IPv6 : fonctionnement et déploiement

Olivier Togni

Université de Bourgogne

IEM/LIB

o.togni.u-bourgogne.fr

olivier.togni@u-bourgogne.fr

modifié le 12/06/2023

Plan

- Bibliographie
- Historique
- Adressage, format
- Protocoles associés
- DNS, mobilité, sécurité
- Transition IPv4/IPv6
- Déploiement

Ressources bibliographiques

- IPv6 Théorie et pratique 4ed, *G. Cizault, O'Reilly 2005* *(version en ligne avec mises à jour sur* le site du G6*)*
- The Second Internet - Reinventing Computer Networking with Ipv6, 2010, Lawrence E. Hughes, en ligne chez Info weapons
- IPv6 Fundamentals: A Straightforward Approach to Understanding IPv6, 2nd ed, R. Graziani*, CISCO, 2017*
- www.urec.fr Tutoriel IPv6 de B. Tuy
- ietf.org RFC 2460, 8200, ...

Historique

- En 1992, constat de
  - Pénurie des adresses
  - Augmentation des tables de routages

  => Projet IP new generation (IPng)
- En 1995, RFC 1883: «Internet Protocol version 6»
- Depuis, de nombreuses modifications et normes complémentaires

Objectifs

- Remédier au problèmes d'adresses
- Ajouter de nombreuses fonctionnalités optionnelles d'IPv4:
  - Autoconfiguration
  - Mobilité
  - Diffusion Multicast
  - Sécurité (Authentification et confidentialité)

Le 6bone

Réseau expérimental créé pour tester le déploiement de l'IPv6. Il s'étend en Asie, Amérique, Australie et en Europe.

- Juin 1998: ouverture du 6bone. adresses IPv6 utilisées par ce réseau sont regroupées par leur préfixe commun *3ffe*.

- Janvier 2004: arrêt d 'attribution des adresses en *3ffe.* Désormais, on obtient des adresses définitives, commençant par *2001*.

- Juin 2006: fermeture du 6bone.

Gestion des adresses

ICANN (INTERNET CORPORATION FOR ASSIGNED NAMES AND NUMBERS) REMPLACE LE IANA (VOIR iana.org)

+ 5 RIR (REGIONAL INTERNET REGISTRY)

- AFRINIC (AFRICAN REGION)
- APNIC (ASIA/PACIFIC REGION)
- ARIN (NORTH AMERICA AND SUB-SAHARA AFRICA)
- LACNIC (LATIN AMERICA AND SOME CARIBBEAN ISLANDS)
- RIPE NCC (EUROPE, THE MIDDLE EAST, CENTRAL ASIA, AND AFRICAN COUNTRIES LOCATED NORTH OF THE EQUATOR)

Source : iana.org

+ NIR (NATIONAL) + LIR/ISP (LOCAL)

Adresses

Sur 128 bits : 8 mots de 16 bits séparés par des « : »

Ex: 3201:001A:12FF:0000:0000:0000:FFFE:8ABC

=> 2^128 = 3,4*10^38 adresses disponibles

:: pour abréger plusieurs mots nuls consécutifs

Ex: 3201:1A:12FF::FFFE:8ABC

3 types d'adresses: unicast, anycast, multicast (plus de broadcast !)

Utilisent notation CIDR: adresse/longueur_préfixe

Ex: 2001:660:3003::/48

Espace d'adressage (iana.org)

```
INTERNET PROTOCOL VERSION 6 ADDRESS SPACE
(last updated 2019-09-13)

IPv6 Prefix  Allocation           Reference
-----------  ----------           ---------
0000::/8     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
0100::/8     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
0200::/7     Reserved by IETF     [RFC4048]
0400::/6     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
0800::/5     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
1000::/4     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
2000::/3     Global Unicast       [RFC3513][RFC4291]
4000::/3     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
6000::/3     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
8000::/3     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
a000::/3     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
c000::/3     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
e000::/4     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
f000::/5     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
f800::/6     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
fc00::/7     Unique Local Unicast [RFC4193]
fe00::/9     Reserved by IETF     [RFC3513][RFC4291]
fe80::/10    Link-Scoped Unicast  [RFC3513][RFC4291]
fec0::/10    Reserved by IETF     [RFC3879]    Deprecated
ff00::/8     Multicast    [RFC3513][RFC4291]
```

Plan d'adressage agrégé

Adresse unicast globale construite ainsi (RFC 2374):

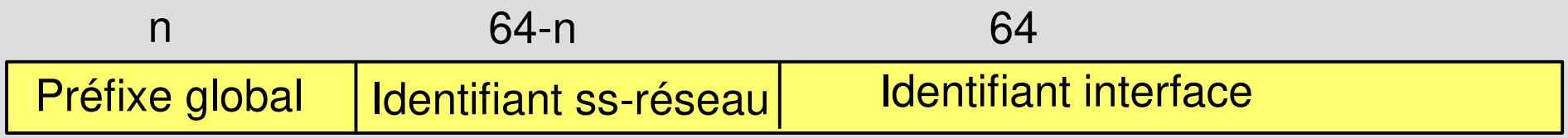
3	13	8	24	16	64
001	TLA	Réservé	NLA	SLA	Identifiant interface

TLA (Top Level Agregator): grand opérateur international
NLA (Next Level Agregator): opérateur intermédiaire
SLA (Site Level Agregator): site

