

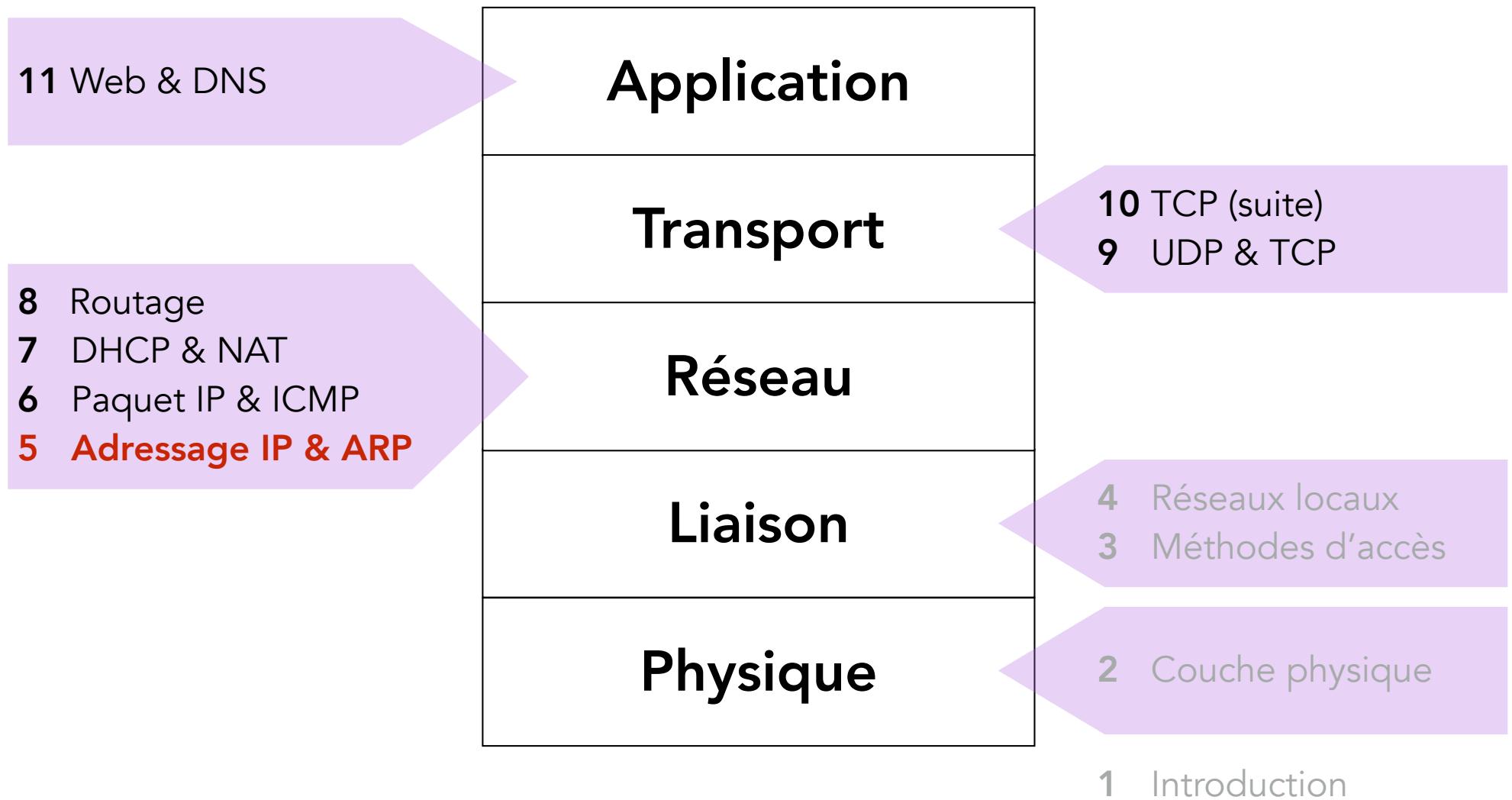
Couche Réseau Adressage IP & ARP

UE LU3IN033 Réseaux
2025-2026

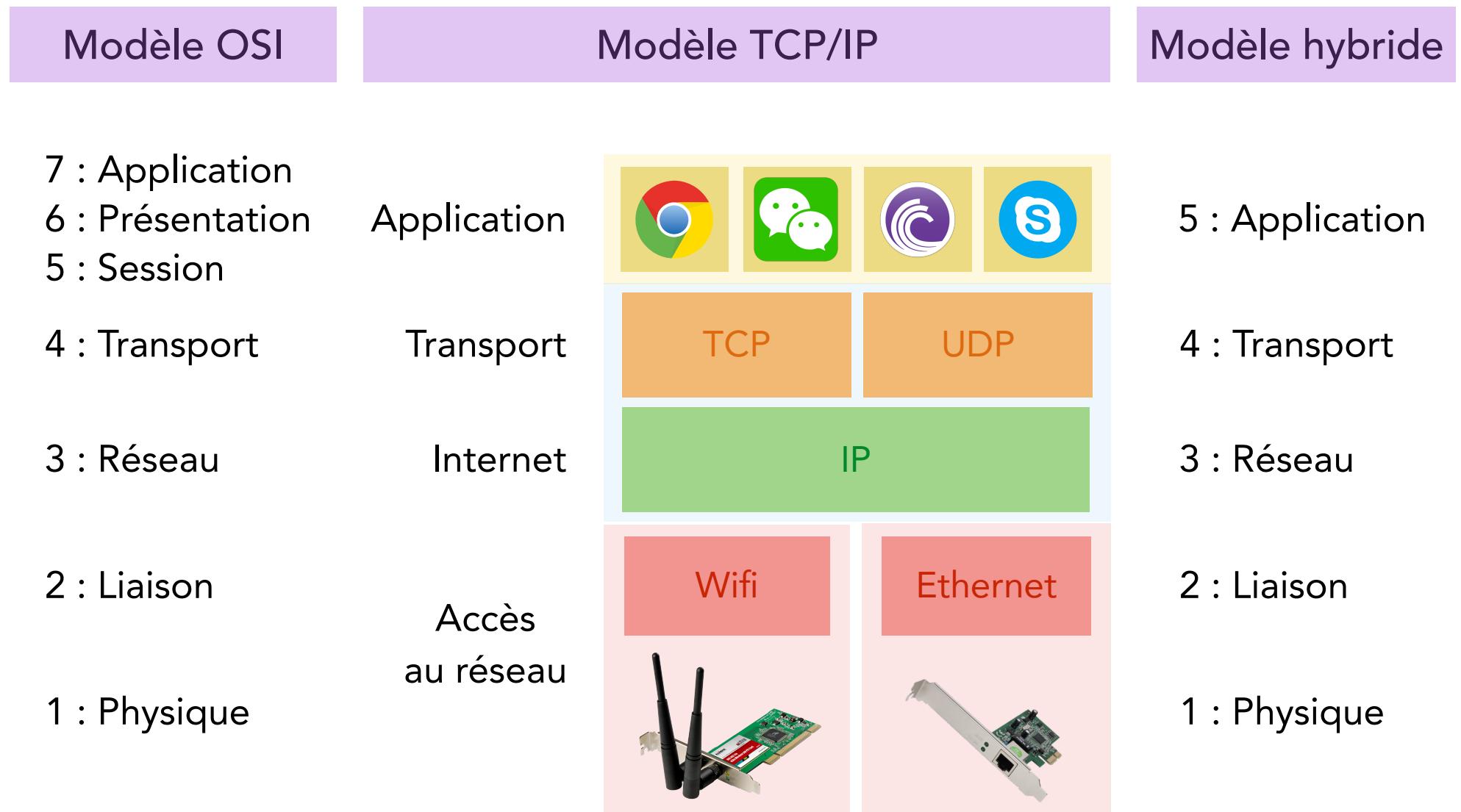
Bruno Baynat
Bruno.Baynat@sorbonne-universite.fr



