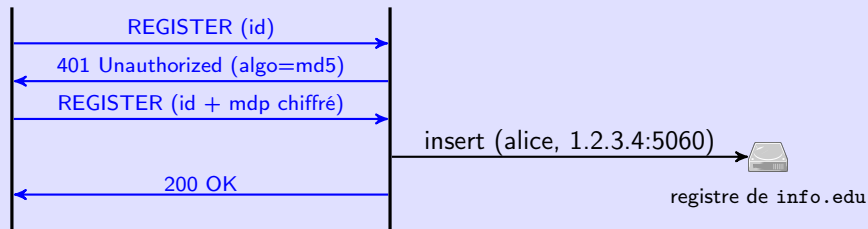
ligne 19 — port UDP à utiliser pour le flux RTP = 54678

ligne 20 et suivantes — autres info. RTP (media utilisés, codecs, ...)

- ▶ `alice@info.edu` s'enregistre auprès de son registrar
- ▶ Quand a lieu l'enregistrement ? À l'ouverture du softphone, au branchement du téléphone IP, ...

alice sur 1.2.3.4

registrar de info.edu



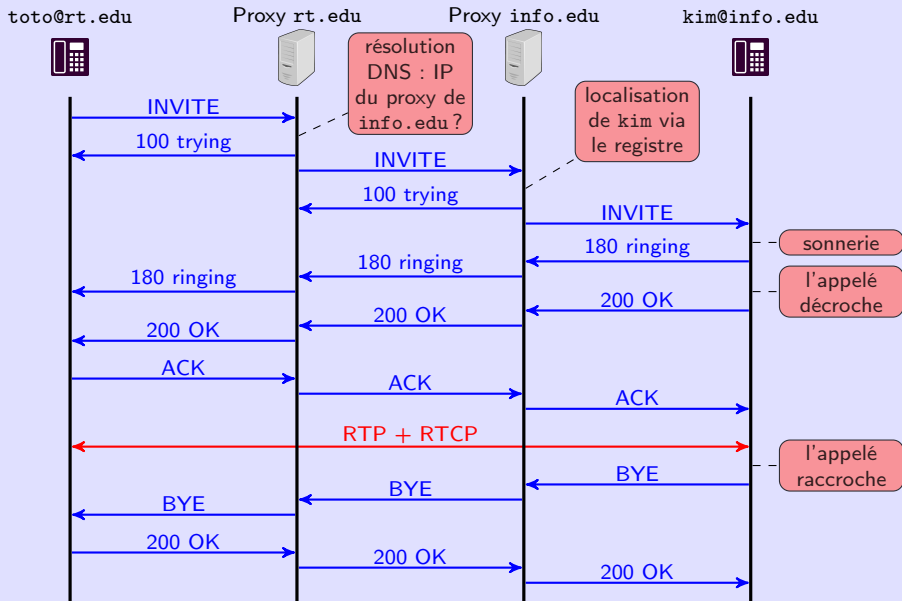
- ▶ Un 1^{er} message REGISTER contient l'identifiant.
- ▶ Le serveur refuse et envoie un algo de chiffrement (md5 ici).
- ▶ Un 2^{ème} message REGISTER contient identifiant + mot de passe crypté.

- ▶ toto@1.2.3.4 appelle kim@2.3.4.5

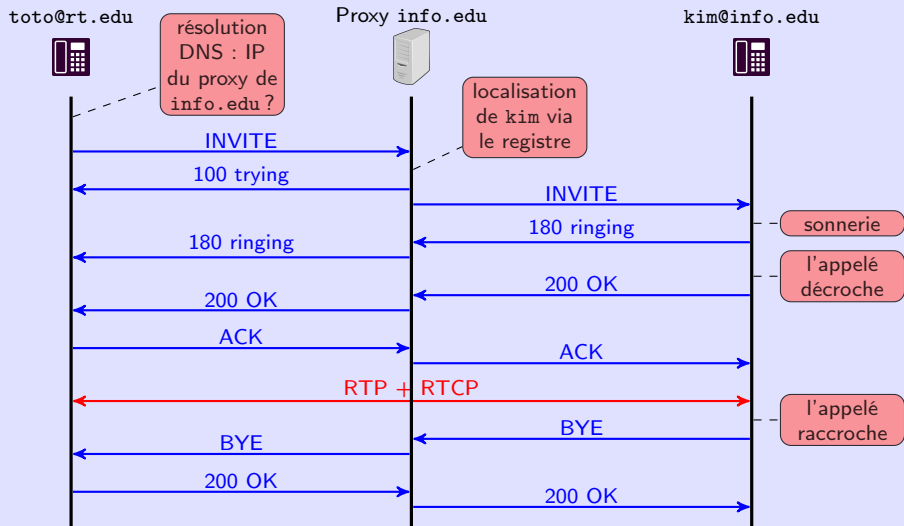
(Pas nécessaire de passer par un proxy si on a l'IP de l'UA destinataire.)