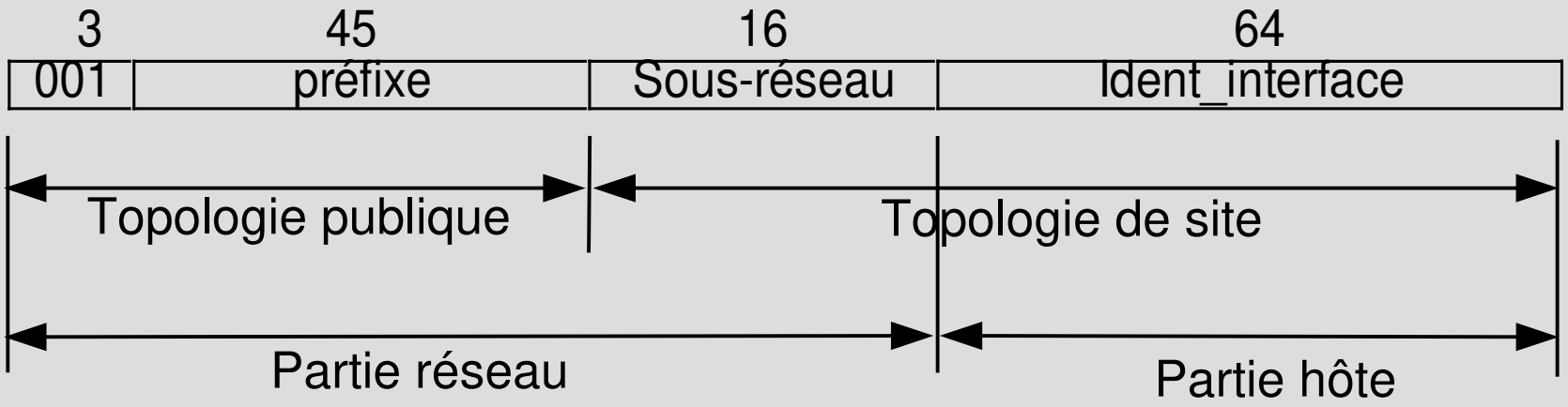
=> Plan abandonné au profit du plan d'adressage global utilisé pour tests au sein du 6bone avec TLA=1FFE

Plan d'adressage global

RFC 3587 rend obsolète l'adressage agrégé



Par exemple:



Identifiant d'interface

Identifiant sur 64 bits pour désigner une interface connectée sur un lien

Peut être construit à partir de l'adresse de niveau 2 de l'interface réseau:

- EUI-64 (firewire, 802.15.4) : inverser le 7ième bit
- MAC-48 (Ethernet, Wifi, FDDI) : ajout de FFFE au milieu et inversion du 7ième bit => identifiant unique au niveau mondial
- Si pas d'adresse de niveau 2=> nombre au hasard ou saisie manuelle

Adresses unicast globales

IPV6 GLOBAL UNICAST ADDRESS ASSIGNMENTS [last updated 2019-11-06]

Global Unicast Prefix	Assignment	Date			
2001:0000::/23	IANA	01 Jul 99	2001:4800::/23	ARIN	24 Aug 04
2001:0200::/23	APNIC	01 Jul 99	2001:4A00::/23	RIPE NCC	15 Oct 04
2001:0400::/23	ARIN	01 Jul 99	2001:4C00::/23	RIPE NCC	17 Dec 04
2001:0600::/23	RIPE NCC	01 Jul 99	2001:5000::/20	RIPE NCC	10 Sep 04
2001:0800::/23	RIPE NCC	01 May 02	2001:8000::/19	APNIC	30 Nov 04
2001:0A00::/23	RIPE NCC	02 Nov 02	2001:A000::/20	APNIC	30 Nov 04
2001:0C00::/23	APNIC	01 May 02	2001:B000::/20	APNIC	08 Mar 06
2001:0E00::/23	APNIC	01 Jan 03	2002:0000::/16	6to4	01 Feb 01
2001:1200::/23	LACNIC	01 Nov 02	2003:0000::/18	RIPE NCC	12 Jan 05
2001:1400::/23	RIPE NCC	01 Feb 03	2400:0000::/12	APNIC	03 Oct 06
2001:1600::/23	RIPE NCC	01 Jul 03	2600:0000::/12	ARIN	03 Oct 06
2001:1800::/23	ARIN	01 Apr 03	2610:0000::/23	ARIN	17 Nov 05
2001:1A00::/23	RIPE NCC	01 Jan 04	2620:0000::/23	ARIN	12 Sep 06
2001:2000::/19	RIPE NCC	03 Dec 19	2630:0000::/12	ARIN	11 Jun 19
2001:1C00::/22	RIPE NCC	01 May 04	2800:0000::/12	LACNIC	03 Oct 06
2001:3C00::/22	RESERVED	11 Jun 04	2A00:0000::/12	RIPE NCC	03 Oct 06
2001:4000::/23	RIPE NCC	11 Jun 04	2A10:0000::/12	RIPE NCC	05 Jun 19
2001:4200::/23	AfriNIC	01 Jun 04	2C00:0000::/12	AfriNIC	03 Oct 06
2001:4400::/23	APNIC	11 Jun 04			
2001:4600::/23	RIPE NCC	17 Aug 04			

Adresses locales

Adresses lien local (link local): adresses dont la validité est restreinte à un lien
Forme: FE80::+ident_interface

10	54	64
1111111010	0.....0	ident_interface

Utilisées par les protocoles de configuration d'adresse globale, de découverte de voisins (neighbor discovery) et de découverte de routeurs (router discovery).
Le protocole de détection de duplication d'adresse (DaD) permet de s'assurer de l'unicité au niveau du lien.
Pas forwardées par les routeurs => usage local au lien

Adresses locales

Adresses site local (site local): adresses dont la validité était restreinte à un site => généralisait la notion d'adresse privée d'IPv4

FEC0:+ident_sous_réseau+ident_interface

10	54	64
1111111011	ident_ss_rés	ident_interface

Notion de site trop floue => ont été dépréciées (RFC 3879)

Adresses locales

Adresses unique local (ULA: unique local address): Pour utilisation au sein d'une zone limitée (site ou entre un nombre limité de sites)

FC00::/7+bit à 1+ident_global+ident_sous_réseau+ident_interface

8	40	16	64
11111101	ident_global	ident_ss_rés	ident_interface

Ident_global généré pseudo-aléatoirement

Adresses multicast

Commencent par FF....

