

Réseaux

Protocole Internet : adressage IPv4 et routage

IUT-2
Département Informatique

17 février 2025

Sommaire

Protocole Internet (IP) : IPv4

Principe du routage IPv4

Glossaire41

Sommaire

Protocole Internet (IP) : IPv4

Le Protocole Internet

L'adressage IPv4

Sous-réseau IPv4

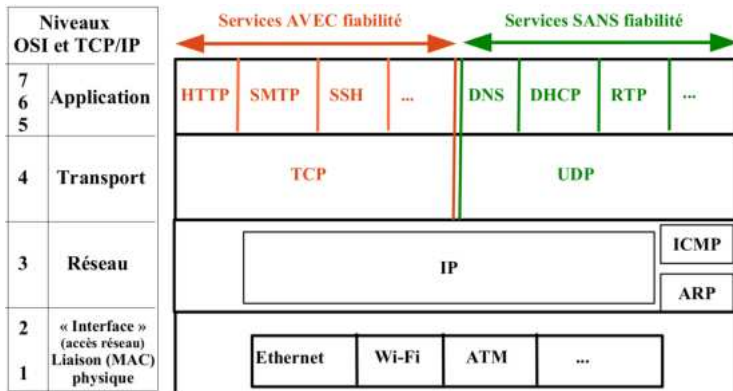
Paquets IPv4

Principe du routage IPv4

Glossaire41

Internet et son architecture TCP/IP

Internet : Interconnexion de réseaux « Inter Net » ou inter-réseau.
L'architecture de l'Internet, appelée « Architecture TCP/IP », a pour objectif le déploiement d'applications sur un inter-réseau, indépendamment des technologies physiques de ces réseaux.



Les quatre niveaux de l'architecture TCP/IP

Application :

- ▶ applications standard : FTP, HTTP, SMTP, POP, IMAP, SSH, ...
- ▶ applications de service : DNS, DHCP, NFS, X11, SNMP
- ▶ applications spécifiques

Transport :

- ▶ Protocole User Datagram Protocol (UDP) : service de transport minimal
- ▶ Protocole Transmission Control Protocol (TCP) : transport + fiabilité des connexions

Réseau :

- ▶ Protocole IP : bâti sur un adressage logique des stations
« l'adresse IP »
- ▶ Protocoles de service : ICMP (contrôle), ARP (adressage)

Interface (accès réseau) : assure l'accès aux différents réseaux physiques
(corresponds aux niveaux liaison et physique)

Identifiants dans l'architecture TCP/IP

Adresse physique du niveau interface (accès réseau) :

- ▶ dépend du réseau physique (ex. adresses **Media Access Control (MAC)** Ethernet ou Wi-Fi)

Adresse du niveau réseau :

- ▶ **Adresse IP** : adresse « logique », comprenant une partie identifiant le réseau et une partie identifiant la machine dans le réseau.
- ▶ Par exemple : 192.131.15.17
- ▶ Une (parfois plusieurs) adresse IP par interface

Identification des processus au niveau transport :

- ▶ adresse IP + **numéro de port**

Identification des utilisateurs/ressources dans les applications : **adresse mail, URL** ...

Le protocole IP

Fonction

Assurer l'acheminement des unités de données « paquets IP » ou « datagrammes IP » dans l'inter-réseau

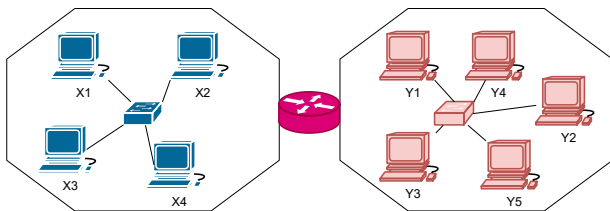
- ▶ Service sans contrôle d'erreur ni contrôle de flux de bout en bout.
- ▶ Service de base de type Best Effort (BE) (*Best Effort*)
- ▶ Service de fragmentation de données si les réseaux traversés ont des Maximum Transfer Unit (MTU) de valeurs différentes.

Deux versions du protocole :

- ▶ IPv4 : adresse sur 32 bits [rfc, 1981]
- ▶ IPv6 : adresse sur 128 bits [Hinden et Deering, 1998]

Pourquoi un adressage IP ?