- toto@rt.edu appelle kim@info.edu en passant par son proxy



- toto@rt.edu appelle kim@info.edu en contactant directement le proxy de info.edu

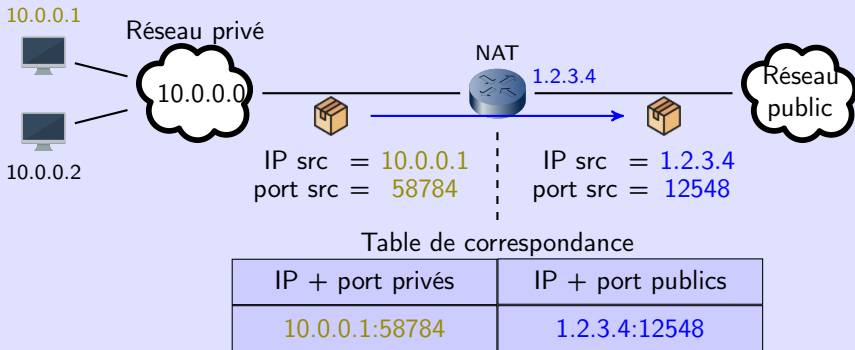


1. Introduction
2. Architectures et protocoles de ToIP
3. SIP : Établissement et libération de sessions
4. SIP et NAT
5. RTP et RTCP : Transport de la voix
6. Éléments de qualité de services

- ▶ NAT = Network Address Translation
- ▶ technique utilisée pour résoudre la pénurie d'adresses IP en séparant des réseaux privés (p.ex., à l'IUT) et le réseau public
- ▶ sur un réseau privé : IP privées inutiles sur le réseau public
- ▶ Plages des adresses privées :
 - ▶ 10.0.0.0/8
 - ▶ 172.16.0.0/12
 - ▶ 192.168.0.0/16
- ▶ Un réseau privé est derrière une passerelle NAT (généralement la passerelle par défaut du réseau) qui fait la translation entre les deux types d'adresse.
- ▶ L'interface de la passerelle qui la relie à l'extérieur a une IP publique.

1 Pour les paquets sortants, la passerelle :

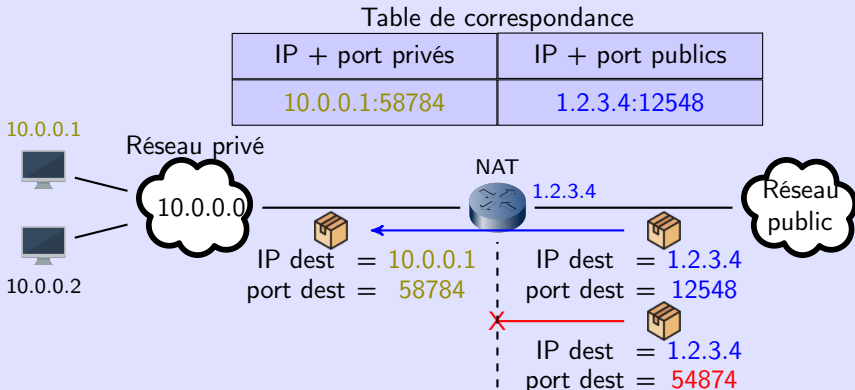
- 1.1 modifie l'IP et le port source (privés) par son IP publique et par un nouveau numéro de port qu'elle choisit (p.ex., aléatoirement dans une plage donnée) ;
- 2.2 et mémorise l'association (IP + port privés, IP + port publics) dans une table de correspondance.