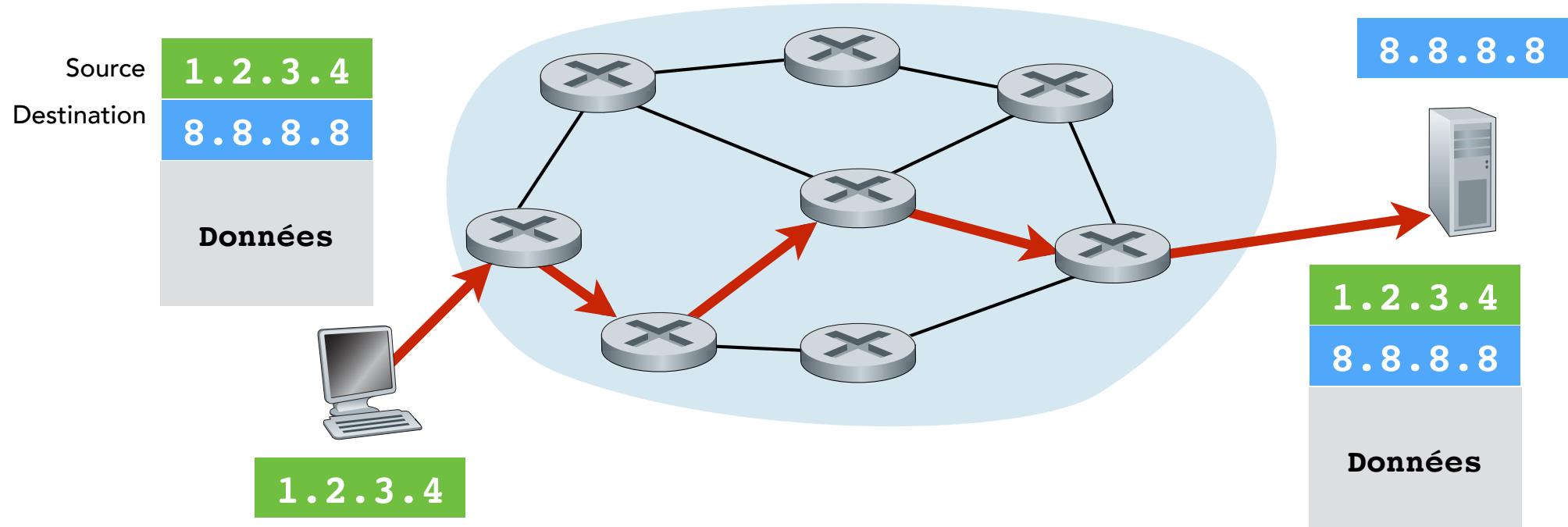
Programme de l'UE LU3IN033



Pile protocolaire Internet

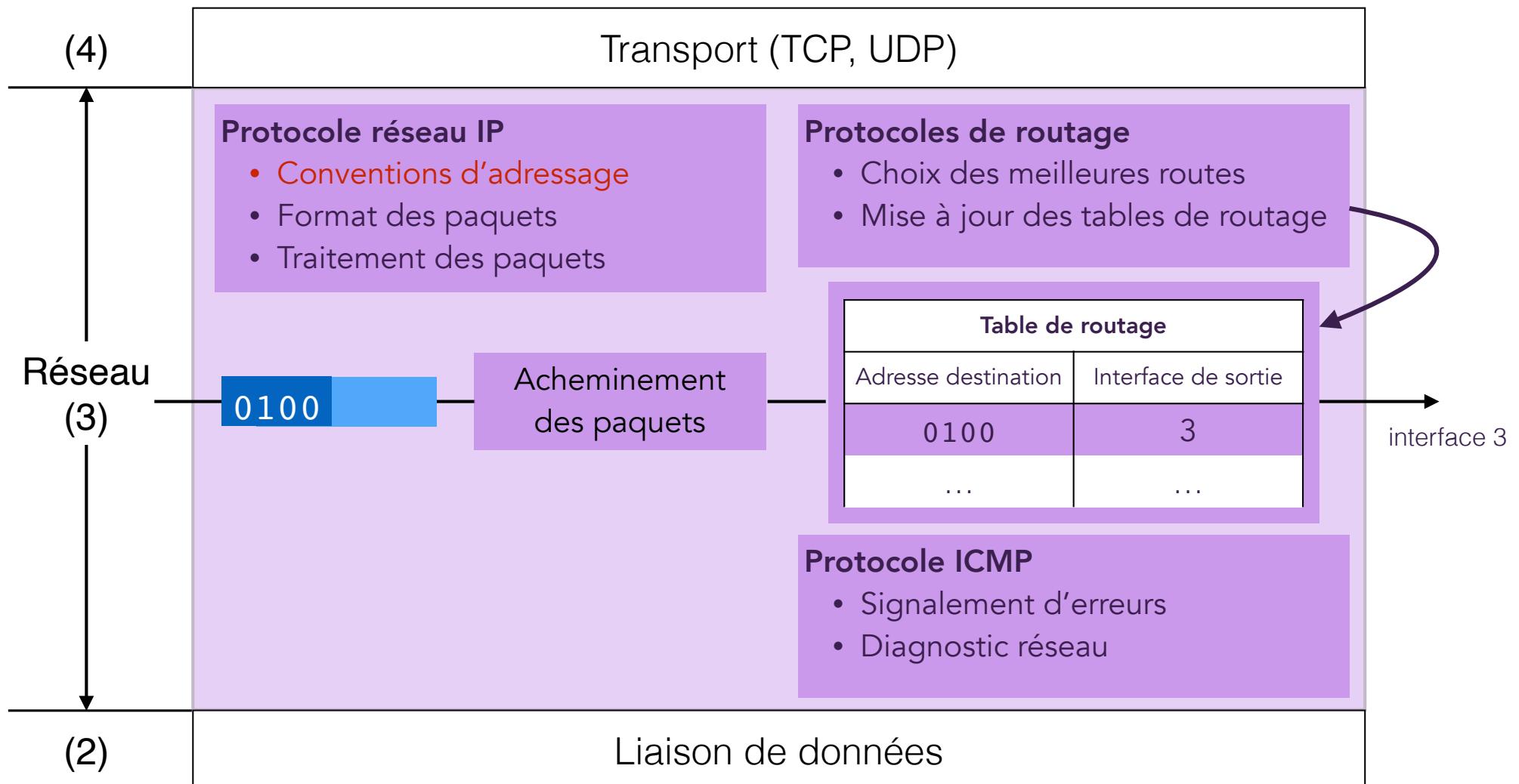


Rôle de la couche réseau



Les paquets de données sont acheminés de proche en proche en se basant sur l'adresse IP de leur destination

Couche réseau



Plan du cours

- Adresses IP
 - Format et notation
 - Adresses IP vs adresses MAC
 - CIDR
 - *Subnetting* et *Supernetting*
- Protocole ARP
 - Rôle
 - Format des messages ARP

Adressage IP

Adressage

- Les adresses identifient les noeuds d'un réseau
 - pour acheminer des données vers une destination
 - pour identifier la source des données
- Questions
 - Pourquoi une même machine possède-t-elle plusieurs adresses ?
 - Qui attribue les adresses aux machines ?
 - Comment les machines découvrent-elles leur(s) adresse(s) ?
 - Comment une machine connaît-elle l'adresse (les adresses) de la machine à qui elle doit envoyer des données ?
 - ...

Adresses postales

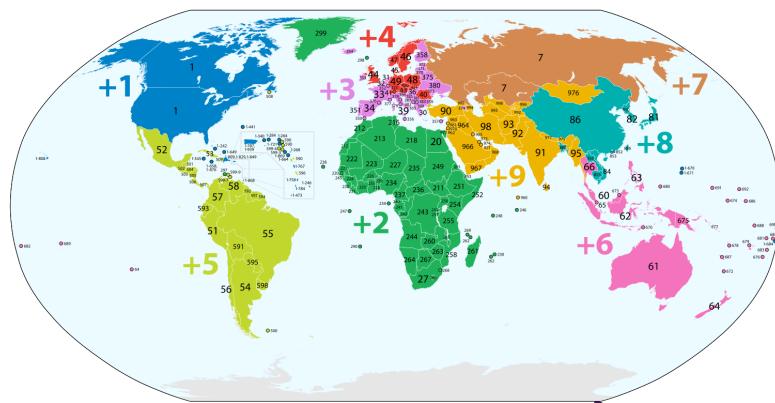
- Exemple

- Pays : France
- Localité : Paris
- Code postal : 75005
- Libellé de la voie : 4 place Jussieu
- Complément d'adresse : 26-00/112
- Identité du destinataire : Bruno Baynat