8	4	4	112
11111111	flag	scope	ident_groupe

Flag bits: 0 R P T
T=0 => adresse permanente (gérée par IANA)
T=1 adr temporaire
P=1 => dérivée du préfixe unicast
R=1 => point de rendez-vous

Scope (étendue):
0: réservé
1: noeud
2: lien
4: administration
5: site
8: organisation
E: global
F: réservé

Adresses prédéfinies

Adresses spéciales
- adr indéterminée: 0:0:0:0:0:0:0:0 ou bien ::
- adr de bouclage: ::1

Pour transition IPv4/v6:
- adr Ipv4 mappées: ::FFFF:a.b.c.d où a.b.c.d est une adr Ipv4
- adr Ipv4 compatibles: ::a.b.c.d => dépréciées (cf. RFC 4291)

Adresses multicast prédéfinies:
- FF02::1 => tous les noeuds Ipv6 sur le même lien local
- FF05::2 => tous les routeurs Ipv6 du site
- FF0E::101 => tous les serveurs NTP sur l'Internet

Adresses anycast

Une adresse anycast identifie un ensemble d'interfaces: un paquet à destination d'une adr anycast doit être acheminé par le réseau vers l'une des interfaces (la plus proche)

=> implémentation délicate, réservées pour les routeurs
Ex: serveurs FTP avec adresse générique

Ne peut être distinguée d'une adresse unicast (même plage D'adresses 2000 ::/3)

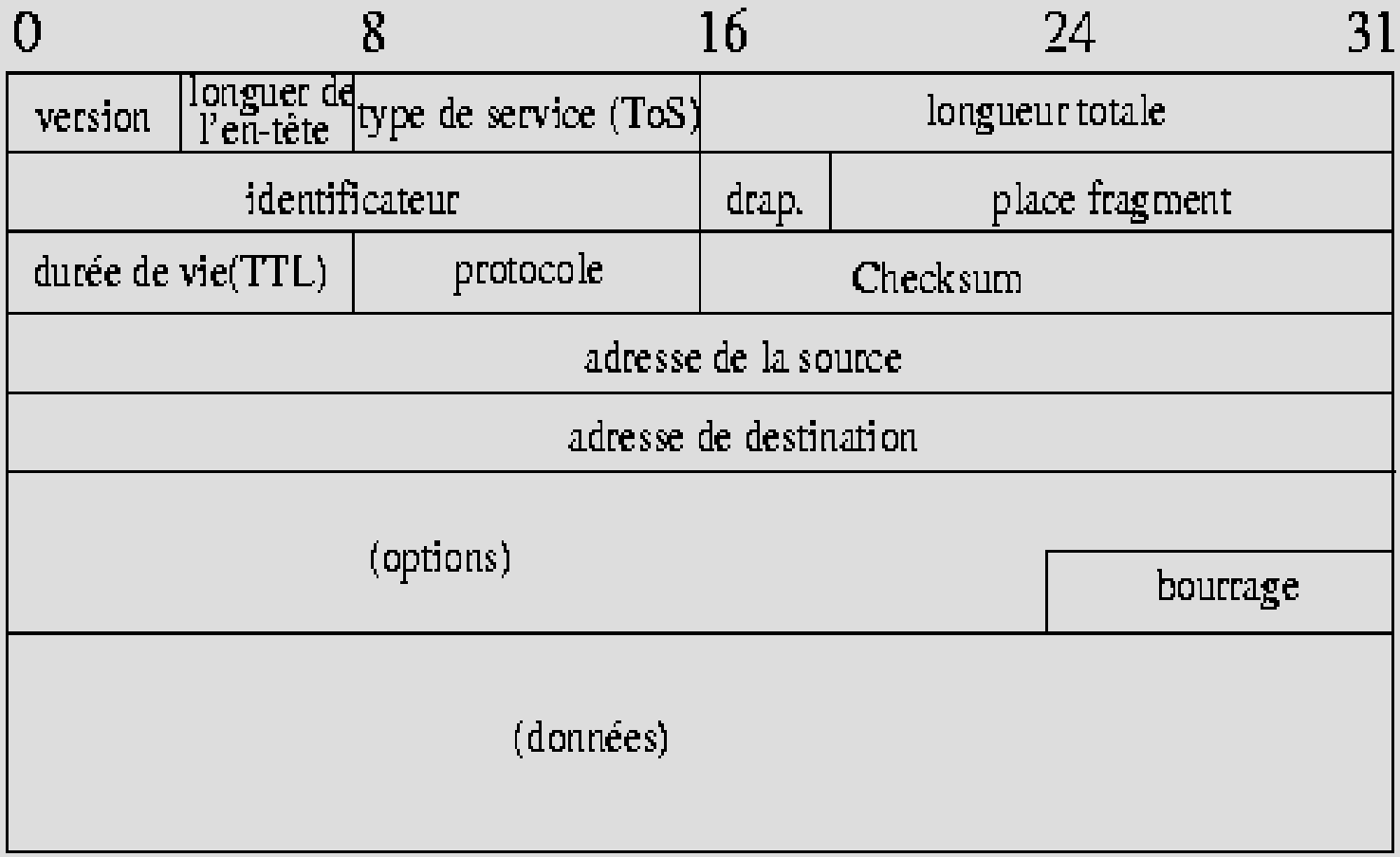
Adr anycast d'un sous-réseau: préfixe réseau+ 0...0
=> paquet transmis à cette adr doit être traité par l'un des routeurs du réseau
Adr anycast prédéfines (sur un réseau) : les 128 identifiants les plus grands