2 Pour les paquets entrants, la passerelle cherche dans sa table.

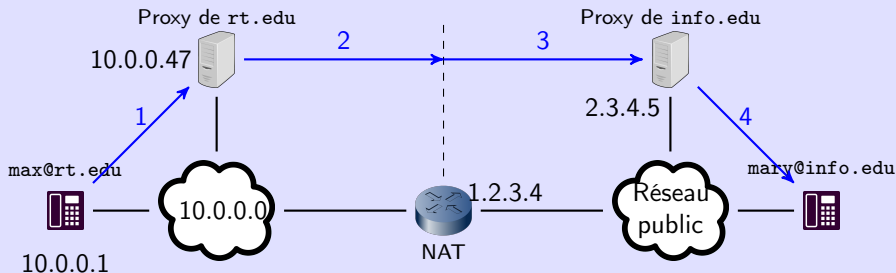
2.1 si association trouvée : IP et port destination modifiés

2.2 sinon : paquet jeté



- ▶ Certaines passerelles NAT ne font pas de translation de port : elles changent uniquement l'adresse IP.
- ▶ La sortie d'un paquet ouvre le port choisi par la passerelle.
- ▶ Les lignes de la table ont une durée de vie limitée (quelques minutes).
- ▶ La passerelle joue le rôle de filtre : elle
 - ▶ laisse entrer les paquets envoyés en réponse à des paquets sortis du réseau ;
 - ▶ et bloque les autres.
- ▶ Si un serveur se trouve sur le réseau privé et doit pouvoir être accessible depuis l'extérieur il faut rajouter statiquement une ligne dans la table.
 - ▶ Ex : l'administrateur ajoute (priv. = 10.0.0.2:80, pub. = 1.2.3.4:80) pour rendre le serveur web sur 10.0.0.2 accessible depuis l'extérieur.
opération possible sous Linux avec l'outil iptables (voir TP)

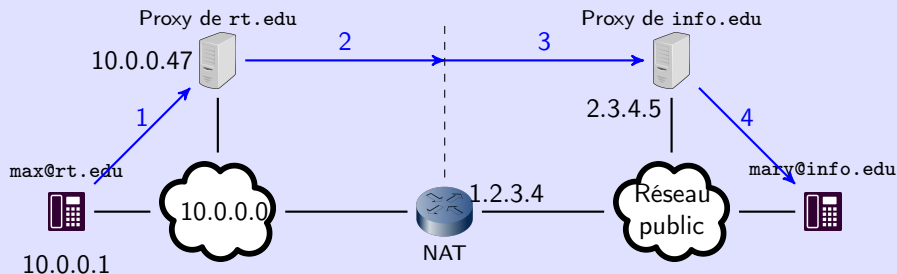
max.rt.edu appelle mary.info.edu.



- ▶ La passerelle ne modifie pas l'en-tête et le contenu SIP !
- ▶ Dans le message SIP Invite 3 :
 - ▶ source IP et UDP = 1.2.3.4:48789 (port choisi par la passerelle NAT)
 - ▶ Dans l'en-tête SIP : Via: 10.0.0.1:5060 et Via: 10.0.0.47:5060
 - ▶ Dans le corps SIP : IP + port pour le flux RTP = 10.0.0.1:8420
- ⇒ La réponse au INVITE ne pourra pas parvenir au proxy de rt.edu.
- ⇒ Même si la réponse au INVITE arrivait à max, le flux RTP envoyé par mary serait envoyé sur 10.0.0.1:8420

- ▶ L'exemple précédent montre qu'on doit résoudre deux problèmes :
 1. La réponse au INVITE doit arriver au proxy de `rt.edu`.
 2. Le flux RTP doit pouvoir arriver à max.
- ▶ Pour le problème 1 : utilisation de l'option `received/rport`.
- ▶ Pour le problème 2 : nombreuses solutions. Nous allons étudier STUN.

- ▶ Quand un proxy SIP va recevoir un INVITE, il :
 1. compare l'IP+port source à IP+port du dernier champ Via
 2. si \neq alors il y a un NAT entre les 2 \Rightarrow il rajoute à ce dernier champ Via
 - ▶ l'option received=<ip-source>
 - ▶ l'option rport=<port-source>
- ▶ Ce sont les valeurs des options received et rport qui seront utilisées pour la réponse au INVITE.