But d'IP : Communication entre machines de Local Area Network (LAN)s différents.



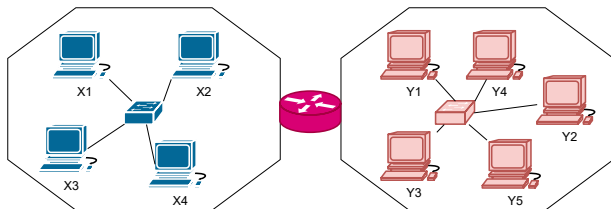
Besoin d'abstraction :

- ▶ Myriade de protocoles de niveau 2 (Ethernet n'est pas le seul protocole utilisé).
- ▶ Les adresses MAC ne sont pas organisées par réseau (mais par constructeur).
- ▶ Les adresses MAC ne sont pas uniques.
- ▶ Les tables des commutateurs ont une capacité limitée.

La connexion entre LANs se fait via une machine connectée à plusieurs LANs : le **routeur**.

Pourquoi un adressage IP ?

But d'IP : Communication entre machines de LANs différents.



l'Adresse IP est globale **inter**-réseau (dans les faits, **inter**-nationale) :

- ▶ Adresse IP représente : l'@machine et l'@réseau
 - ▶ une partie identifiant le **réseau** (organisé hiérarchiquement facilitant le routage)
 - ▶ une partie identifiant la **machine** dans le réseau
- ▶ L'adresse IP est une adresse « logique » qui ne dépend pas du matériel (Carte Interface Réseau (CIR)).
 - Elle peut être reconfigurée et une machine peut avoir plusieurs adresses IP.

Sommaire

Protocole Internet (IP) : IPv4

Le Protocole Internet

L'adressage IPv4

Sous-réseau IPv4

Paquets IPv4

Principe du routage IPv4

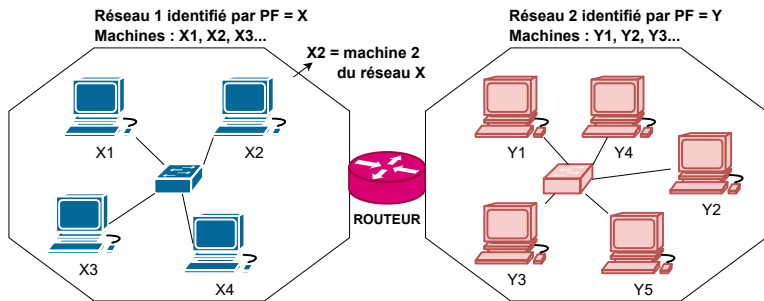
Glossaire41

Principe de l'adressage IPv4

Adressage hiérarchique de base :

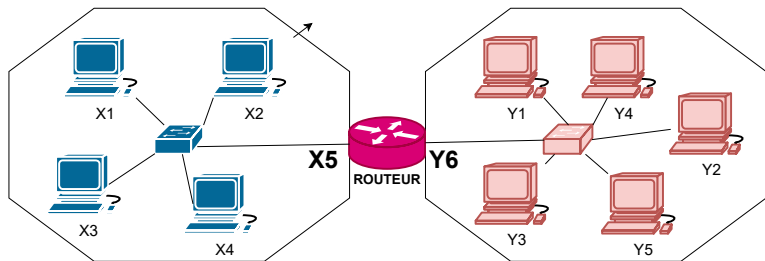
- Identification du réseau → poids forts (PF) de l'adresse IP
- Identification de chaque machine dans le réseau → poids faibles (pf) de l'adresse IP

Réseau IP : défini par une suite d'adresses contiguës, donc avec la même valeur des bits de poids forts



Adresses d'un routeur

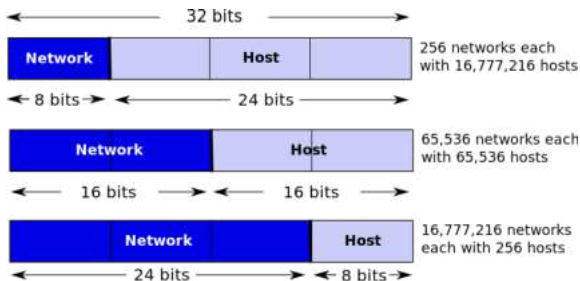
Le routeur a une adresse IP dans chacun des 2 réseaux, donc une avec le préfixe réseau X et une avec le préfixe réseau Y. Ses adresses IP sont par exemple X5 et Y6.