64	57	7
Préfixe réseau	11111101...1	Id anycast

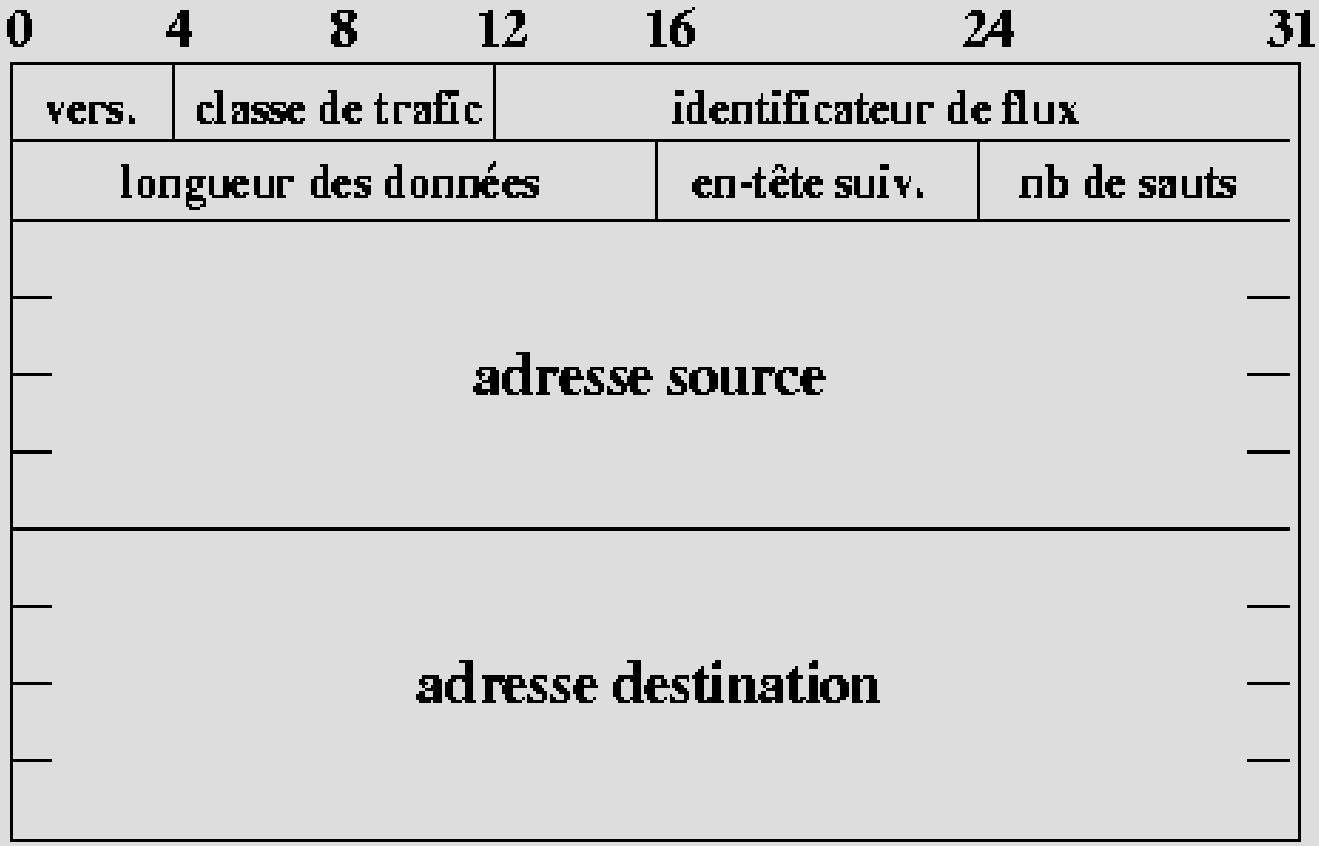
Exemple sous Linux

```
eth0    Link encap:Ethernet  HWaddr 00:0D:56:01:13:C9
        inet addr:193.52.237.96  Bcast:193.52.237.255  Mask:255.255.255.0
        inet6 addr: 2001:1111::20d:56ff:fe01:13c9/64 Scope:Global
        inet6 addr: fe80::20d:56ff:fe01:13c9/64 Scope:Link

lo      Link encap:Local Loopback
        inet addr:127.0.0.1  Mask:255.0.0.0
        inet6 addr: ::1/128 Scope:Host

sit0    Link encap:IPv6-in-IPv4
        NOARP  MTU:1480  Metric:1
```

Rappel datagramme IPv4



Format des datagrammes IPv6



=> 40 octets d'en-tête sans les options (5 mots de 64 bits)

Format des datagrammes IPv6

Version=6 (même champs que Ipv4)

Classe de trafic = champs type de service d'IPv4

Identificateur de flux: pour qualité de service, référence le contexte de la communication