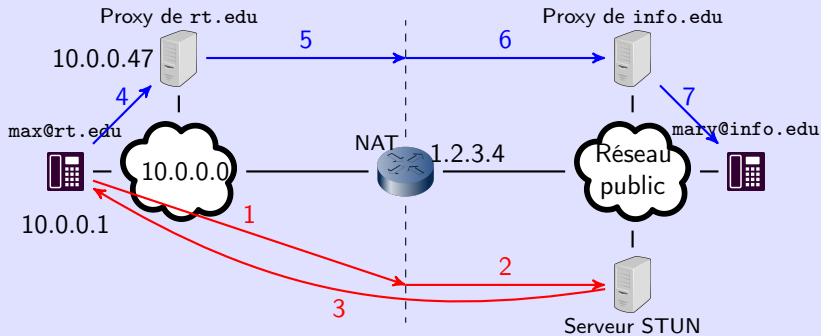


	IP + port sources	Champs Via (en-tête SIP)
1	10.0.0.1:5060	Via : 10.0.0.1:5060
2	10.0.0.47:5060	Via : 10.0.0.1:5060 Via : 10.0.0.47:5060
3	1.2.3.4:48789	Via : 10.0.0.1:5060 Via : 10.0.0.47:5060
4	2.3.4.5:5060	Via : 10.0.0.1:5060 Via : 10.0.0.47:5060 ;received=1.2.3.4 ;rport=48789 Via : 2.3.4.5:5060

Le proxy de `info.edu` pourra envoyer sa réponse à 1.2.3.4:48789.

- ▶ STUN = Simple Traversal of UDP through NAT
- ▶ Un serveur STUN permet au client de découvrir son IP et son port publics.
- ▶ On trouve plein de serveurs STUN libres d'utilisation sur Internet.
- ▶ Fonctionnement (simplifié) :
 1. Le client envoie un paquet UDP au serveur STUN.
 2. Le serveur STUN répond en plaçant dans sa réponse l'IP et le port du client.
- ▶ Remarques :
 - ▶ Le serveur STUN ne doit pas être sur le réseau privé du client.
 - ▶ L'IP et le port du client sont placés à l'intérieur du message STUN (⇒ non modifiés par le NAT lors du retour).
 - ▶ L'envoi du paquet STUN par le client permet d'ouvrir le port public alloué par le NAT.
 - ▶ STUN ne marche pas avec certains types de NAT : les NAT symétriques qui attribuent des ports publics en fonction de l'IP de destination.

- ▶ STUN va permettre à l'UA d'ouvrir un port UDP public pour le flux RTP.
- ▶ Le port et l'IP publics sont ensuite placés dans le corps du INVITE.



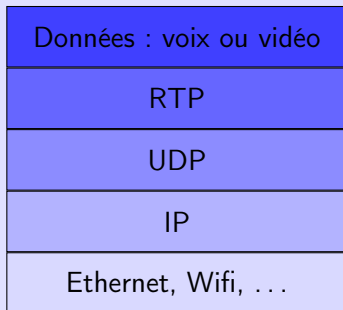
- 1 req. STUN — IP src = 10.0.0.1 et port src = 10000 (port RTP privé)
- 2 req. STUN — IP src = 1.2.3.4 et port src = 24045 (port RTP public)
- 3 rép. STUN — contenu : IP = 1.2.3.4 et port = 24045
- 4–7 INVITE — contenu SDP :

```
c=IN IP4 1.2.3.4
m=audio 24045 RTP/AVP 116 0 8 101
```

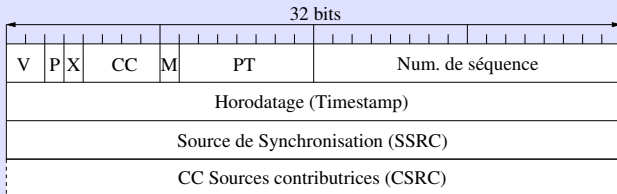
1. Introduction
2. Architectures et protocoles de ToIP
3. SIP : Établissement et libération de sessions
4. SIP et NAT
5. RTP et RTCP : Transport de la voix
6. Éléments de qualité de services

- ▶ Une fois l'appel initié, SIP n'est plus utilisé durant l'appel.
- ▶ C'est RTP qui va permettre de transporter le flux audio entre les deux UA.
- ▶ RTCP est utilisé en complément de RTP pour contrôler la qualité de la communication.
- ▶ RTCP fournit périodiquement un rapport aux UA.