Corrélation entre adresse postale et découpage du territoire en pays, départements, villes et arrondissements

Numéros de téléphone

- Géographiques
 - Indicatifs nationaux



- Indicatifs régionaux



- Non géographiques

- 112 : numéro d'urgence (911)
- 30XX, 31XX, 36XX : numéros courts
- 08 : numéros SAV (0800 numéros verts)
- 09 : services téléphoniques offerts par les FAI
- 06, 07 : numéros des téléphones mobiles

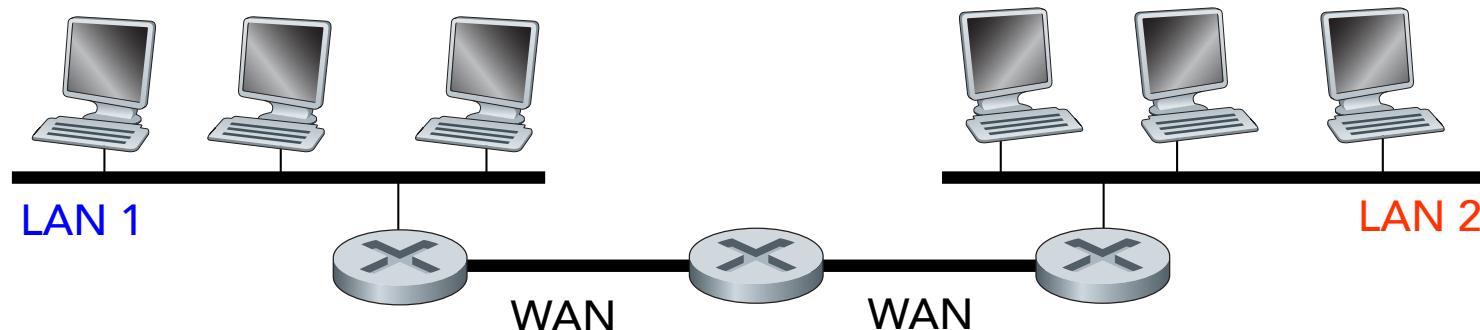
Corrélation entre numéros de téléphone et zones géographiques

Adresses IP

- Longueur des adresses
 - IPv4 : codée sur 32 bits $\rightarrow 2^{32} = 4\ 294\ 967\ 296$ adresses
 - IPv6 : codée sur 128 bits $\rightarrow 2^{128} > 3.10^{38}$ adresses
- IPv4
 - Notation « décimale pointée » : les 32 bits sont regroupés en 4 groupes de 8 bits convertis en décimal et séparé par un point '.' : 132.227.61.3
- Une adresse IP se compose de deux parties : 132.227.61.3
 - préfixe : identifiant de réseau (*NetId*) 132.227
 - suffixe : identifiant de la machine hôte (*HostId*) 61.3
- 2 adresses particulières
 - suffixe « tout à 0 » : adresse du réseau 132.227.0.0
 - suffixe « tout à 1 » : adresse de diffusion (*broadcast*) 132.227.255.255

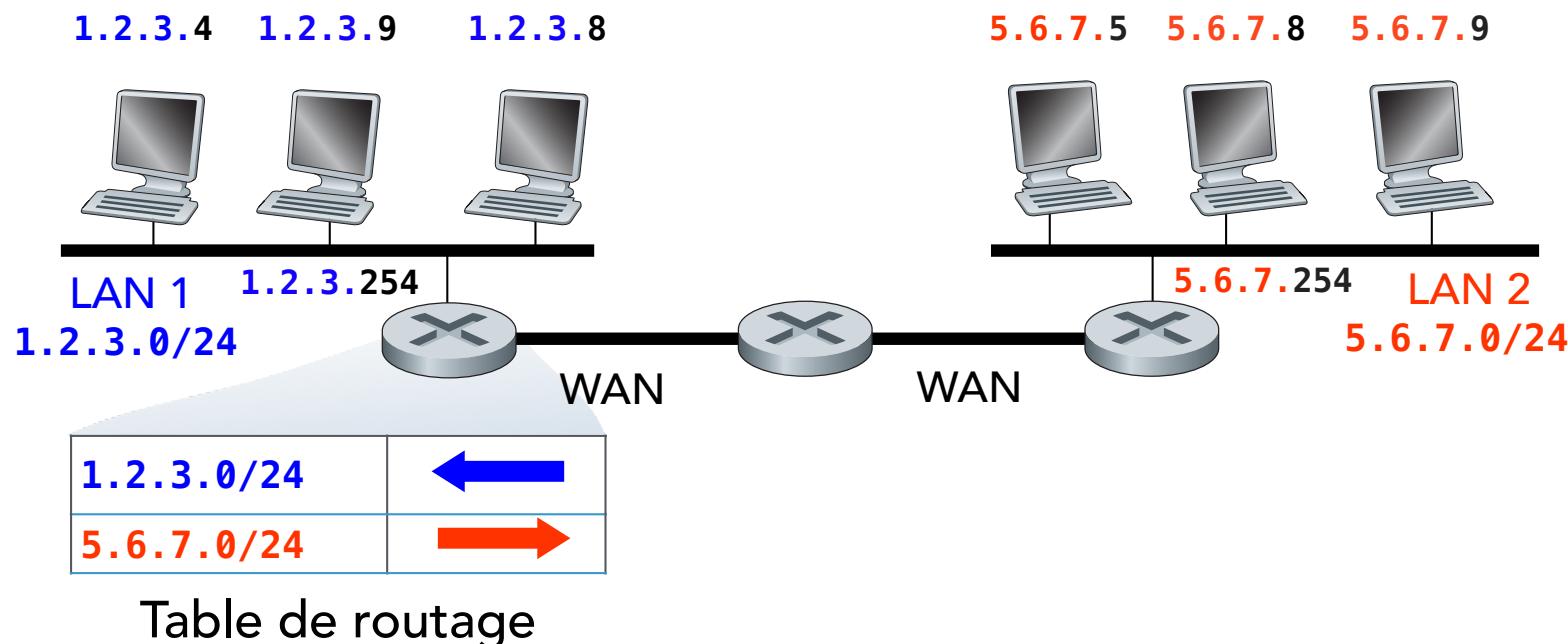
Adressage IP hiérarchique

- Attribution des adresses IP hiérarchique à deux niveaux
 1. attribution de l'adresse réseau
 2. numérotation des machines hôtes



Adressage IP hiérarchique

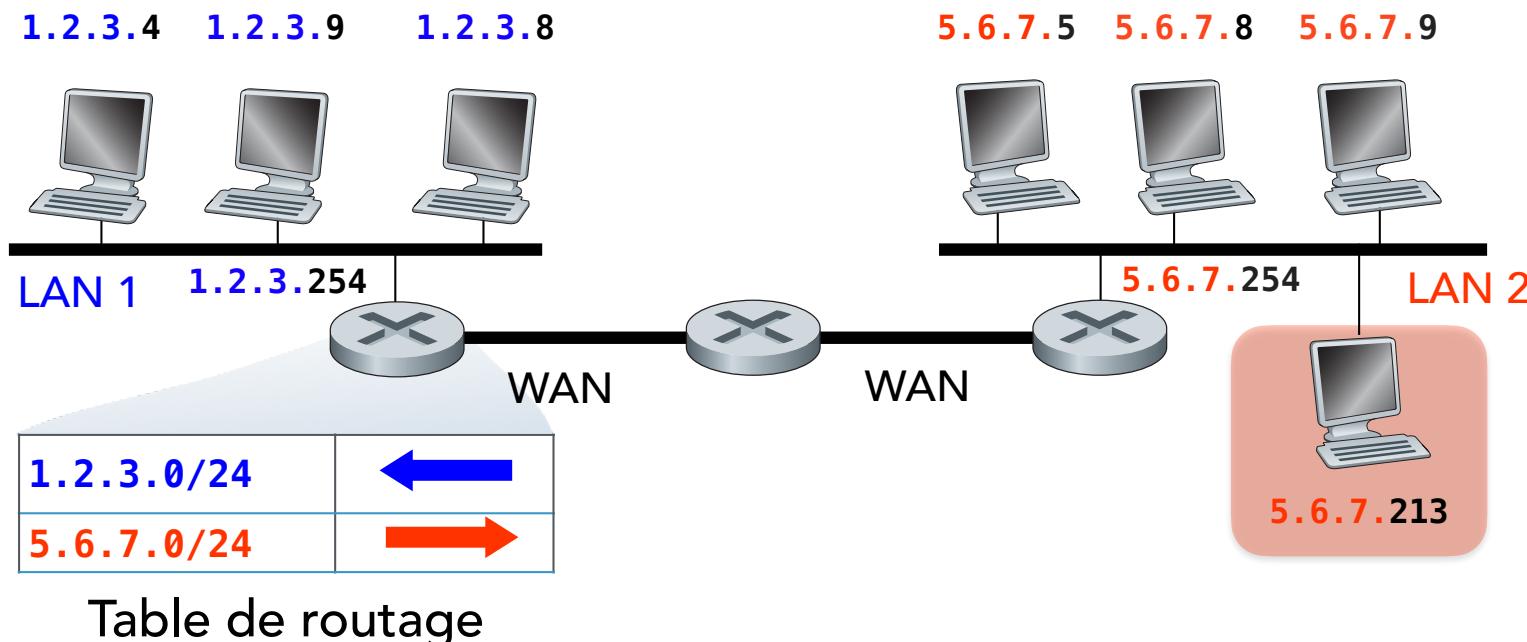
- Attribution des adresses réseau
 - 1.2.3.0/24 pour le LAN1
 - 5.6.7.0/24 pour le LAN2
- Puis, numérotation des machines hôtes
- Tables de routage : une entrée par réseau