Longueur des données: taille des données sans l'en-tête

En-tête suivant = champs protocole d'IPv4=soit protocole de niveau supérieur, soit numéro d'extension, les extensions contiennent ce champ pour chaînage

Nombre de sauts = TTL: décrémenté à chaque noeud traversé. Si 0, rejet et émission d'un message ICMP vers la source

Remarques

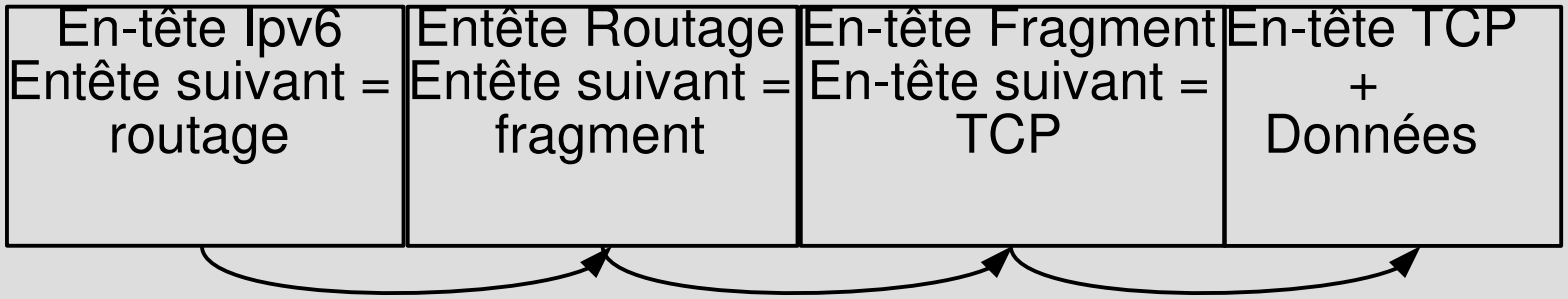
- Plus de champs Checksum car devait être ajusté par chaque routeur en raison du champ TTL modifié => les protocoles de niveau sup doivent mettre en place un ctrl d'erreur sur l'en-tête (étendue aux adr IP)
- Champs alignés sur mots de 64bits => optimisé pour architecture 64bits
- Moins de champs que dans Ipv4
- Entête de taille fixe => plus rapide
- Plus de souplesse dans les options

Extensions

Plus souples que les options d'IPv4, elles peuvent être chaînées entre elles et sont traitées seulement par les noeuds concernés
5 types d'extensions:

- Proche en proche (hop-by-hop)
  - toujours la première extension
  - remplace l'option Ipv4
  - analysée par chaque routeur
- Destination (traitée seulement par le destinataire)
- Routage
- Fragmentation
- Sécurité

Chaînage d'extensions



Champ En-tête suivant:

Proche en proche	0
Routage	43
Fragmentation	44
Confidentialité	50
Authentification	51
Fin des entêtes	59
Destination	60

TCP	6
UDP	17
IPv6	41
ICMPv6	58
SCTP	132
Mobilité	135
UDP-Lite	136

Proche en proche

4 options différenciées par le champ type (1 octet)

- *Pad1* (bourrage 1 octet), utile pour aligner sur 64bits
- *Padn* (bourrage n octets), idem
- *router alert*: demande au routeur de prendre en compte les données (utile pour ICMPv6 ou RSVP)
- *Jumbogramme* (paquet de taille > 64Ko) => taille précisée dans l'option

Les 2 bits de poids fort du type indiquent le comportement du routeur s'il ne traite pas l'option

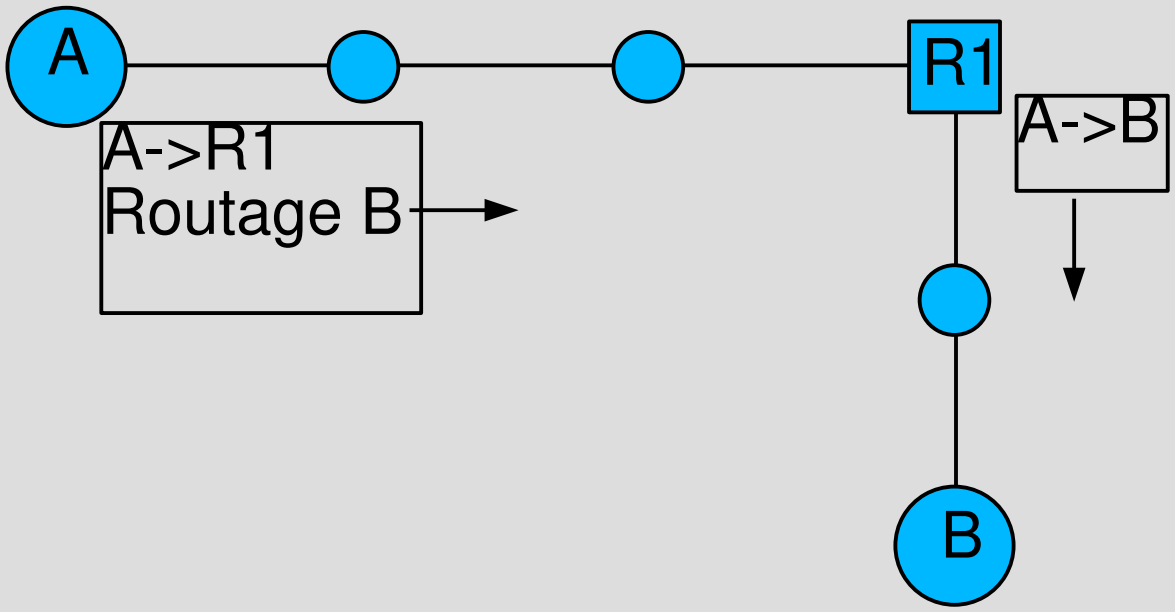
Destination

Options :