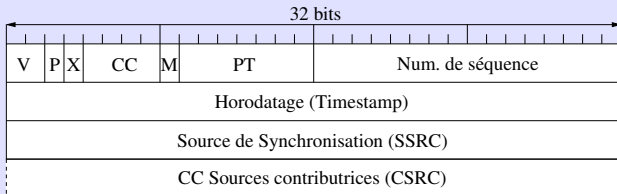
- ▶ RTP = Real-time Transport Protocol
- ▶ version initiale : janvier 1996 (RFC 1889)
- ▶ version actuelle : juillet 2003 (RFC 3550)
- ▶ utilisé par les applications ayant des contraintes temporelles fortes (téléphonie, vidéo, jeux vidéo, ...)
- ▶ pile protocolaire :



- ▶ Réordonancement des paquets.
 - ▶ Le réseau IP ne garantit pas que ordre de réception = ordre d'émission.
 - ▶ déséquencement en ToIP \Rightarrow mots restitués dans le désordre
- ▶ Synchronisation des flux vidéo et audio.
 - ▶ utilisation d'estampilles temporelles pour indiquer l'instant d'émission du paquet



- ▶ **V** (numéro de version) = 2 actuellement
- ▶ **P** (Padding) = 1 si octets de bourrage dans les données
 - ▶ si P = 1, le dernier octet des données donne le nb. d'octets de bourrage
- ▶ **X** = 1 s'il y a une eXtension d'en-tête (utilisée par certains codecs)
- ▶ **CC** (CSRC Count) = nombre de CSRC dans l'en-tête (0 en pratique)
- ▶ **M** (Marker) = signification dépendante du PT
- ▶ **PT** (Payload Type, 7 bits) = type du codec utilisé (ex : 80 pour le G711)
- ▶ **Num. de séquence** (16 bits) = compteur incrémenté de 1 entre chaque paquet. utilisé :
 - ▶ par RTP pour réordonner les paquets
 - ▶ et par RTCP pour compter les pertes



► **Timestamp** (32 bits) = estampille temporelle. utilisée :

- par RTP pour la synchronisation voix-image
- et par RTCP pour calculer la gigue.

L'unité pour l'estampille et la période d'échantillonnage. Par exemple :

- Avec la plupart des codecs on a une fréquence d'échantillonnage de 8kHz.
- Une estampille de 14 240 correspond à un temps de $\frac{7840}{8 \times 10^3} = 1.78$ s.

L'estampille du 1^{er} paquet RTP est généralement choisie aléatoirement.

► **SSRC** (Synchronisation SouRCe, 32 bits) = identifie la source de la synchronisation. Choisi aléatoirement.

► **CCSRC** (Contributing SouRCe, CC mot(s) de 32 bits) = identifient les sources contributrices (souvent CC = 0)

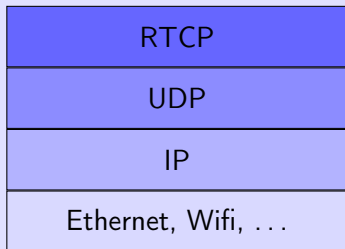
- ▶ Dans le cas d'un appel audio+vidéo on a 2 flux RTP sur 2 ports différents (⇒ chacun ouvert avec STUN ou équivalent si l'on a du NAT).
- ▶ C'est dans le corps du message INVITE que l'on précise les deux ports :
m=audio 49170 RTP/AVP ...
m=video 51372 RTP/AVP ...
- ▶ On utilise les estampilles temporelles des deux flux pour synchroniser la voix et l'image.

- ▶ C'est le codec le plus utilisé.
 - ▶ choix par défaut sur la plupart des équipements et logiciels de VoIP
 - ▶ normalisé par l'UIT-T (Union internationale des télécommunications) dans les années 1970
 - ▶ période d'échantillonnage de $125 \mu s$
 - ▶ 256 niveaux d'échantillonnage codés sur 8 bits
- ⇒ débit du codec = $\frac{8}{125 \times 10^{-6}} = 64 kb/s$

Quelques codecs de l'UIT-T avec leur MOS (Mean Opinion Score), une note moyenne entre 0 et 5 attribuée par un panel d'utilisateurs.

