

Le protocole IP v6 Internet Protocol Version 6

- 1981 : RFC IPv4
- Au début gaspillage important d'adresse : par exemple assignation d'une classe A à une entreprise
- 1993 : épuisement des classes B
- Prévission de saturation pour 1994 !
- Naissance de IPv6 en 1996
- Finalisation dans la RFC 2460 en 1998

Mesures d'économie des adresses IPv4

- Début des années 1990: CIDR (Classless Internet Domain Routing)
 - Réseau = préfixe/longueur
 - Moins de gâchis d'adresses
 - Permet *l'agrégation* d'adresses dans les tables de routages: moins de routes
 - **Exemple: 192.0.1/24 et 192.0.0/24** peut devenir **192.0.0/23**
 - Allouer dans les anciennes classes A B C
- NAT et adressage privé

Cela a permis de gagner du temps pour définir et déployer une nouvelle version de IP (version 6)

Vers un nouveau protocole IP: v6

1996: Premiers routeurs traitant IPv6 dans Internet (6Bone) et en France dans Renater (G6Bone)

2004: Premiers serveurs DNS racine accessible en IPv6. Puis très rapidement serveur des domaines .jp, .kr et .fr

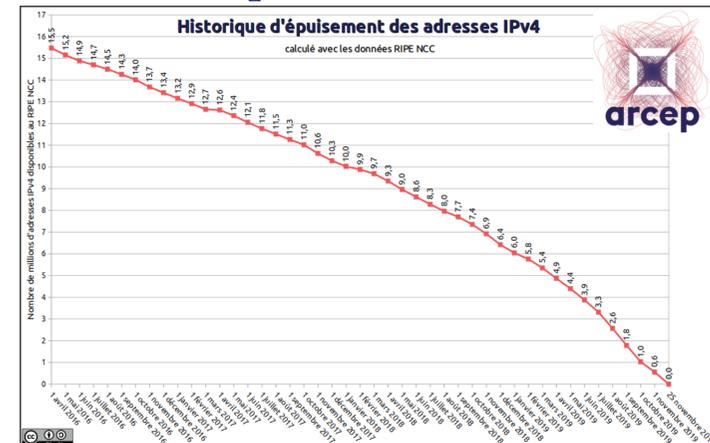
2007: Free offre IPv6 natif à ses abonnés (Orange et SFR en 2016 !)

2008 : Google accessible en IPv6

2010 : Facebook et Youtube accessible en IPv6

2011 : épuisement des adresses IPv4 :
en Asie : fin 2011,
en Europe fin 2012

Evolution des adresses IPv4 disponibles en France



Aujourd'hui en France la plupart des fournisseurs d'accès propose le passage à IPv6 (à vérifier sur votre box)

Vers un nouveau protocole IP: v6

Source: <https://www.arcep.fr/>

RÉSEAU FIXE : TAUX DE CLIENTS ACTIVÉS EN IPv6



Source : données à fin juin 2021, recueillies par l'Arcep auprès des opérateurs.

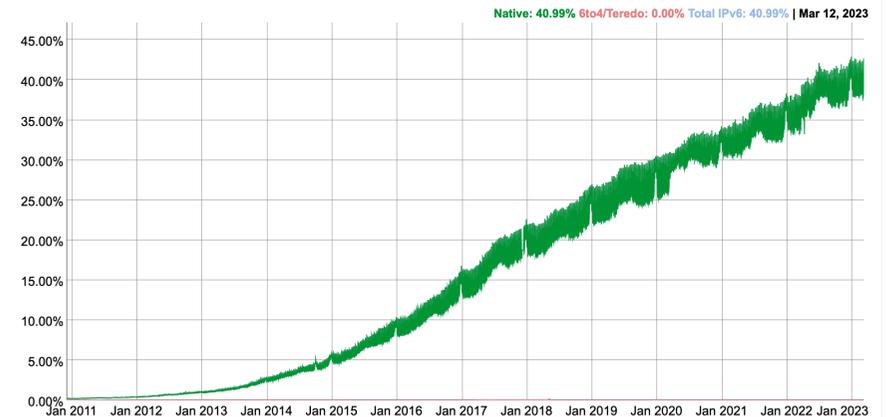
Accès à Google en IPV6

Source: <https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html>

– Début 2012 : 0,5 % , 2015: 5% , Début 2017: 16% Début 2021: 33%

IPv6 Adoption

We are continuously measuring the availability of IPv6 connectivity among Google users. The graph shows the percentage of users that access Google over IPv6.