Analogie avec le numéro de sécurité sociale



d'après Service Public (DILA)



d'après <https://en.wikibooks.org>

Adressage IP V4

Format d'adresse

suite de $32 = n + m$ bits

- ▶ n bits pour identifier le réseau
- ▶ m bits pour identifier la machine dans ce réseau.

Plage d'adresse

Un réseau IP, identifié par ses n bits de poids forts, possède 2^m valeurs qui définissent une « plage d'adresses », répartie en :

- ▶ Une adresse IP du réseau : les m bits sont tous à 0
- ▶ Les adresses des machines : au maximum $2^m - 2$ machines
- ▶ Une adresse de diffusion : les m bits sont tous à 1

Masque de réseau

- ▶ permet de séparer la partie réseau de la partie machine par le calcul (ET bit-à-bit)
- ▶ Masque = tous les n bits sont à 1 et tous les m bits sont à 0

Exemple d'adressage dans un réseau IP

On souhaite créer un réseau de 11 stations :

- ▶ $2^4 = 16$. 4 bits sont nécessaires pour adresser chaque station
- ▶ Nombre de bits de la partie réseau : $32 - 4 = 28$ bits
11000000 10000011 00001111 0001
- ▶ Masque de ce réseau :
11111111 11111111 11111111 11110000

	Partie réseau	Partie machine
Adresse du réseau	11000000 10000011 00001111 0001	0000
Adresse station 1	11000000 10000011 00001111 0001	0001
Adresse station 2	11000000 10000011 00001111 0001	0010
Adresse station 11	11000000 10000011 00001111 0001	1011
Adresse non utilisée	11000000 10000011 00001111 0001	1101
Adresse de diffusion	11000000 10000011 00001111 0001	1111

Notations des adresses IP

Notation des adresses sous forme « décimale pointée » : les 32 bits sont découpés en 4 octets et chaque octet est codé en décimal. Par exemple :

11000000	10000011	00001111	00010001			
192	.	131	.	15	.	17

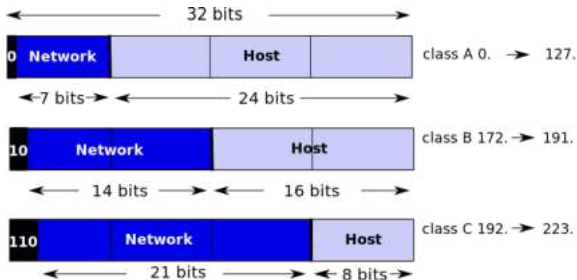
Notation **Classless Inter-Domain Routing (CIDR)**¹ :

- ▶ Définition : adresse IP / nombre de bits du préfixe réseau.
- ▶ Exemple : **192.18.131.0/24**
 - ▶ 24 bits de préfixe réseau
 - ▶ Il reste 8 bits pour la partie adresse machine : $2^8 - 2 = 254$ machines
 - ▶ Adresse de diffusion dans ce réseau : 192.18.131.255

1. La notation CIDR est équivalente à celle qui consiste à donner l'adresse du réseau et la valeur du masque de ce réseau.

Réseaux privés : héritage de la classification historique

Classification historique : classe A (/8) classe B (/16) classe C (/24)



d'après <https://en.wikibooks.org>

Réseaux privés : 192.168.0.0/16, 172.16.0.0/12 et 10.0.0.0/8 → ne sont pas routés sur Internet.

Loopback² : 127.0.0.0/8

2. peut se traduire par rebouclage ou "boucle arrière"

Adresse d'une machine Commande « ip addr »

Résultat (simplifié) de la commande ip addr :