Codec	Débit (kb/s)	MOS
G711	64	4,1
G722	64	4,5
G726	32	3,85
G728	16	3,61
G729	8	3,92

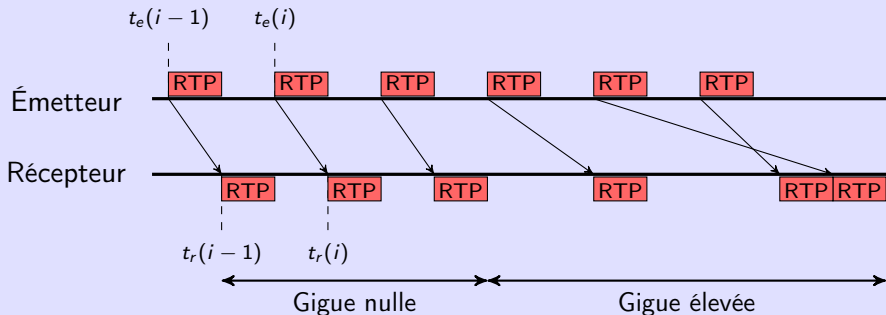
- ▶ RTCP = Real-time Transport Control Protocol
- ▶ défini dans les mêmes RFC que RTP
- ▶ toujours utilisé conjointement avec RTP
- ▶ permet aux UA de contrôler la qualité de la communication
- ▶ pile protocolaire :



- ▶ RTCP n'encapsule pas de données.

- ▶ Durant l'appel, les UA s'échangent périodiquement des **rapports** RTCP.
- ▶ Ces rapports fournissent des infos sur la qualité de la communication.
- ▶ Informations principales :
 - ▶ taux de perte (reconstitué à partir des Num. de séquence RTP)
 - ▶ gigue (voir mode de calcul plus loin)
- ▶ Le trafic RTCP ne doit pas occuper plus de **5%** de la bande passante de la session (trafic RTP + RTCP).

gigue = variation dans le temps d'acheminement des paquets



- ▶ $GI(i)$ = Gigue instantanée en i

$$GI(i) = |t_r(i) - t_r(i-1)| - |t_e(i) - t_e(i-1)|$$
- ▶ $G(i)$ = Gigue en i

$$G(i) = \frac{1}{16} \times GI(i) + \frac{15}{16} \times G(i-1)$$
 (moyenne mobile exponentielle de coefficient 1/16)

- ▶ Et les rapports RTCP, qu'en fait-on ?
- ▶ Ce sont aux UA d'interpréter ces rapports et de les traiter de manière adéquate.
- ▶ Par exemple :
 1. Durant une session audio+vidéo, les rapports RTCP montrent un taux de perte élevé.
 2. Hypothèse : pertes dues à une congestion du réseau.⇒ L'UA renégocie, pendant l'appel, les paramètres de la session en
 - 2.1 désactivant la vidéo
 - 2.2 utilisant un codec audio de moindre qualité
- ▶ Les paramètres de session (utilisation de la vidéo ou pas, codec audio à utiliser, ...) peuvent être renégociés lors d'une session par l'envoi d'un message SIP RE-INVITE.

1. Introduction
2. Architectures et protocoles de ToIP
3. SIP : Établissement et libération de sessions
4. SIP et NAT
5. RTP et RTCP : Transport de la voix
6. Éléments de qualité de services