Adressage IP hiérarchique

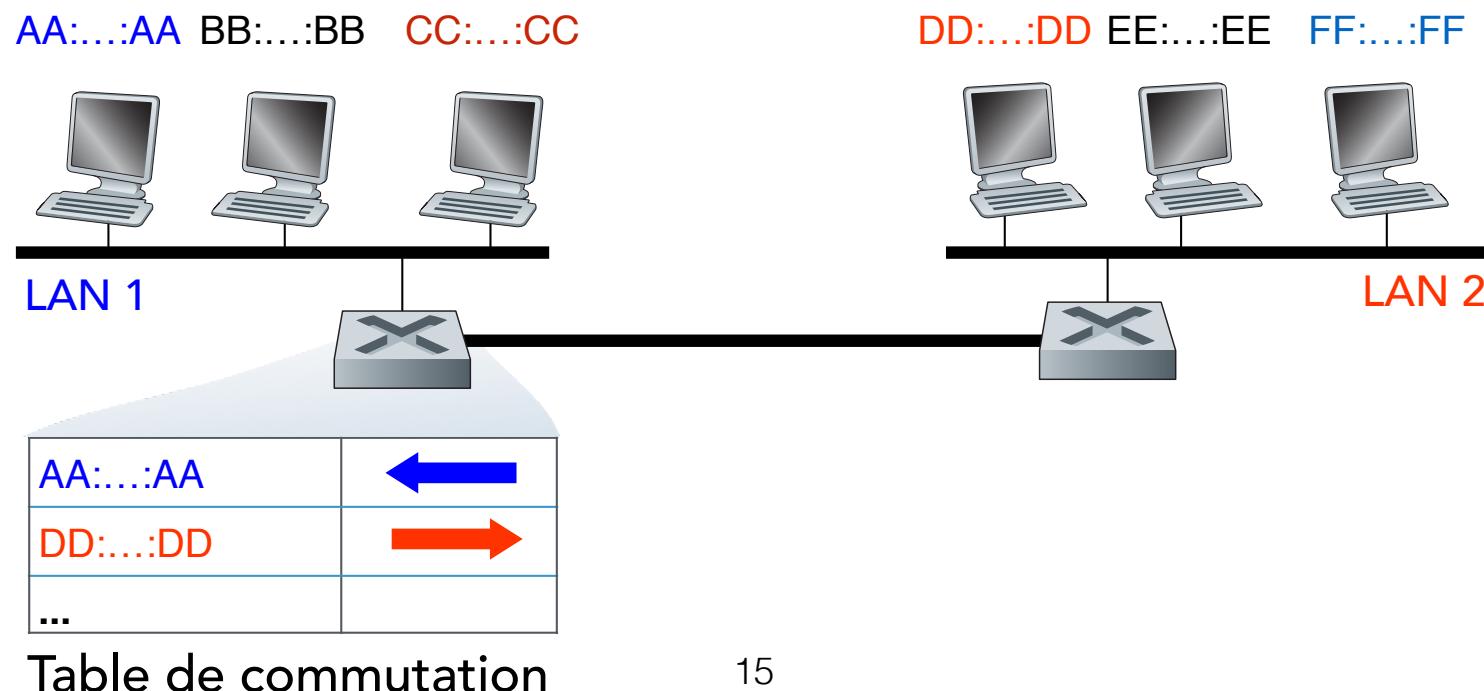
Ajout/retrait de machines

- La topologie interne des réseaux est invisible pour les routeurs
 - ajout de la machine hôte 5.6.7.213 sur le LAN2
 - pas de modification des tables de routage
- Les changements internes aux réseaux locaux n'affectent pas les routeurs



Adressage MAC plat

- Attribution des adresses MAC indépendamment de leur réseau d'appartenance
- Tables de commutation : une entrée par machine hôte

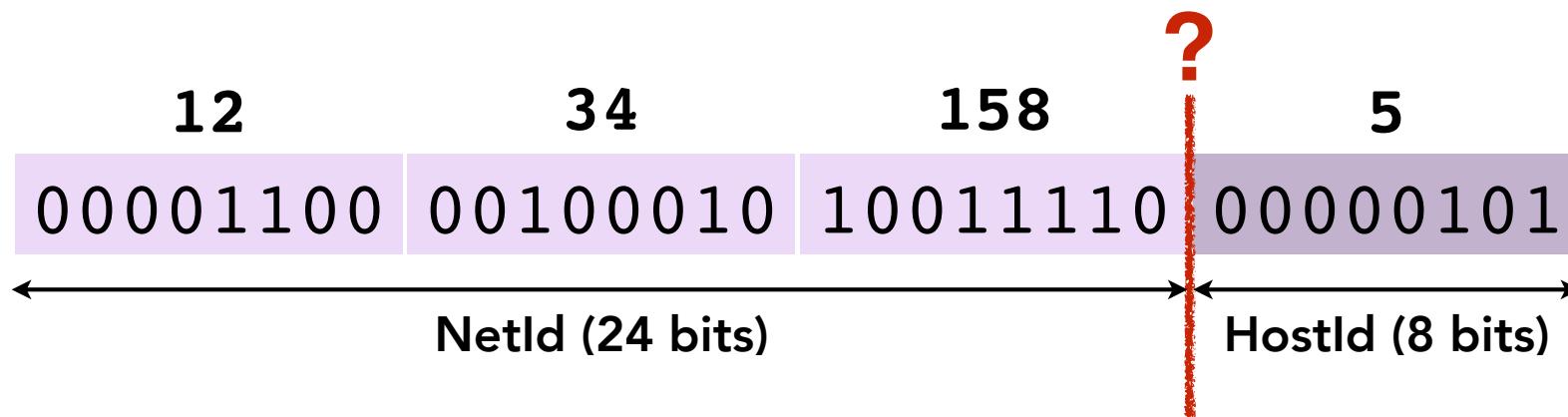


Adresses IP vs Adresses MAC

	Adresse IP (v4)	Adresse MAC
Couche	3 : Réseau (paquets)	2 : Liaison (trames)
Exemple	132.227.61.3	58:55:CA:F8:C1:87
Longueur	4 octets = 32 bits (IPv4)	6 octets = 48 bits (Ethernet)
Structure	Hiérarchique	Plate
Configuration	Logicielle (manuelle ou dynamique)	Matérielle (en dur)
Portabilité	Variable selon la localisation de la machine et au cours du temps	Constante pour toute la durée de vie de la carte réseau
Allocation, niveau supérieur	Prefixes de longueur variable, allouée par l'ICANN, un RIR et un ISP	Blocs d'adresses de taille identique (2^{24}), allouées par l'IEEE aux constructeurs
Allocation, niveau inférieur	Attribuée aux interfaces par l'administrateur local ou DHCP	Attribuée aux cartes réseau par les constructeurs

Hiérarchie des adresses IP

- Les adresses IP des machines connectées au même réseau
 - partagent le même préfixe réseau (NetId)
 - sont identifiées par un suffixe machine (HostId) unique sur ce réseau
 - Exemple : 12.34.158.5

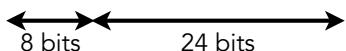


Quelle longueur choisir pour le préfixe ?
Comment spécifier la longueur de ce préfixe ?