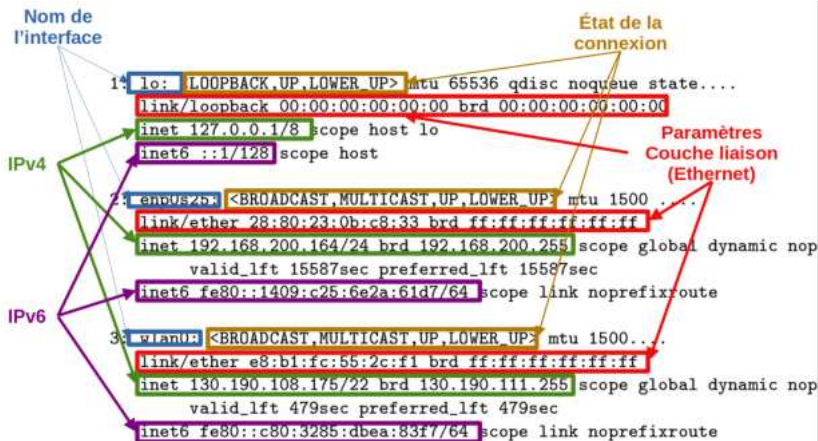
```
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state....
   link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
   inet 127.0.0.1/8 scope host lo
   inet6 ::1/128 scope host

2: enp0s25: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 ....
   link/ether 28:80:23:0b:c8:33 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
   inet 192.168.200.164/24 brd 192.168.200.255 scope global dynamic nop
       valid_lft 15587sec preferred_lft 15587sec
   inet6 fe80::1409:c25:6e2a:61d7/64 scope link noprefixroute

3: wlan0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500....
   link/ether e8:b1:fc:55:2c:f1 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
   inet 130.190.108.175/22 brd 130.190.111.255 scope global dynamic nop
       valid_lft 479sec preferred_lft 479sec
   inet6 fe80::c80:3285:dbea:83f7/64 scope link noprefixroute
```

Adresse d'une machine Commande « ip addr »

Résultat (simplifié) de la commande ip addr :



Sommaire

Protocole Internet (IP) : IPv4

Le Protocole Internet

L'adressage IPv4

Sous-réseau IPv4

Paquets IPv4

Principe du routage IPv4

Glossaire41

Les limites d'IPv4

- ▶ Adressage sur 32 bits $\rightarrow 2^{32}$ adresses disponibles (≈ 4 milliard).
 - ▶ Attribution des « lots d'adresses » et des noms de domaines de plus haut niveau par l'Internet Corporation for Assigned Names and Numbers (ICANN) de droit privé. Délégation aux Registres Internet Régionaux (RIR) comme RIPE-NCC en Europe.
 - ▶ Depuis février 2011, l'ICANN n'a plus de lots d'adresses disponibles...
- nécessité de passer à IPv6 ($3,4 \times 10^{38}$ adresses) : déploiement par les opérateurs, technologie des routeurs à faire évoluer.

Sous-réseau IPv4

- ▶ Possibilité de répartir les adresses d'un réseau IP ... pour créer de nouveaux réseaux IP... plus petits !
- ▶ Un sous-réseau IP est un réseau IP -> respect de la contiguïté des adresses allouées.
- ▶ Découpage en déplaçant « vers la droite » la limite de répartition partie réseau / partie machine.

Exemple :

- ▶ Réseau initial en /24 -> répartition : 24+8
- ▶ Pour faire 4 sous-réseaux, on prend les 2 bits de poids forts de la partie machine : 24+2=26, 8-2=6, 26+6=32.
- ▶ Les 4 valeurs différentes de ces 2 bits définissent 4 sous-réseaux
 - ▶ Sous-réseau 1 : 00 000000 à 00 111111
 - ▶ Sous-réseau 2 : 01 000000 à 01 111111
 - ▶ Sous-réseau 3 : 10 000000 à 10 111111
 - ▶ Sous-réseau 4 : 11 000000 à 11 111111

Tableau d'adresses de sous-réseaux

Comment faire 2 sous-réseaux à partir du réseau 192.18.131.0/24 ?