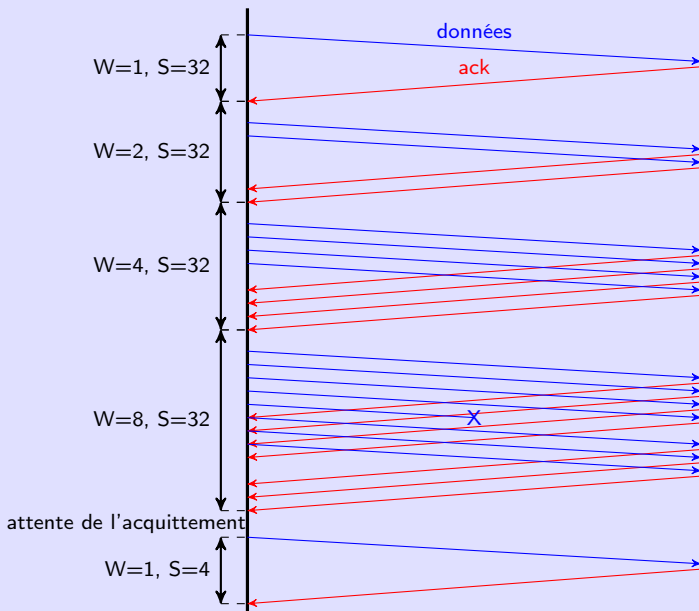
- ▶ Critères de qualité de service (QoS) les plus importants en ToIP :
 - ▶ gigue
 - ▶ causes : congestion du réseau, paquets suivant des chemins différents, ...
 - ▶ conséquences : variations dans le débit de la conversation
 - ▶ délai d'acheminement de bout en bout (délai entre l'instant de production d'un octet par l'UA émetteur et celui où il est restitué par l'UA récepteur)
 - ▶ délai max. pour une bonne qualité : 100 ms
 - ▶ délai max. tolérable : 300 – 500 ms
 - ▶ Au-delà de 500 ms, ce n'est plus du temps réel.
- ▶ Critères secondaires :
 - ▶ bande passante
 - ▶ faible débit requis pour transporter de la voix
 - ▶ fiabilité
 - ▶ faible perte de paquets acceptable (baisse temporaire de la qualité)
- ▶ Nous allons voir quelques mécanismes de QoS pour la ToIP :
 - ▶ aux extrémités (sur les UA) : choix d'UDP vs TCP pour RTP, utilisation de mémoires tampon
 - ▶ dans le réseau : mécanismes de QoS

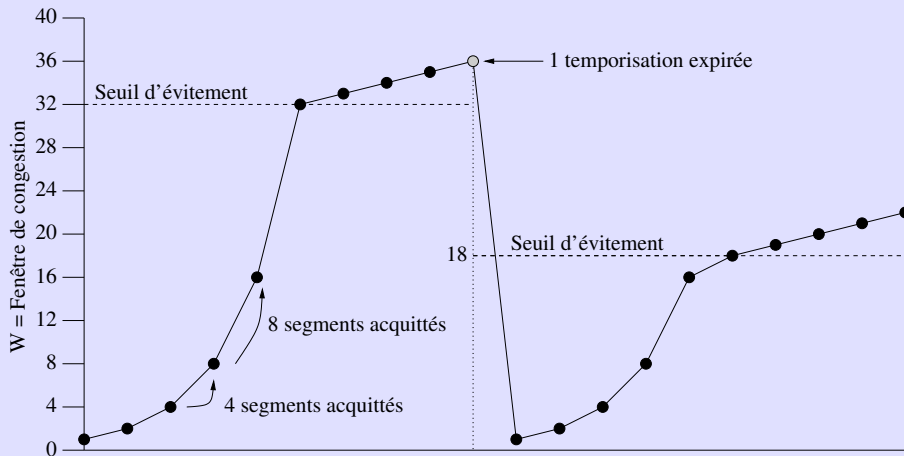
UDP est plus adapté pour les applications temps-réel :

- ▶ en-tête de 8 o. pour UDP vs 20 pour TCP
- ▶ temps de traversée de la couche TCP $>$ temps de traversée de la couche UDP \Rightarrow augmentation du délai d'acheminement de bout en bout avec TCP
- ▶ L'algorithme de contrôle de la congestion de TCP diminue radicalement le débit d'envoi en cas d'erreur \Rightarrow le récepteur est alors en situation de "famine", en attente de données RTP.
- ▶ Les mécanismes de correction d'erreur avec envoi d'acquittements peuvent introduire des délais supplémentaires.
- ▶ L'avantage de TCP est la correction des erreurs mais dans le cas de la voix nous avons vu que celles-ci ne sont pas si graves.

- ▶ en situation de congestion :
 - ▶ Les mémoires des routeurs sont saturées (modèle du seau percé).
 - ▶ Les routeurs détruisent les paquets qu'ils ne peuvent plus mémoriser.
 - ⇒ Lorsque la couche TCP envoie un paquet, aucun acquittement n'est reçu.
- ▶ Mais la congestion n'est pas la seule cause possible à la non réception d'un acquittement. Autre cause possible : erreur de transmission (même si la probabilité est faible).
- ▶ Principe du contrôle de la congestion de TCP :
 - ▶ Si un paquet n'est pas acquitté (dans les temps), c'est parce qu'il y a de la congestion.
 - ▶ Pour réduire la congestion, TCP va réduire radicalement le débit avant de le réaugmenter progressivement.