- bourrage (Pad1, Padn), utile pour aligner sur 64bits
- mobilité
- tunnelage dans paquet Ipv6: limite du niveau d'encapsulation

Routage

Permet d'imposer une route différente de celle offerte
Routage libéral (Loose source routing): on indique une liste de routeurs à traverser, les tables de routage peuvent être utilisées pour aller de routeur en routeur



Fragmentation

En principe la taille du paquet est adaptée à l'émission par un algorithme de découverte du PMTU (MTU du chemin).

En général il est prévu un MTU de 1280octets (pour tunnelage). Mais certains protocoles (NFS par ex.) supposent que la fragmentation existe et produisent des messages de grande taille

Seule la source peut fragmenter un paquet (contrairement à IPv4)

PMTU

Le protocole Path MTU Discovery permet de calculer
le MTU maximum disponible vers une destination.
Il utilise les messages ICMPv6 “Paquet trop grand”:
– Un routeur créé un tel message quand il reçoit un paquet trop grand pour traverser le réseau sur le chemin
– Le nouveau MTU à utiliser est spécifié dans le message ICMP

L'hote envoi son paquet en utilisant le MTU du lien. S'il reçoit un message ICMPv6 “Paquet trop grand”, il renvoie un paquet de la taille spécifiée dans le message et ainsi de suite

Protocoles associés à IPv6

ND (Neighbor Discovery): découverte des voisins

MLD (Multicast Listener Discovery)
- gestion des groupes multicast
- basé sur IGMPv2
- MLDv2 équivalent de IGMPv3 d'IPv4

ICMPv6 (Internet Control Message Protocol) :
«super» protocole qui
- couvre les aspects d'ICMPv4 (ctrl erreurs, ...)
- Transporte les messages ND et MLD

ICMPv6

Deux classes de messages (suivant le champs « type »):
- de 0 à 127 Messages d'erreur
- de 128 à 255 Messages d'information

Messages d'erreur les plus courants:
- Destination inaccessible (1)
- Paquet trop grand (2)
- Temps dépassé (3)
- Paramètre non reconnu (4)

Neighbor Discovery

Sous-protocole d'ICMPv6, inclue les fonctionnalités de ARP, R-Disc, ICMP redirect

Les noeuds Ipv6 sur un même lien utilisent ND pour:

- découvrir leur présence mutuelle
- déterminer l'adr de niveau liaison du voisin
- trouver les routeurs
- maintenir les infos sur l'accessibilité des voisins (NUD)

=> pas applicable aux réseaux NBMA (ATM, Frame Relay, ..) car ND utilise le multicast

Neighbor Discovery

5 types de paquets ICMP:

- *Router Advertisement (RA)*: annonce périodique qui contient
  - liste des préfixes utilisés sur le lien
  - valeur possible du « nombre de sauts »
  - valeur du MTU

- *Router Solicitation (RS)*: l'hôte veut un RA immédiatement

- *Neighbor Solicitation (NS)*:
  - pour déterminer l'adr liaison d'un voisin
  - ou pour tester inaccessibilité
  - aussi pour tester duplication d'adr (DaD)

Neighbor Discovery

- *Neighbor Advertisement (NA)*:
  - réponse à un paquet NS
  - avertir le changement d'une adresse physique

- *Redirect*: utilisé par un routeur pour informer un hôte d'une meilleure route

Résolution d'adresse

Au boot, l'hôte doit adhérer à 2 groupes multicast:
ff02::1 <=> tous les noeuds sur le lien
ff02::1:ffxx:xxxx adr de multicast sollicité (xxxxxx=24bits de poids faible de l'adr IPv6)

Résolution d'adresse:
1. Envoi paquet NS en multicast sollicité
2. L'hôte concerné répond par un message NA

Multicast sollicité

Adresse multicast spéciale contenant un seul destinataire

Concaténation du préfixe ff02::1:ff00:0/104 avec les 24 derniers bits de l'adr IPv6

Ex:

@DST Ipv6	2001:0660:010A:4002:4421:21FF:FE24:87C1
Mult sol	FF02:0000:0000:0000:0000:0001:FF24:87C1
Ethernet	33-33-FF-24-87-C1

Auto-configuration

Seuls les routeurs doivent être configurés manuellement,
les hôtes peuvent obtenir leurs adresses automatiquement:

- Configuration sans état: la machine construit automatiquement ses adresses IPv6 en fonction d'informations qu'elle reçoit des routeurs
- Configuration avec état (contrôle de l'attribution des adresses): DHCPv6 (intérêt?)

Protocoles de transport

Modifications mineures de TCP et UDP pour prise en compte IPv6 :

- Checksum obligatoire et porte sur pseudo en-tête incluant des champs de l'en-tête du paquet IPv6

- Prise en compte des jumbogrammes: l'en-tête TCP ou UDP contient un champ longueur trop petit => =0 pour UDP mais problème avec TCP où plusieurs compteurs sont sur 16bits (longueurs des fenêtres)

DNS

- Nommage direct : du nom vers les adresses
  Enregistrement AAAA

  ns3.nic.fr. IN AAAA 2001:660:3006:1::1:1

- Nommage inverse : de l'adresse vers les noms
  enregistrement PTR, stocké sous l'arbre DNS inverse ip6.arpa
  1.0.0.0.1.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1.0.0.0.6.0.0.3.0.6.6.0.1.0.0.2.ip6.arpa. IN PTR ns3.nic.fr.