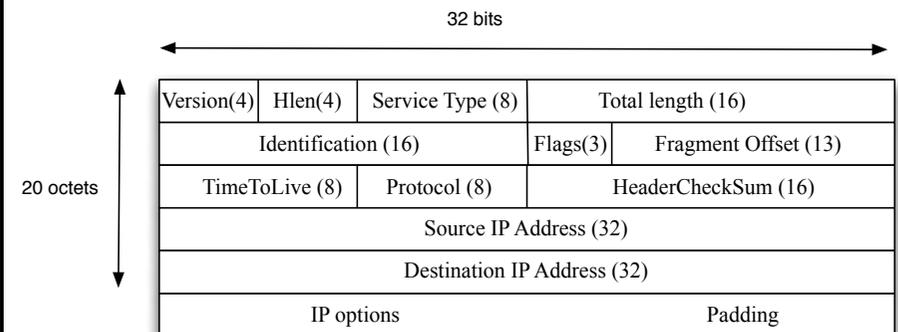


Principes d'IPv6

- Adresse sur 16 octets (128 bits)
 - $6,67 \cdot 10^{17}$ adresses au millimètre carré de la surface terrestre en théorie
 - En pratique plus de 1500 au m²
- Simplification de l'entête
- Assignation de la partie machine automatique
- Changement de protocole de découverte d'adresse de niveau liaison de donnée (ARP)

Rappel IP v4

• Entête IPv4



Taille des paquets

- La taille minimal d'un paquet IPV6 est de 1280 (contre 68 pour IPV4)
- La taille maximale est de 65535 octets
- Possibilité de très gros paquets (Jumbigram) de 4 giga octets !
- Mais attention le « Path MTU discovery » n'est pas fiable car de nombreux équipements sont configurés pour ne pas émettre de paquet ICMP

Schéma d'adressage

- **Les adresses de 128 bits permettent**
 - Une organisation hiérarchique
- **Adresse «sans classe»**
 - Adresse réseau: préfixe (partie réseau)/longueur préfixe
 - Si les adresses sont bien distribuées: l'agrégation réduit la taille des tables de routages

Format des adresses IP v6

- **Format de base : 8* 16 bits en hexadécimal**
 - Exemple: 2001:0660:3000:3210:FEDE:0000:0000:3210
 - Peut aussi s'écrire: 2001:660:3000:3210:FEDE:0:0:3210
- **Réduction des suites de 0:**
 - On peut écrire: 2001:660:3000:3210:FEDE::3210
 - Dans le cas ou le « : » à un sens on met l'adresse entre crochet
 - Exemple: `http://[2001:660:3000:3210:FEDE::3210]/x`
- **Adresse de Réseau**
 - Exemples:
 - 2001:660:3000:3210::/64
 - 3000:E334::/48
 - 3000:E334::/60

Des adresses IP v6

- Une machine ne possède pas une, mais des adresses IPv6
- Chaque adresse peut être utilisée suivant un contexte particulier
 - Adresse de «lien local» obtenu par configuration automatique
 - Adresse «globale» (routable dans Internet)
 - Adresse «locale» au sens réseau («privée»)
 - Adresse de boucle (équivalent au *loopback 127* de IPv4)
 - Adresse IPv4 «mappée» pour pouvoir communiquer avec des machines IPv4
 - Possibilité d'avoir une adresse IPV6 temporaire
 - Adresses multicast
 - ...

Types d'adresse IPv6

- **::/8** *réservées*
- **2000::/3** *unicast routables* sur Internet
- **fc00::/7** *locales uniques* : non routables, équivalent aux adresses privées IPv4, mais le NAT n'existe plus vu le nombre d'adresses disponible
- **fe80::/10** *«lien local» (link local)* : non routables, utilisées lors de la phase d'autoconfiguration sur un réseau local (Ethernet par exemple)

Types d'adresse IPv6

- **::FFFF:ab:cd** *IPv4 «mappé» locale* où a.b.c.d est l'adresse IPv4 (en hexadécimal) si la machine veut communiquer avec une autre machine IPv4 (reste au niveau de la machine)
- **2002:ab:cd:sous-reseau-Id:AdresseMac** *adresse 6to4* adresse mappée sur adresse IPv4 a.b.c.d pour création de tunnel 6to4
- **ff00::/8** *multicast* (équivalent au 224 de IPv4)
- **ff02::/16** *multicast local* (portée de niveau 2)
- **ff02::1** remplace le *broadcast* IPv4 de niveau 2
- **::1/128** *loopback/localhost* (équivalent au 127.0.0.1 en IPv4)
- Voir détail sur http://livre.g6.asso.fr/index.php/Autres_types_d%27adresses