Longueur des préfixes

Adressage avec classes (A, B, C)

- Historiquement, les adresses IP (unicast) ont été divisées en 3 classes : A, B, et C
 - La classe d'une adresse IP était déterminée par ses premiers bits
 - Classe A : 0...
 - Classe B : 10...
 - Classe C : 110...
 - La longueur du préfixe d'une adresse IP était déterminée par sa classe
 - Classe A : NetId sur 8 bits



Adressage sans classe (CIDR)

- *Class-less Inter-Domain Routing*
 - La longueur du préfixe est déterminée par une « adresse » supplémentaire appelée masque primaire

- Les bits du préfixe sont positionnés à 1 dans le masque, les autres à 0

- Exemple : 255.255.248.0
 - 11111111.11111111.1111000.00000000
 - NetId sur 21 bits et HostId sur 11 bits
 - notation « slashée » : /21 
 - adapté à des réseaux pouvant héberger 2046 (2¹¹ - 2) machines

HostIDs réservés

- tout à 0 : adresse réseau
 - tout à 1 : adresse de diffusion

Avec classes

	12	34	158	5
Adresse	00001100	00100010	10011110	00000101
Classe A	NetId : 8 bits		HostId : 24 bits	
Adresse réseau	00001100	00000000	00000000	00000000

Sans classe

	12	34	158	5
Adresse	00001100	00100010	10011	110 00000101
	255	255	248	0
Masque	11111111	11111111	11111	000 00000000
	NetId (préfixe) : 21 bits			
	12	34	152	0
Adresse réseau	00001100	00100010	10011	000 00000000

Adressage avec classes vs sans classe

- Le découpage des adresses IP en classes prédéfinies était inefficace

Classe	A	B	C
NetId / HostId	8 bits / 24 bits	16 bits / 16 bits	24 bits / 8 bits
Plage d'adresses	0.0.0.0 - 127.255.255.255	128.0.0.0 - 191.255.255.255	192.0.0.0 - 223.255.255.255
Nb de réseaux de la classe	$2^7 = 128$	$2^{14} = 16.384$	$2^{21} = 2.097.152$
Nb d'adresses IP par réseau	$2^{24} = 16.777.216$	$2^{16} = 65.536$	$2^8 = 256$

- Exemple
 - Le campus de Jussieu a deux adresses de classe B (132.227.0.0/16 et 134.157.0.0/16) : 131.072 adresses
 - Seules 10% de ces adresses sont utilisées (~13,000 machines)
- Le CIDR attribue une adresse réseau selon la taille du réseau
 - Un réseau nécessitant $N = 2^n$ adresses IP a besoin d'un préfixe en / $32-n$



Réorganisation des classes

Subnetting

- A l'origine concernait principalement les adresses de classe B
- Découpage d'un réseau de classe B en plusieurs sous-réseaux
- Configuration d'un masque de longueur supérieure à 16

132.227.0.0/16 → 132.227.(0-224).0/19

132	227	0000	0000	0
132	227	0010	0000	0
		0100	0000	
		0110	0000	
...		1000	0000	...
		1010	0000	
		1100	0000	
132	227	1110	0000	0

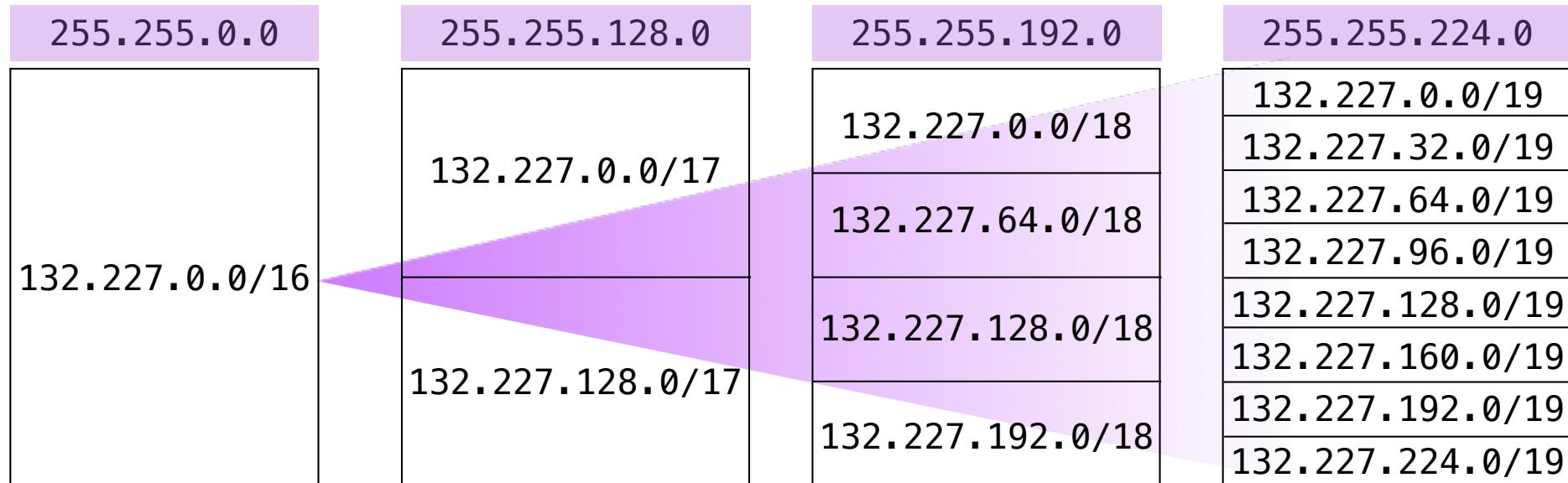
Supernetting

- A l'origine concernait principalement les adresses de classe C
- Agrégation de plusieurs réseaux de classes C contigüés en un seul réseau
- Configuration d'un masque de longueur inférieure à 24

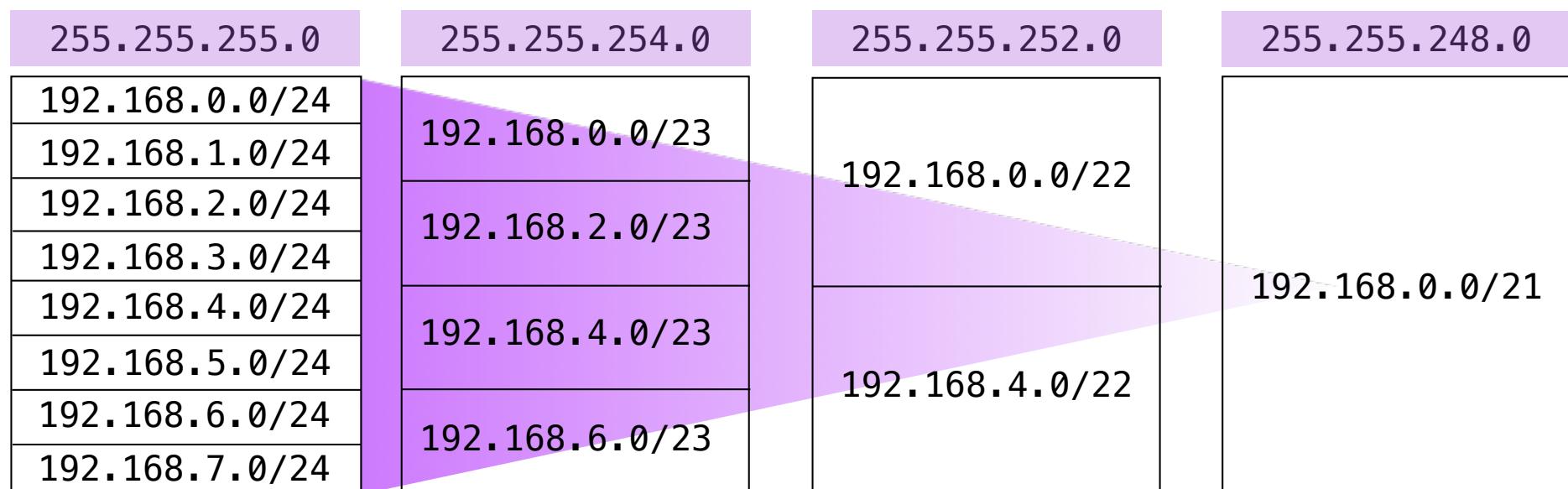
192.168.(0-7).0/24 → 192.168.0.0/21

192	168	0000	0000	0
192	168	0000	0001	0
		0000	0010	
		0000	0011	
...		0000	0100	...
		0000	0101	
		0000	0110	
192	168	0000	0111	0