- Logiciels DNSv6: BIND9 de l'ISC
  enregistrement AAAA, PTR sous ip6.arpa, transport IPv6

- Enregistrement A6 découpant l'adresse en 2 parties à été finalement écarté de la standardisation

Intégration d'IPv6 dans le DNS

- Les deux aspects du DNS: BDD et application client/serveur doivent supporter IPv6
- Taille limitée des messages DNS en UDP: transport des messages DNS par UDP et TCP (port 53).
  - requêtes/réponses DNS en UDP sauf si taille > 512
  - transferts de zones en TCP et requêtes trop longues
- Adresses des serveurs racine publiées dans le DNS sont en IPv4 => utiliser un serveur forwarder en double pile IPv4/IPv6.
- Adresses des TLD sont presque toutes en IPv4 (ICANN autorise depuis 2004 les « glues » IPv6; .fr, .jp et .kr ont été les premiers). Depuis 2008, 6 des 13 serveurs racine ont une @IPv6

Mobilité IPv6

Basée sur MobileIPv4, mais tire partie des mécanismes d'IPv6 (configuration automatique, extensions destination,...):

- Plusieurs adresses IPv6 pour le mobile
- Entité « agent mère » dans chaque réseau qui relaie les données au mobile
- Mécanisme de table des associations pour permettre communication directe

Sécurité 1/3

IPsec: mécanismes de sécurité pour IP (v4 ou v6) optionnel pour IPv4, intégré dans IPv6 sous forme d'option :

L'extension d'authentification (AH : Authentication Header):
- s'assurer que l'émetteur du msg est bien celui qu'il prétend être
- contrôle d'intégrité pour garantir au récepteur que personne n'a modifié le contenu d'un message lors de son transfert sur le réseau

L'extension ESP (Encapsulating Security Payload):
- chiffrer l'ensemble des paquets ou leur partie transport et de garantir l'authentification et l'intégrité de ces paquets
- détecter les rejeux
- garantir (de façon limitée) la confidentialité du flux.

Sécurité 2/3

- IPv6 c'est IP => 95 % des problèmes de sécurité sont identiques à ceux d'IPv4
- Différences transitoires :
  - logiciels bogués, limités, lents,
  - administrateurs incompétents (mais attaquants aussi!),
  - techniques de transition complexes
- Différences de protocole :
  - Les annonces de routeurs (RA) ne sont pas sécurisées/authentifiées => solution SEND (secure ND)
  - Vie privée (@IPv6 dérivée de l'@MAC), scan des adresses, plus de NAT

Source : blog de Stéphane Bortzmeyer (AFNIC) http://www.bortzmeyer.org/

Sécurité 3/3

- Guides de sécurité pour le déploiement d'IPv6
  - Complet : recommandations du NIST pour un déploiement sécurisé

    Guidelines for the Secure Deployment of IPv6, Special Publication 800-119
    http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-119/sp800-119.pdf

  - De façon plus pratique : guide de l'UREC

    https://aresu.dsi.cnrs.fr/IMG/pdf/secu.articles.Archi.Securite.IPv6.pdf

Mécanismes de transition

A différents niveaux:

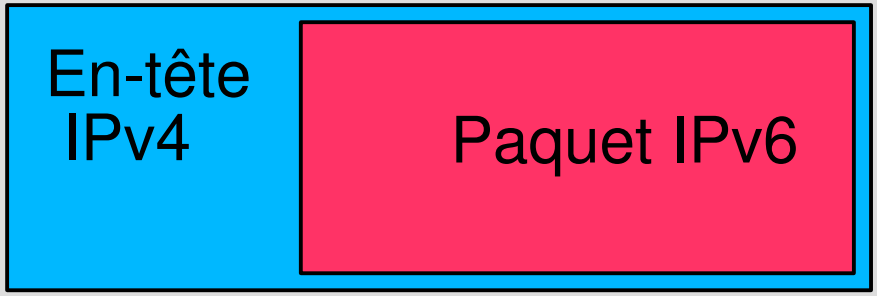
- Sur les hôtes: double pile
- Sur le réseau: tunnels
  - Manuels
  - Configurés: Tunnel Broker
  - Automatiques: TEREDO, 6to4, ISATAP, 6over4
- Par translation de protocoles
  - NAT-PT: traduire les en-têtes des paquets IPv6 en IPv4
  - Relais applicatifs: pour applications courantes

Hôte avec Double Pile

- L'hôte inclue les deux protocoles (IPv4 et IPv6) et chaque interface possède à la fois une adr IPv4 et une (ou plusieurs) adr IPv6
- Les applications fonctionnant avec IPv4 seulement utilisent IPv4, Les applications supportant IPv6 interrogent le DNS pour savoir si la destination possède une adr IPv6: si oui, l'hôte communique en IPv6; si non, IPv4 est utilisé
- => Facile à mettre en place mais ne réduit pas le besoin d'adresses et les deux types de réseaux sont complètement séparés

Tunnel IPv6-dans-IPv4

- Les paquets IPv6 encapsulés dans des paquets IPv4 à l'entrée du tunnel en ajoutant un en-tête IPv4 (avec champ PROTOCOLE=41) et décapsulés et traités comme s'ils provenaient du réseau IPv6 à la sortie du tunnel