Structure d'une adresse IPv6 unicast globale

- Taille fixe des sous-réseaux : /64
- Adresse: Préfixe (48 bits) / Sous-réseau (16 bits) / Interface (64 bits)
 - Préfixe: Adresse vue de l'extérieur de l'Intranet
 - Sous réseau : invisible de l'extérieur d'un Intranet
 - Interface: adresse de niveau «Liaison de donnée» (MAC: Media Access Control)
- Attribution des adresses (IANA) par blocs /48 ou /64
- un préfixe /48 permet de faire 2^{16} sous réseaux
- Pas d'adresse particulière tout à 0, ou tout à 1

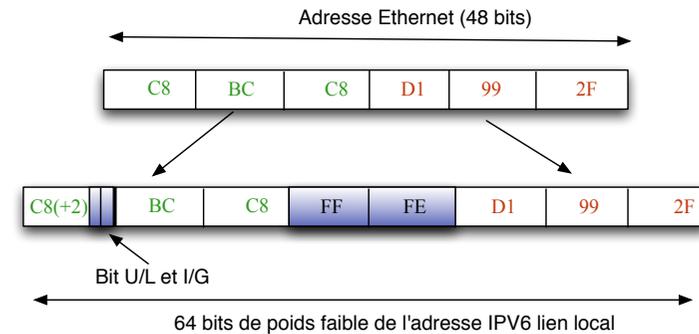
Une adresse Ethernet, une adresse IPv6

- A partir d'un préfixe sur 64 bits et de l'adresse Ethernet on peut fabriquer une adresse IPv6 unique
- Possibilité aussi de la générer :
 - manuellement (pour qu'elle ne change pas)
 - aléatoirement (pour des raisons de confidentialité)
 - à partir d'une clé publique pour au contraire authentifier la machine de l'interlocuteur de manière sûre
- Rappel Adresse Ethernet (Norme IEEE 802)
 - 3 octets Poids fort : constructeur
 - 2 bits particuliers U (Universel) et G (Multicast)
 - 3 octets Poids faible : identifiant unique chez le constructeur
 - Exemple : **c8:bc:c8:d1:99:2f**
- Dans IPv6 partie machine sur 64 bits (norme IEEE EUI-64)

Une adresse Ethernet, une adresse IPv6

- Afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté possible:
- L'avant dernier bit du dernier octet peut être changé
 - Deuxième bit U (Universelle/Local):
 - à 1 si adresse générée à partir d'une adresse MAC
 - à 0 si adresse générée autrement (manuellement, aléatoire, à partir d'une clé)
- Le dernier bit G (Group):
 - à 1 si adresse de groupe (multicast)
 - à 0 sinon

Construction «partie machine» IPv6



- Le bit U/L est mis à 1: C8 devient CA

Adresse «lien local»

- Calculé automatiquement à partir de l'adresse Ethernet
- **FE80::/64** réservée à cet usage
 - Exemple:
 - Adresse Ethernet : **C8:BC:C8:D1:99:2F**
 - Adresse IPv6: **FE80::CA**BC:C8FF:FED1:992F/64
- Cette adresse est affectée automatiquement à l'interface au moment de sa mise en service et va servir au départ pendant la phase de récupération de l'adresse globale IPv6

Récupération d'une adresse globale: Neighbor Discovery Protocol

- Utilise des paquets ICMPv6 : reprend les fonctionnalités de ICMPv4, ARP et IGMP (multicast)
- Plusieurs fonctionnalités:
 - Découverte des routeurs
 - Découverte de préfix (adresse globale)
 - Découverte de paramètre (par exemple le MTU)
 - **Auto-configuration d'adresse: permet de récupérer une adresse IPv6 globale**
 - Résolution d'adresse : Adresse IPv6 -> adresse MAC (équivalent à ARP)
 - Détection d'adresse multiple
 - Détermination du routeur pour une destination donnée

Neighbor Discovery Protocol Découverte d'un prefix

- Affectation de l'adresse «lien locale» à la mise en service de l'interface réseau en IPv6
- Puis en utilisant cette adresse:
 - Envoie un message ICMPv6 «*routeur sollicitation*»
 - Le routeur qui est sur le réseau répond par un message «*annonce de routeur*» (diffusé aussi périodiquement sur le réseau) contenant (entre autre) le prefix
 - L'adresse globale est calculée à partir du prefix diffusé par le routeur et affecté à l'interface
- L'annonce du routeur peut aussi stipuler l'utilisation de DHCPv6
- L'annonce du routeur ne donne pas l'adresse d'un serveur DNS