Subnetting : découpage d'une classe B



Supernetting : agrégation de plusieurs classes C contigües



Classless Inter-Domain Routing (CIDR)

- Une machine hôte est identifiée par **deux** adresses de 32 bits :
 Adresse IP + Masque
 - Ex : adresse IP 12.34.158.5 + masque 255.255.248.0 (ou 12.34.158.5/21)
- L'**adresse du réseau** auquel la machine appartient est obtenue en faisant un ET logique entre l'adresse IP de la machine et le masque
 - Ex : 12.34.152.0/21

	12	34	158	5	
Adresse	00001100	00100010	10011	110 00000101	
	255	255	248	0	
Masque	11111111	11111111	11111	000 00000000	
	12	34	152	0	
Adresse réseau	00001100	00100010	10011	000 00000000	

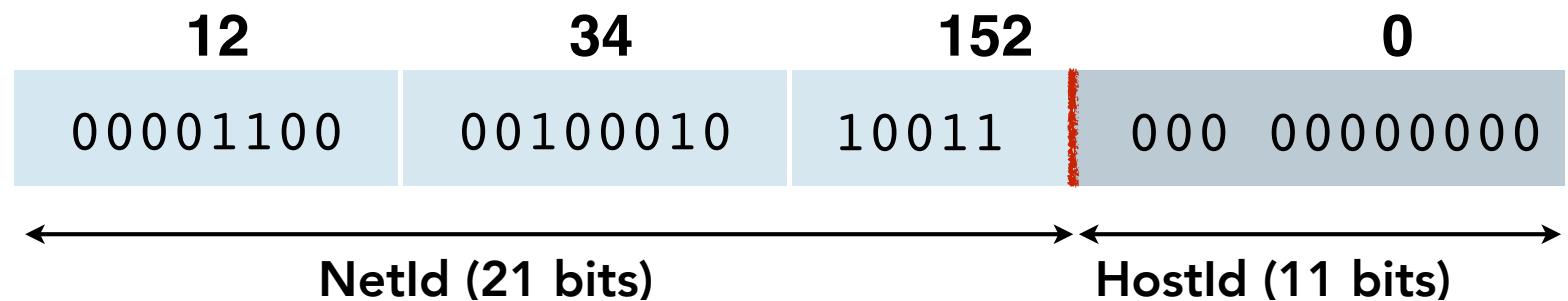
Classless Inter-Domain Routing (CIDR)

- L'adresse de diffusion (broadcast) sur le réseau est obtenue à partir de l'adresse réseau en remplaçant les « 0 » du suffixe (HostId) par des « 1 »
 - Ex : 12.34.159.255/21

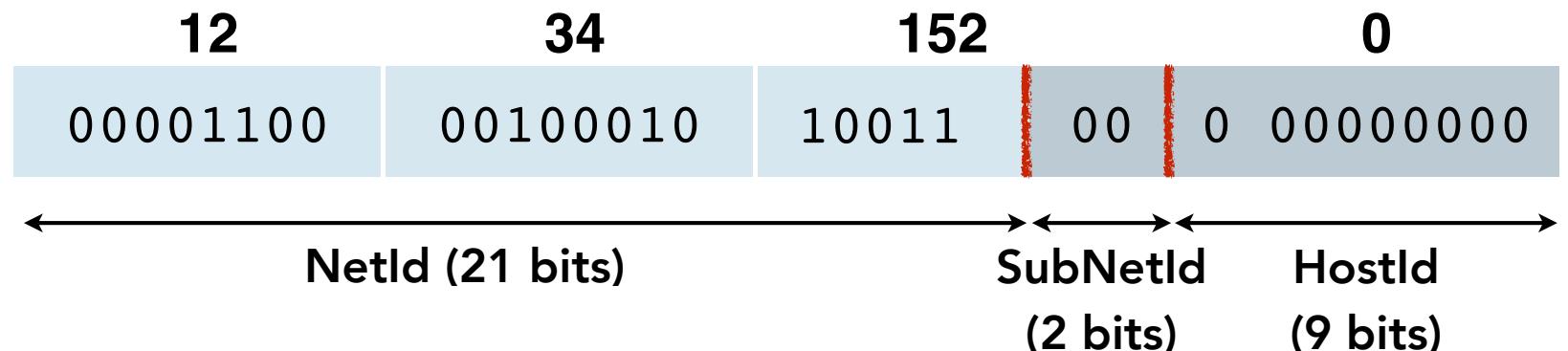
	12	34	158	5
Adresse	00001100	00100010	10011	110 00000101
	255	255	248	0
Masque	11111111	11111111	11111	000 00000000
	12	34	152	0
Adresse réseau	00001100	00100010	10011	000 00000000
	12	34	159	255
Adresse broadcast	00001100	00100010	10011	111 11111111

Subnetting

- Le principe du *subnetting* est réutilisé dans CIDR pour décomposer un réseau en un ensemble de sous-réseaux
 - Ex : Réseau 12.34.152.0/21



- On décompose le suffixe en deux, une partie identifiant le sous-réseau (SubNetId) et une partie identifiant l'hôte (HostId)



Subnetting

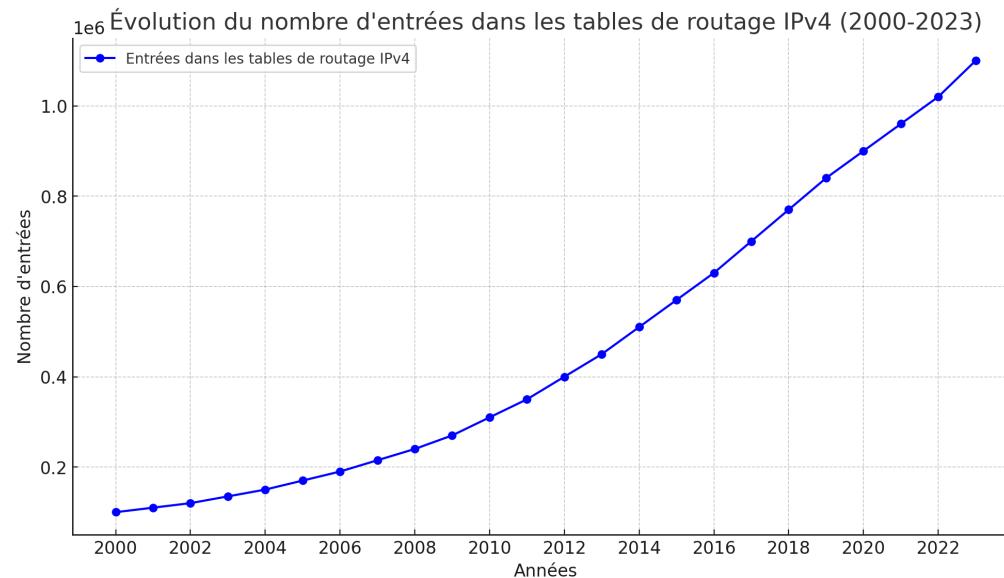
- **Masque de sous-réseau (subnet mask)** : les bits positionnés à « 1 » sont ceux associés aux préfixes NetId et SubNetId
 - Ex : 255.255.254.0 (/23)



12.34.152.0/23	00001100	00100010	10011	00	0	00000000
12.34.154.0/23	00001100	00100010	10011	01	0	00000000
12.34.156.0/23	00001100	00100010	10011	10	0	00000000
12.34.158.0/23	00001100	00100010	10011	11	0	00000000