192.18.131.0/24	Dernier octet	Sous-réseau
192.18.131.0	0 000 0000	Sous-réseau 1 : - bit de poids fort du dernier octet : 0 - adresses de : 192.18.131.0 à 192.18.131.127 - sous-réseau d'adresse CIDR : 192.18.131.0/25
192.18.131.1	0 000 0001	
192.18.131.2	0 000 0010	
192.18.131.127	0 111 1111	
192.18.131.128	1 000 0000	Sous-réseau 2 : - bit de poids fort du dernier octet : 1 - adresses de : 192.18.131.128 à 192.18.131.255 - sous-réseau d'adresse CIDR : 192.18.131.128/25
192.18.131.129	1 000 0001	
192.18.131.254	1 111 1110	
192.18.131.255	1 111 1111	

Sommaire

Protocole Internet (IP) : IPv4

Le Protocole Internet

L'adressage IPv4

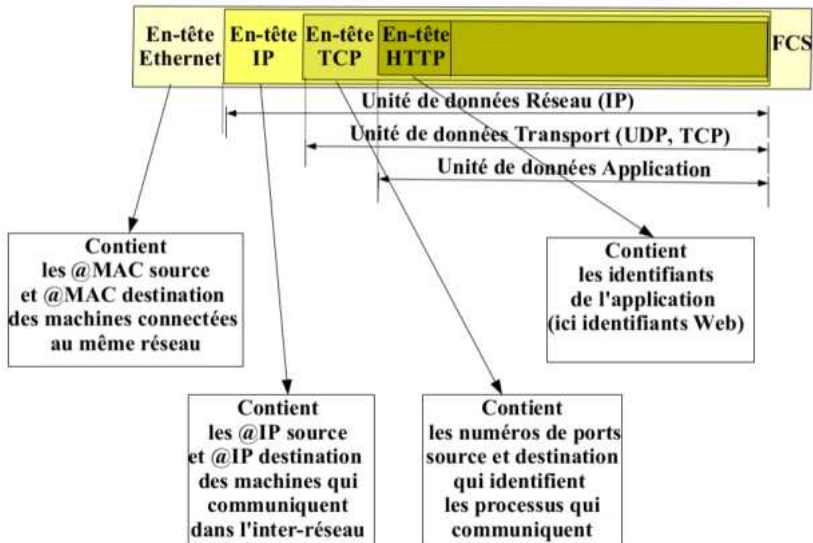
Sous-réseau IPv4

Paquets IPv4

Principe du routage IPv4

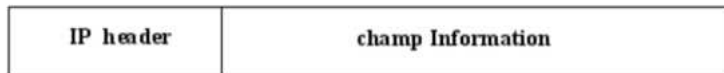
Glossaire41

Adressage et encapsulation



Format des paquets IPv4

20 octets (+ options)



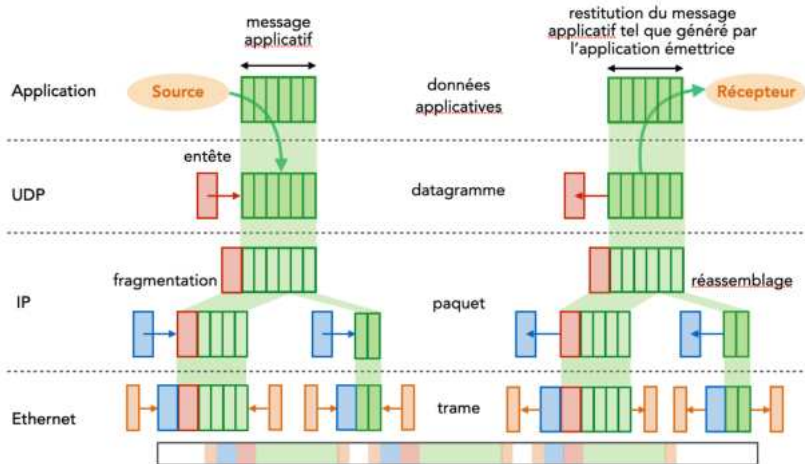
Longueur maximale: configurable, inférieure à 64 Koctets

31	23	15	0
Version	Header Lg	Type of Service	Total Length (bytes)
Identification		Flags	Fragment Offset
Time To Live		Protocol	Header Cchecksum
IP Source Address			
IP Destination Address			
Options			

Champs de l'en-tête IPv4

- ▶ **Version** (4 bits) : valeur = 4.
- ▶ **Header Lg** (4 bits) : longueur de l'en-tête en mots de 32 bits.
- ▶ **Type of Service** ou champ DS (DiffServ) : LBE, BE, BBE, etc.
- ▶ **TTL** « Time To Live » (1 octet) : nombre maximum de routeurs que le paquet est autorisé à traverser, décrémente par chaque routeur traversé.
- ▶ **Protocol** : identifiant du protocole en charge du champ Information (ce qu'il y a dans le paquet IP !) : ICMP = (01) 16, TCP = (06) 16, UDP = (17) 16 .
- ▶ **Source Address** : adresse IP de la station émettrice du paquet.
- ▶ **Destination Address** : adresse IP de la station réceptrice du paquet.
- ▶ **Identification Flag** et **Fragment offset** (32 bits) : champs utilisés pour fragmenter et réassembler les paquets