ROUTAGE IPV6

- Pas de longueur prédéfinie, on précise toujours le prefix
- Adresse de réseau: partie machine à 0
- Un réseau de niveau 2 (switch Ethernet, liaison point à point ...) est toujours un /64
- Exemples:
 - **2001:7000:6789:8000::/64** adresse de réseau globale
 - **::/0** route par défaut
 - **2001:7000:6789:8000::3445/128** adresse de machine
- **Pas de NAT: toutes les adresses en 2000::/3 sont routables**

Transition IPv4-IPv6

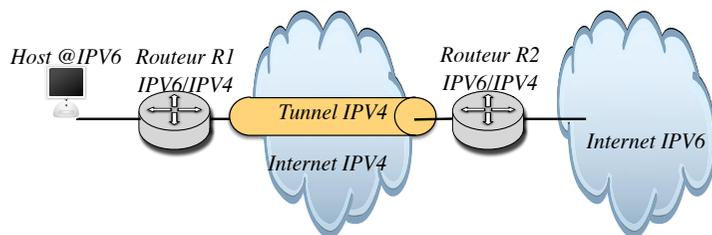
- Une machine peut avoir plusieurs adresses IPv4 et IPv6
- Champ DNS IPv6 existant
- Tous les systèmes d'exploitation possèdent aujourd'hui les deux piles IPV4 et IPV6
- La primitive *getaddrinfo* des sockets retourne les adresses IPV4 et IPV6 à partir d'un nom DNS
- Les logiciels modernes fonctionnent sur les deux protocoles IPV4 et IPV6

Transition IPv4-IPv6

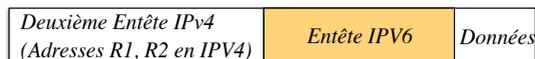
- Les routages IPv4 et IPv6 sont indépendants avec des configurations séparées
- Les algorithmes de routage ont été re-implémenté pour IPv6: RIPng, OSPFv3, BGP4+...
- Création possible de tunnel IPv6 dans le réseau IPv4

Tunnel IPv6 statique

- Création de tunnel IPv4 dans les zones d'Internet où IPv6 n'est pas encore déployé
- Table de routage IPV6 statique



Paquet dans le tunnel



Configuration tunnel statique à l'UFR

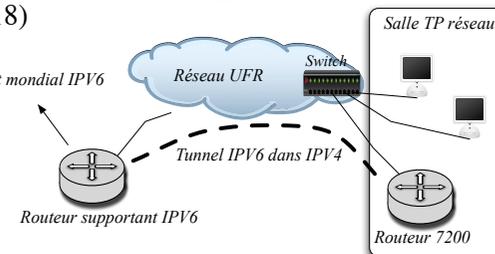
(Jusqu'en 2018)

```
interface Tunnel41
description Connectivite IPv6 vers imag
no ip address
ipv6 unnumbered FastEthernet0/0
ipv6 enable
tunnel source 152.77.84.123
tunnel destination 152.77.39.54
tunnel mode ipv6ip
!
```

```
interface FastEthernet0/0
ip address 152.77.84.123 255.255.255.128
duplex full
ipv6 address 2001::660:5301:8800::1000/64
ipv6 enable
ipv6 nd prefix 2001::660:5301:8800::/64
ipv6 rip UFRIMA enable
!
```

```
ip classless
ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 152.77.84.1 ! routage par défaut IPV4
```

```
ipv6 route ::/0 Tunnel41 ! routage IPV6 par défaut dans le tunnel
ipv6 router rip UFRIMA
```



Paquet dans le tunnel

Frame 2: 90 bytes on wire (720 bits), 90 bytes captured (720 bits)

-Ethernet II, Src: Cisco_13:60:00 (00:d0:06:13:60:00),
Dst: BrocadeC_d1:de:d8 (00:0c:db:d1:de:d8)

-Internet Protocol Version 4, Src: 152.77.84.123 (152.77.84.123),
Dst: 152.77.39.54 (152.77.39.54)

-Internet Protocol Version 6, Src: 2001::660:5301:8800:1a03:73ff:fec8:c7a
(2001:660:5301:8800:1a03:73ff:fec8:c7a),
Dst: 2a00:1450:4006:802::1000 (2a00:1450:4006:802::1000)