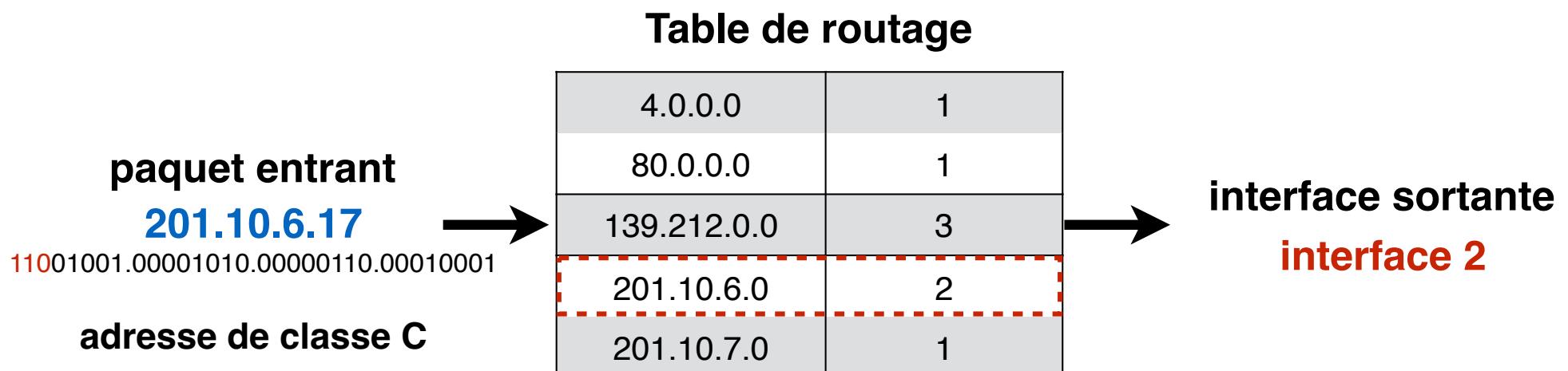
Scalabilité de l'Internet

- Les préfixes sont déterminants pour la scalabilité de l'Internet
 - Chaque routeur possède une table de routage avec les préfixes réseau connus et les chemins associés
 - Plus Internet grandit, plus les tables grossissent
- La flexibilité offerte par CIDR permet d'agréger les préfixes
 - Réduction de la taille des tables de routage
- Mais la pénurie d'adresses IPv4 augmente la fragmentation des blocs attribués
 - Augmentation de la taille des tables de routage
- De nos jours les tables de routage peuvent contenir ~200 000 préfixes (IPv4)



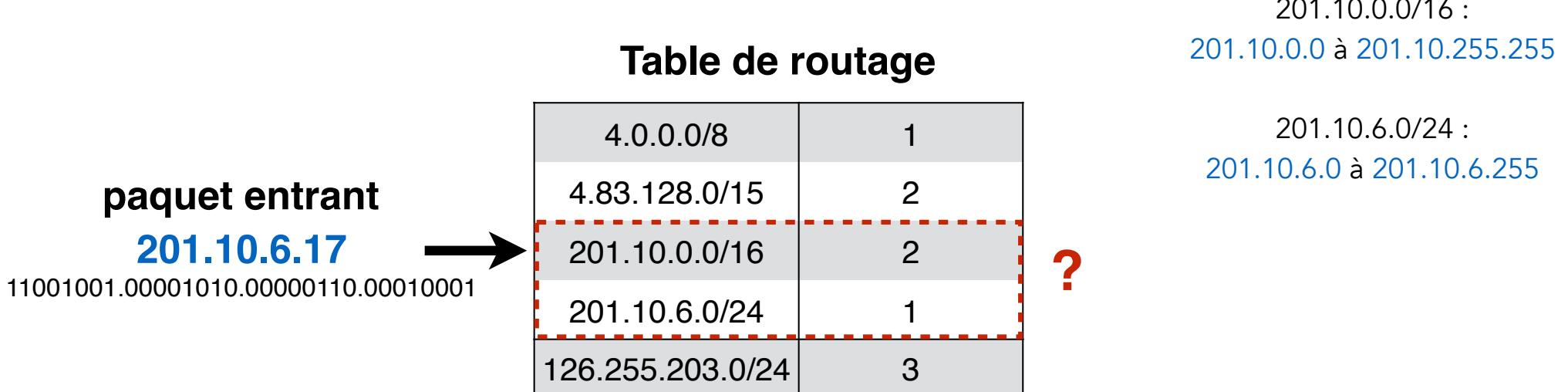
Acheminement des paquets sans CIDR

- Quand les adresses étaient organisées selon les 3 classes A, B, C
 - Les entrées des tables de routage concernaient des prefixes tels que définis par la classe de l'adresse destination
 - Les classes A, B, C étant disjointes, au plus une entrée concordait avec l'adresse destination d'un paquet



Acheminement des paquets avec CIDR

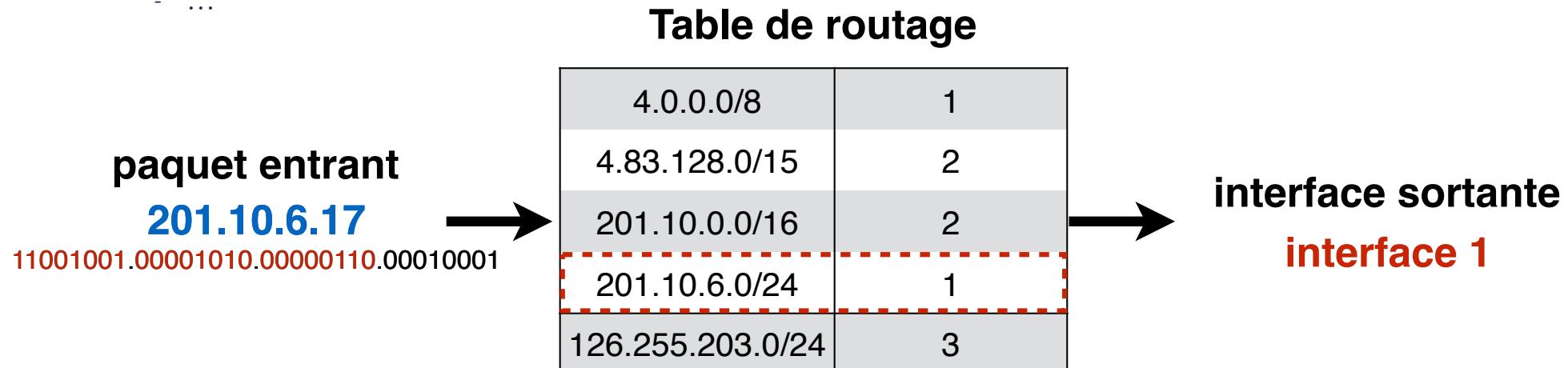
- Le CIDR permet une attribution efficace des adresses IP...
- ... mais rend l'acheminement des paquets plus compliqué
- Une table de routage peut contenir plusieurs chemins pour une même destination
 - L'adresse 201.10.6.17 appartient aux blocs 201.10.0.0/16 et 201.10.6.0/24
 - Quelle route utiliser ?



Acheminement des paquets avec CIDR

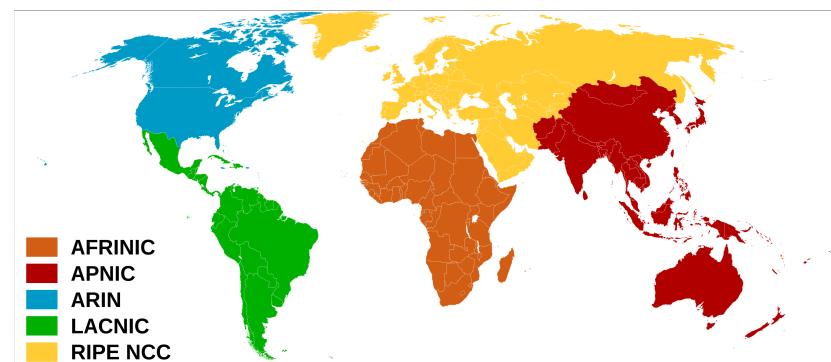
Longest Prefix Match (LPM) ou Best Matching

- Les routeurs choisissent l'entrée dont l'adresse destination partage **le plus grand nombre de bits** avec l'adresse de destination du paquet
- Pire cas : parcours complet de la table de routage pour identifier cette entrée
- Autres solutions
 - Classer les entrées de la table par taille de préfixe décroissante
 - Utiliser des caches
 - Structurer les tables sous forme arborescente (*Patricia Trie* ou *Radix Trie*)
 - ...