- ▶ TCP utilise deux variables pour contrôler la congestion :
 - ▶ W : fenêtre de congestion = nb. max de segments que l'on peut envoyer en rafale (sans acquittement).
 - ▶ S : seuil d'évitement de la congestion
- ▶ au début de la connexion, $W = 1$ et $S =$ paramètre de l'OS (généralement 32 ou 64)
- ▶ quand tous les segments de la fenêtre sont acquittés :
 - ▶ si $W < S \Rightarrow W = \min(S, 2 \times W)$
 - ▶ si $W \geq S \Rightarrow W = W + 1$
- ▶ quand un segment n'est pas acquitté à temps :
 - ▶ $S = W/2$
 - ▶ $W = 1$





2 tampons (zones mémoire) sont utilisés par les UA :

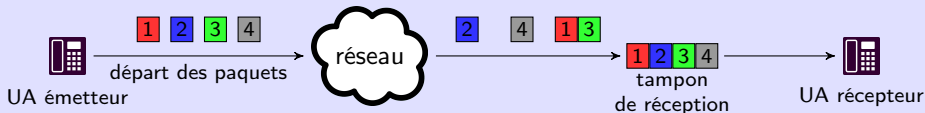
- ▶ en émission
- ▶ en réception



- ▶ Son utilité : grouper les octets produits par le codec pour les envoyer en blocs.
- ▶ Quelle doit être sa taille (= taille des données RTP émises) ?
 - ▶ trop petit \Rightarrow mauvaise utilisation de la bande passante
 - ▶ trop grand \Rightarrow augmente le délai d'acheminement de bout en bout
- ▶ Cette taille est donc un compromis entre le taux d'utilisation de la bande passante et l'augmentation du délai d'acheminement.
- ▶ En pratique, on utilise des tampons de 100–500 o., ce qui correspond à environ 10–60 ms. de voix avec le G711.

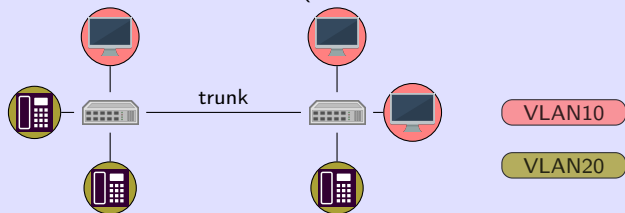
► Son utilité :

- compenser la gigue
- corriger les déséquilibrés



- À l'arrivée du 1^{er} paquet dans le tampon (2 dans notre exemple), le récepteur déclenche une temporisation.
- Les paquets sont placés dans le tampon selon leurs num. de séquence RTP.
- Le contenu du tampon est ensuite restitué à l'UA récepteur
 - dès qu'il est plein ;
 - ou dès que la temporisation arrive à expiration (les paquets arrivant trop tard sont considérés comme perdus).

- ▶ VLAN = réseaux locaux virtuels
- ▶ Permet de segmenter un réseau physique en plusieurs réseaux logiques.
- ▶ Exemple : un réseau avec 2 VLAN (10 = données et 20 = téléphonie).



- ▶ Quel intérêt pour la ToIP ? Donner une priorité aux flux
- ▶ priorité = 3 bits de l'étiquette de VLAN visible sur les liaisons trunk :

DA 6 o.	SA 6 o.	Id de prot. 2 o.	Pri. 3 bits	DEI 1 bit	VLAN-id 12 bits	DL/EType 2 o.	Données + Bourrage 46-1 500 o.	FCS 4 o.
← étiquette de 4 octets →								

- ▶ Les switches retransmettent les trames par priorité décroissante.
- ▶ On peut attribuer une priorité de 7 pour le VLAN 20 et 1 pour le VLAN 10.
- ⇒ Si la liaison entre les deux switches est engorgée par un transfert de données, les paquets RTP seront tout de même retransmis.
- ▶ Voir le TP 3.