-Internet Control Message Protocol v6 Echo (ping) request

Principe 6to4

- Possibilité de créer un tunnel automatiquement appelé **6to4**:
 - entre machines hôtes
 - entre routeur de sortie de deux Intranets IPv6

Condition: posséder une adresse IPv4 publique

6to4 permet :

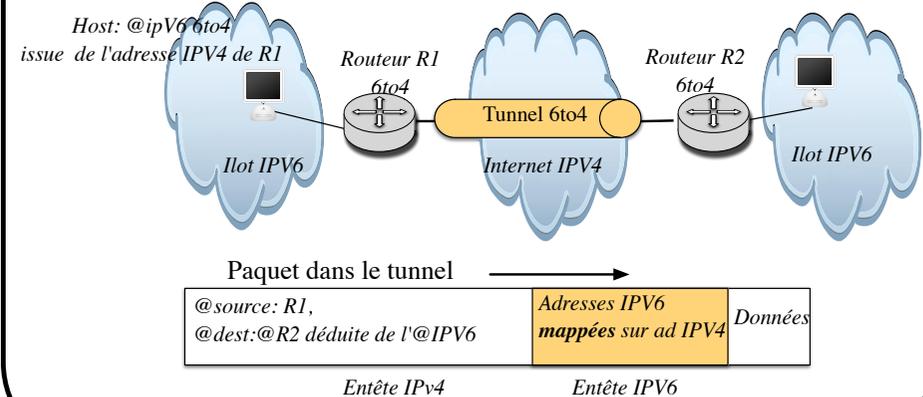
- d'assigner automatiquement une adresse IPv6 à un hôte possédant une adresse IPv4
- d'encapsuler les paquets IPv6 à l'intérieur de paquet IPv4 (Tunnel 6to4)
- de passer éventuellement sur le réseau IPv6 « natif »

Principe 6to4

- Assignation automatique d'une adresse IPV6 en fonction de l'IPV4:
Une adresse IPv6 «mappée» sur l'adresse IPv4 (*ab.cd*) est attribuée à l'interface:
 - » 2002:*ab:cd*:sous-reseau-Id:AdresseMac
 - » Exemple: IPv4 192.1.1.2 donne l'adresse IPV6 6to4
 - » 2002:C001:0102::
- Dans le cas d'un Intranet le routeur de sortie *6to4* distribue des adresses 6to4 calculée à partir de son adresse IPV4. Les machines de l'Intranet n'ont pas d'adresse IPV4.
- A partir d'une machine *6to4*, deux cas se présentent:
 - Communication avec une machine qui possède une adresse *6to4*
 - Communication avec une machine qui possède une adresse IPV6 «native»

Tunnel IPv6 6to4 à 6to4

- Le routeur R1:
 - Distribue des adresses IPV6 6to4 calculée à partir de son adresse IPV4
 - Pour chaque paquet sortant, ajoute une entête IPV4 (entrée dans le tunnel)



Tunnel IPv6 6to4 vers IPv6 natif

- Condition supplémentaire: Connaître l'adresse IPv4 d'un routeur capable de router de l'IPv6 natif (appelé **routeur relai**)
- On ne peut plus déduire cette adresse de l'adresse IPV6
- Utilisation du routage *anycast*

Adressage et routage Anycast

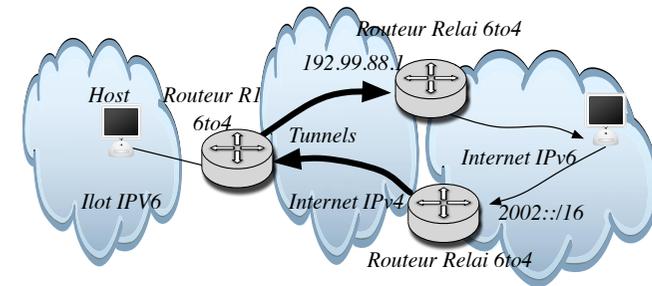
Adresse *Anycast*:

- 192.99.88.0/24 sont des adresses *anycast réservées pour le 6to4*
- Plusieurs machines peuvent avoir une même adresse *anycast*
- Quand une machine envoie un paquet vers une adresse *anycast* les mécanismes du routage vont permettre d'amener le paquet vers la machine la « plus proche » possédant cette adresse
- Le protocole de routage utilisé pour gérer les adresses *Anycast* est BGP
- BGP annoncent ces plages d'adresse *anycast* depuis différents endroits.
- Ainsi un paquet émis vers une adresse *anycast* est naturellement routé vers la machine *anycast* la plus proche