Fragmentation IP



tiré de Prometheus Spathis

Sommaire

Protocole Internet (IP) : IPv4

Principe du routage IPv4

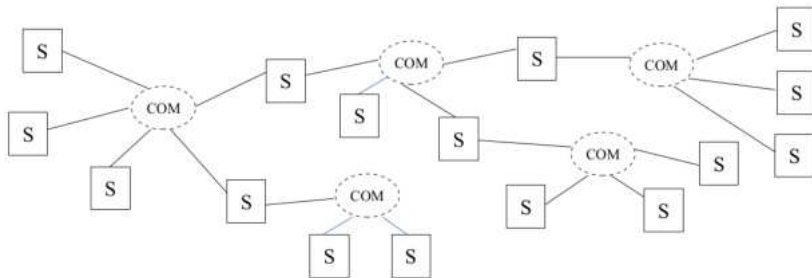
Définition du routage

IP interaction avec les autres couches TCP/IP

Glossaire41

Définition du routage

Dans l'inter-réseau Internet, la sélection d'un chemin partant de la source vers la destination est appelée le **routage**.



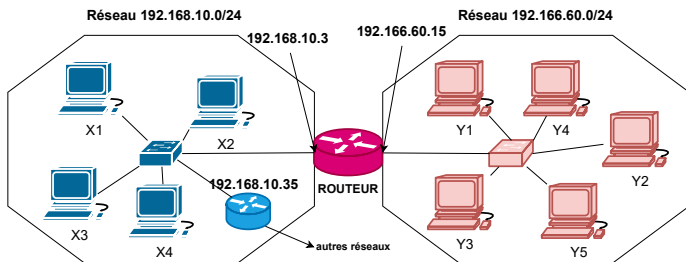
Un chemin passe par 3 types de stations : la source, un nombre variable de routeurs (y compris 0) et la destination.

La fonction de routage démarre dès la source.

Routeur IP

Un **routeur IP** est un équipement connecté à plusieurs réseaux IP. Pour permettre l'acheminement des paquets d'un réseau à l'autre, il possède :

- ▶ une adresse logique (IP) dans chacun des réseaux auquel il est connecté.
- ▶ une adresse physique (MAC) dans chacun des réseaux auquel il est connecté.



Routage IP

Principe

lorsqu'un paquet IP arrive dans un routeur, celui-ci retransmet le paquet soit :

- ▶ directement à la station destinataire si celle-ci est connectée au routeur (elle est dans un même réseau) ;
- ▶ vers un autre routeur auquel il est directement connecté. . .le routage se fait « de proche en proche ».

Table de routage

La détermination de la route suivante se fait par une table de routage :

- ▶ Table de correspondance entre adresse de réseau destinataire et routeur suivant (avec interface d'envoi de la trame).

Toute station d'un réseau IP a une table de routage, en particulier la station source.

Table de routage

Obtenu avec la commande `netstat -r` ou `ip route`

Destination	Gateway	Genmask	Iface
192.168.10.0	0.0.0.0	255.255.255.0	eth0
192.166.60.0	0.0.0.0	255.255.255.0	eth1
0.0.0.0	192.168.10.35	0.0.0.0	eth0

Colonnes principales : **Destination**, **Gateway** (passerelle), **Genmask** (masque de réseau) et **Iface** (Interface CIR)

- ▶ Destination & Genmask (masque de réseau) : pour identifier le réseau auquel appartient la machine destinataire du paquet. Si Destination = 0.0.0.0 alors il s'agit de la route par défaut.
- ▶ Gateway & Iface : pour déterminer vers quelle direction et quelle trame envoyer : vers un routeur (**Gateway**) ou vers le destinataire final si Gateway est vide (noté 0.0.0.0 ou noté *)

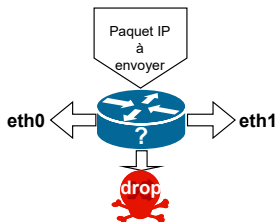
Attention : la colonne destination indique des réseaux de destination (ensemble de machines) mais non des adresses de machines.