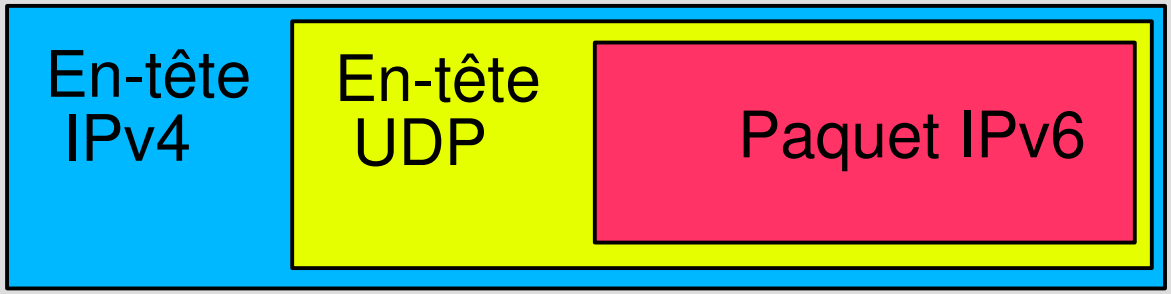
- Les routeurs (ou hôtes) d'entrée et sortie du tunnel doivent être double pile
- Pour la couche v6: le tunnel est vu comme un une liaison v6 (un seul saut) et le réseau v4 comme une couche de niveau 2

Tunnel Broker

- Service web en IPv4 qui aide l'utilisateur à créer un tunnel v6/v4 avec un de ses routeurs:
  - L'utilisateur est identifié
  - Le tunnel broker configure sa partie du tunnel et envoie les paramètres à l'utilisateur pour qu'il configure l'autre partie du tunnel sur sa machine hôte
- Utilise le protocole TSP (Tunnel Setup Protocol): négociation automatisée des différents paramètres du tunnel

TEREDO (1/2)

- Protocole de tunnelage permettant à un hôte derrière un NAT d'accéder à l'Internet IPv6 par le biais d'un serveur et de relais Teredo



- Les paquets IPv6 sont encapsulés dans des paquets UDP (eux-même encapsulés dans des paquets IPv4) pour traverser le réseau IPv4 et les serveurs NAT

TEREDO (2/2)

- Format des adresses:

32 bits	32 bits	16 bits	16 bits	32 bits
Préfixe teredo 2001:0::/32	@v4 serveur	Flags	Port	@v4 client

- Limitations:
  - Complexe
  - Ne fonctionne pas avec tous les types de NAT
  - Nombre limité de relais Teredo dans l'Internet

6to4

- Le mécanisme 6to4 permet d'interconnecter entre eux des sites IPv6 isolés en créant des tunnels automatiques IPv6 dans IPv4 en fonction du destinataire des données. Utilise 2 entités:
  - le routeur de bordure, encapsule les paquets IPv6 dans des paquets IPv4, est connecté à IPv4 et IPv6
  - le relais 6to4: équipement réseau dont l'adresse est bien connue (adresse anycast). Il assure la connexion à l'Internetv6.
- Format des adresses:

16 bits	32 bits	16 bits	64 bits
2002::/16	@ IPv4 du routeur de bordure	ss-rés	ident_interface

Déploiement: applications

Peu de modifications sont en général nécessaires (sauf si l'application utilise les adresses)

- nouveau type de sockets en C: AF_INET6 au lieu de AF_INET
- pas de modification en Java grâce aux objets

Peu de services proposés en Ipv6 actuellement :

- 30% des 1000 top sites web accessibles en v6
  (au 06/2022, voir http://www.worldipv6launch.org/measurements/)

Déploiement: systèmes

- Windows: support de base depuis XP
- Linux: intégré depuis les noyaux 2.2
  les noyaux à partir de 2.6 gèrent l'IPsec
- BSD: IPv6 disponible depuis longtemps.
  Les version récentes proviennent de la souche KAME (japon)
- Macintosh: standard en MacOS X (10.3)

Déploiement: Réseau

- Routeurs (Cisco, juniper, 6wind ...): OK depuis plusieurs années
  - Après mise à jour de l'IOS pour certains
  - Présence de bugs
- Réseau: le coeur de l'Internet est compatible IPv6 SFINX: point d'échange Internet français géré par Renater intègre IPv6 depuis 2002

Déploiement: PMI-PME, ISP

Les plus frileux pour l'instant!

- Entreprises :
  - Changements coûteux
  - Pas de plus-value immédiate
- ISP : lente adoption
  - Nerim: connexion ADSL IPv6 depuis 2003
  - Wanadoo: expérimentation depuis 2005
  - Free: proposé depuis décembre 2007
  - Orange : mise en place depuis 2016 sur fibre et VDSL

Voir statistiques sur google et arcep

Conclusion

- Peine à s'imposer, mais la pénurie d'adresses IPv4 est maintenant une réalité
  => revente d'adresses IPv4 pour payer transition ?
- Incitations gouvernementales : obligatoire pour les marchés (CEE et USA)
- Opportunité pour le développement dans les pays d'Asie (Inde par ex.)
- Cloud, Objets connectés ?
- IPv6 est-elle la bonne solution ?
  - RINA : Recursive InterNetwork Architecture → basé sur IPC
  - ...

Conclusion

Phases de déploiements :

1) Internet tout IPv4
2) Quelques réseaux IPV6 dans océan IPV4
3) Coexistence de grands réseaux IPv4 et IPV6
4) Quelques réseaux encore en IPv4 dans océan IPv6
5) Internet tout IPv6

… Qu'est-ce qu'on attend?