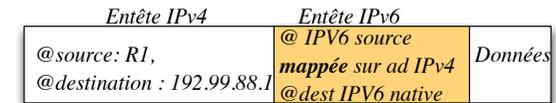
Tunnel IPv6 6to4 vers IPv6 natif

- Création de deux tunnels distincts aller et retour
- **Tunnel Descendant (aller):** vers routeur relai 192.99.88.1
 - Le routeur relai (adresse IPV4 Anycast) est le plus proche du routeur R1. Le routeur relai reçoit un paquet sur interface IPv4
 - Enlève entête IPv4 et re-envoie sur réseau IPv6 natif
- **Tunnel Ascendant (retour):** vers routeur relai d'adresse 2002::/16
 - Le routeur relai reçoit un paquet sur interface IPv6 à destination d'une adresse en 2002::/16
 - Ajoute une entête IPv4 avec l'adresse destination issue de cette adresse IPv6 mappée

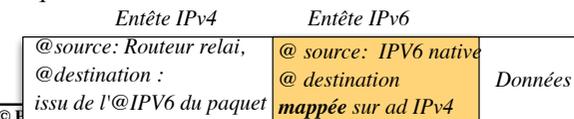
Tunnel IPV6 6to4 vers IPv6 natif



Paquet dans le tunnel descendant:



Paquet dans le tunnel ascendant:



6to4 en fin de vie

- Problèmes liés au relai anycast pas toujours présents, éloignés ou saturés
- En 2010, 15% des échecs de connexions IPV6 étaient dues à 6to4
- Remplacés depuis par le protocole **6rd** (Rapid Deployment)
- Dans 6rd:
 - Principe identique à 6to4 mais le relai 6to4 est proche du routeur 6to4 et dans le réseau du fournisseur d'accès à Internet (FAI)
 - Le routage vers le relai est donc géré par le FAI
 - Le préfixe IPV6 n'est plus 2002::/16 mais spécifique au FAI
 - Free utilise ce protocole depuis 2007 !

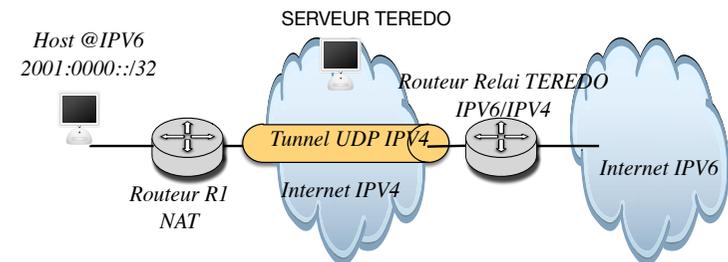
IPV6 à travers NAT IPV4

- Intranet utilisant du NAT
 - Routeur de sortie ne réalise pas le 6to4
 - Machine à l'intérieur de l'intranet possède une adresse IPV6 mais pas d'adresse IPV4 publique
 - 6to4 impossible
 - Protocole TEREDO : Tunneling IPV6 over UDP through NAT
 - Assigne une adresse IPV6 publique (donc routable)
 - Encapsule dans un paquet UDP- IPV4 les paquets IPV6 vers un routeur relai TEREDO approprié (en traversant le NAT)
- UDP est nécessaire pour passer le NAT (port particulier)
- Le routeur relai TEREDO est capable de router les paquets qu'il reçoit vers IPV6 natif

Relai et serveur TEREDO

- Le client TEREDO (derrière le NAT) fait une demande à un serveur TEREDO
- Le serveur TEREDO distribue des adresses IPV6 2001:0000::/32 et donne l'adresse IPV4 du relai TEREDO
- Un routeur relai TEREDO
 - possède une adresse IPV4 publique et une adresse IPV6 native
 - Il reçoit des paquets IPV4 à travers les Tunnels et les renvoie sur Internet IPV6

Relai et serveur TEREDO



Paquet dans le tunnel TEREDO



Outils à essayer si vous avez une adresse IPV6

- ifconfig
- netstat -rn
- ping6
- traceroute6
- nmap (scan des ports utilisés, traceroute, ping, syst. exploit...)
- Un livre en ligne (tout ce que vous avez jamais voulu savoir sur IPV6): <http://livre.g6.asso.fr>