Routage

Destination	Gateway	Genmask	Iface
192.168.10.0	0.0.0.0	255.255.255.0	eth0
192.166.60.0	0.0.0.0	255.255.255.0	eth1
0.0.0.0	192.168.10.35	0.0.0.0	eth0

Si la destination est →
192.168.10.8

ET bit-à-bit avec le masque de la
1re ligne
192.168.10.8 & 255.255.255.0 =
192.168.10.0



	192.	168.	10.	8
	11000000	10101000	00001010	00001000
	255.	255.	255.	0
AND	11111111	11111111	11111111	00000000
	192.	168.	10.	0
	11000000	10101000	00001010	00000000

→ le paquet est envoyé sur eth0

Sommaire

Protocole Internet (IP) : IPv4

Principe du routage IPv4

Définition du routage

IP interaction avec les autres couches TCP/IP

Glossaire41

ARP : Lien entre adresse IP et adresse MAC

Quand un paquet IP doit être acheminé d'une station vers une autre du même réseau physique : Comment déterminer l'adresse MAC du destinataire ?

→ ARP permet d'associer une adresse MAC à l'adresse IP correspondant à la même CIR.

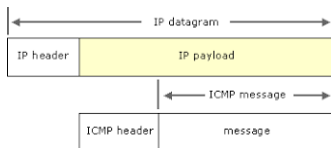
Protocole Address Resolution Protocol (ARP)

- 1 Émission d'une requête ARP en Broadcast demandant l'adresse MAC de la machine dont l'adresse IP est donnée en paramètre.
- 2 La réponse ARP est renvoyée par la station qui a cette adresse MAC.
- 3 Stockage de ce couple (@IP, @MAC) pour une durée limitée dans une table appelée « cache ARP ».
- 4 Accès au cache ARP par la commande : ip neigh (pour neighbour).

ICMP : contrôle IP

IP ne fait pas de contrôle d'erreur. Impossible de savoir s'il y a un problème de transmission.

→ surcouche Internet Control Message Protocol (ICMP) dont les messages sont encapsulés dans les paquets IP.



Les paquets ICMP précisent par exemple les différents types de message de contrôle

- 0 Réponse d'écho
- 3 destinataire inaccessible des stations avec des CIR à la norme 802.11 permettant de se connecter à un réseau sans fil.
- 8 demande d'écho
- 11 Temps dépassé (le paquet a épuisé le TTL)

ICMP et utilitaires

ICMP est utilisé par des utilitaires pour tester le réseau.

Par exemple

- ▶ ping utilise les types Demande d'écho (8) et Réponse d'écho (0) pour
 - ▶ tester l'accessibilité d'une autre machine à travers un réseau IP.
 - ▶ mesurer le temps mis pour recevoir une réponse : Round-Trip Time (RTT) (temps aller-retour).
- ▶ traceroute peut déterminer par quels routeurs passe un paquet en utilisant des demandes d'écho (8) avec un TTL de plus en plus grand.

ICMP – trace Wireshark et encapsulation

*enp5960u2u4

Fichier Editer Vue Afficher Capture Analyser Statistiques Téléphonie Wireless Outils Aide

Wireshark

icmp

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
3.	2.805765104	129.88.65.106	193.55.51.227	ICMP	98	Echo (ping) request Id=0x7595, seq=1/256, ttl=64 (reply in 367)
3.	2.807841721	193.55.51.227	129.88.65.106	ICMP	98	Echo (ping) reply Id=0x7595, seq=1/256, ttl=56 (request in 366)
5.	3.805750286	129.88.65.106	193.55.51.227	ICMP	98	Echo (ping) request Id=0x7595, seq=2/512, ttl=64 (reply in 535)
5.	3.807935779	193.55.51.227	129.88.65.106	ICMP	98	Echo (ping) reply Id=0x7595, seq=2/512, ttl=56 (request in 534)
6.	4.806482149	129.88.65.106	193.55.51.227	ICMP	98	Echo (ping) request Id=0x7595, seq=3/768, ttl=64 (reply in 672)
6.	4.807887573	193.55.51.227	129.88.65.106	ICMP	98	Echo (ping) reply Id=0x7595, seq=3/768, ttl=56 (request in 671)
8.	5.806748843	129.88.65.106	193.55.51.227	ICMP	98	Echo (ping) request Id=0x7595, seq=4/1024, ttl=64 (reply in 806)
8.	5.809930150	193.55.51.227	129.88.65.106	ICMP	98	Echo (ping) reply Id=0x7595, seq=4/1024, ttl=56 (request in 805)

Frame 805: 98 bytes on wire (784 bits), 98 bytes captured (784 bits) on enp5960u2u4
Ethernet II, Src: 38:14:20:06:09:40, Dst: 58:00:bb:59:a3:f0
Internet Protocol Version 4, Src: 129.88.65.106, Dst: 193.55.51.227
Internet Control Message Protocol
Type: 8 (Echo (ping) request)
Code: 0
Checksum: 0xe7f2 [correct]
[Checksum Status: Good]
[Response Frame: 806]
Timestamp from icmp data: Feb 17, 2025 14:06:47.001217009 CET
[Timestamp from icmp data (relative): 0.000029712 seconds]
Data (40 bytes)

0000 58 00 bb 59 a3 f0 38 14 20 06 09 40 00 00 45 00 X Y 8 (10 E
0010 00 54 2b 3e 40 00 40 01 57 8e 01 58 41 6a c1 37 T + 0 0 W XA J 7
0020 33 e3 08 00 e7 f2 75 95 00 04 67 34 b3 67 00 00 3 ---- u g+ g- 7
0030 00 06 c1 04 09 00 00 00 00 00 10 11 12 13 14 15
0040 16 17 18 19 1a 1b 1c 1d 1e 1f 20 21 22 23 24 25!*%&
0050 26 27 28 29 2a 2b 2c 2d 2e 2f 30 31 32 33 34 35 8' () * + , - . / 0 1 2 3 4 5
0060 36 37 67

traceroute : exemple

Par quel chemin passe-t-on pour en arriver à Parcoursup ?

```
$traceroute www.parcoursup.fr
```

```
traceroute to www.parcoursup.fr (194.167.72.228), 30 hops max, 60 byte packets
```

```
 1  193.55.51.129 (193.55.51.129)  1.725 ms  1.827 ms  1.989 ms
 2  193.55.51.1 (193.55.51.1)  4.946 ms  5.140 ms  5.376 ms
 3  r-viallet1.grenet.fr (193.54.184.185)  1.257 ms  1.244 ms  1.231 ms
 4  tigre1.grenet.fr (193.54.185.17)  11.684 ms  11.668 ms  11.649 ms
 5  te1-4-grenoble-rtr-021.noc.renater.fr (193.51.181.94)  1.565 ms  1.545 ms  1.744 ms
 6  te0-0-0-1-ren-nr-lyon2-rtr-091.noc.renater.fr (193.51.180.210)  8.504 ms  ten0-0-0-12-r
 7  xe-0-0-1-paris2-rtr-131.noc.renater.fr (193.51.180.54)  8.105 ms  9.294 ms  xe0-1-9-par
 8  xe-0-0-14-paris1-rtr-131.noc.renater.fr (193.51.177.150)  9.199 ms  8.550 ms  xe-1-1-2-j
 9  * * *
10  hu0-4-0-0-ren-nr-paris1-rtr-091.noc.renater.fr (193.51.180.135)  9.677 ms  9.928 ms  9
11  * * *
...
30  * * *
```


Glossaire I

ARP Address Resolution Protocol. 36

BE Best Effort. 7

CIDR Classless Inter-Domain Routing. 16

CIR Carte Interface Réseau. 9

ICANN Internet Corporation for Assigned
Names and Numbers. 21

ICMP Internet Control Message Protocol. 37

LAN Local Area Network. 8

MAC Media Access Control. 6, 8

MTU Maximum Transfer Unit. 7

RIR Registres Internet Régionaux. 21

RTT Round-Trip Time. 38

TCP Transmission Control Protocol. 5

UDP User Datagram Protocol. 5

Références I



(1981).

Internet Protocol.

RFC 791.



Hinden, B. et Deering, D. S. E. (1998).

Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification.

RFC 2460.