Attribution des adresses IP par blocs

- Attribution hiérarchique
 - préfixe (NetId) : attribué au réseau d'une institution
 - suffixe (HostId) : attribués aux machines par l'institution (leurs admins)
- *Internet Corporation for Assigned Names and Numbers (ICANN)*
 - organisation à but non lucratif créée en 1998 dont le rôle est
 - de coordonner à l'échelle mondiale l'attribution d'identifiants uniques sur Internet
 - d'assurer que le réseau mondial fonctionne de manière stable et sécurisée
 - attribue de larges blocs d'adresses IP aux RIRs
- *Regional Internet Registries (RIR)*
 - RIPE NCC, ARIN, APNIC, LACNIC, APNIC
 - attribuent des blocs d'adresses IP aux FAI et aux grandes institutions
- *Fournisseurs d'Accès Internet (FAI ou ISP)*
 - attribuent des blocs d'adresses à leurs clients
 - qui peuvent à leur tour attribuer des sous-blocs à leurs propres clients



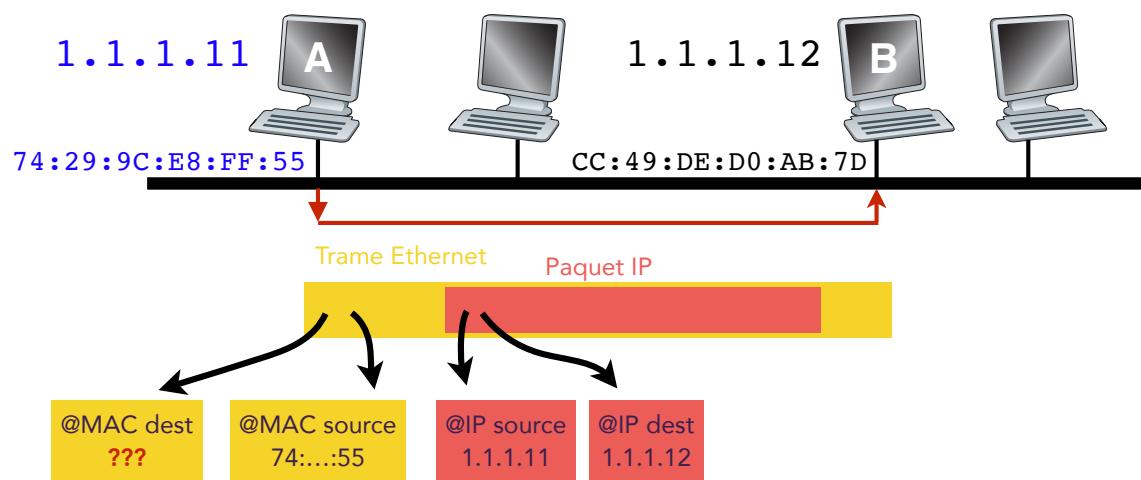
Les adresses IPv4 suffisent-elles ?

- En théorie, les adresses IPv4 sont nombreuses
 - $2^{32} = 4\ 294\ 967\ 296$ (~4,3 milliards)
- Mais les adresses IP ne sont pas toutes disponibles
 - Certaines sont réservées pour des usages spécifiques (adresses multicast)
 - Les adresses sont attribuées par blocs : gaspillage inévitable (même avec CIDR)
- De plus de plus d'équipements nécessitent une adresse IP
 - ordinateurs, routeurs, smartphones, tablettes, lave-linges, réfrigérateurs, ...
- Solution à long terme
 - Augmenter le nombre d'adresses en passant aux **adresses IPv6** :
 $2^{128} = 3.10^{38}$ adresses disponibles
 - Coûteux
- Solution à court terme
 - Réutilisation d'adresses (**DHCP**)
 - Utilisation d'adresses privées (**NAT**)

Protocole ARP

Address Resolution Protocol (ARP)

- Une machine hôte voulant envoyer un paquet IP à une autre machine située sur le même réseau qu'elle (ayant le même préfixe)
 - doit envoyer le paquet (IP) encapsulé dans une trame (Ethernet)...
 - ... doit donc connaître l'adresse MAC de la machine de destination



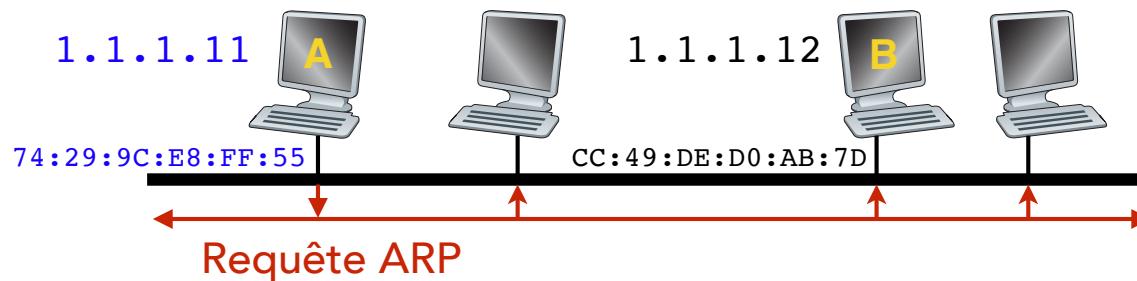
- Utilise pour cela le **protocole ARP**, protocole de « couche 2,5 »

Address Resolution Protocol (ARP)

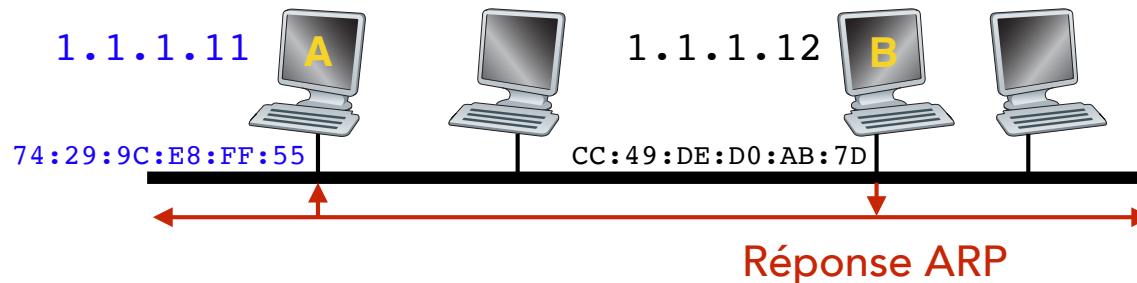
- Les machines hôtes maintiennent une **table ARP**
 - une correspondance (adresse IP, adresse MAC) par entrée
 - expire à l'issue d'un temporisateur
 - entrées configurées manuellement ou découvertes par envoi de requêtes ARP
- Une machine hôte voulant envoyer un paquet IP à une autre machine située sur le même réseau qu'elle
 - consulte sa table ARP
 - si une entrée est trouvée pour l'adresse IP destination du paquet
 - elle utilise cette adresse MAC
 - sinon
 - elle envoie une requête ARP et attend la réponse
 - elle ajoute une entrée à sa table ARP
 - et finalement envoie la trame encapsulant le paquet IP à la machine de destination

Principe du protocole ARP

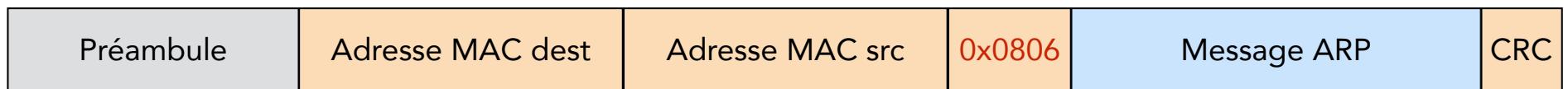
- A veut connaître l'adresse MAC de B connaissant son adresse IP
- Le cache ARP de A ne contient pas d'entrée pour B
- A diffuse (en broadcast) une **requête ARP** sur le réseau
 - « Quelle est l'adresse MAC de la machine possédant l'adresse IP 1.1.1.12 ? »



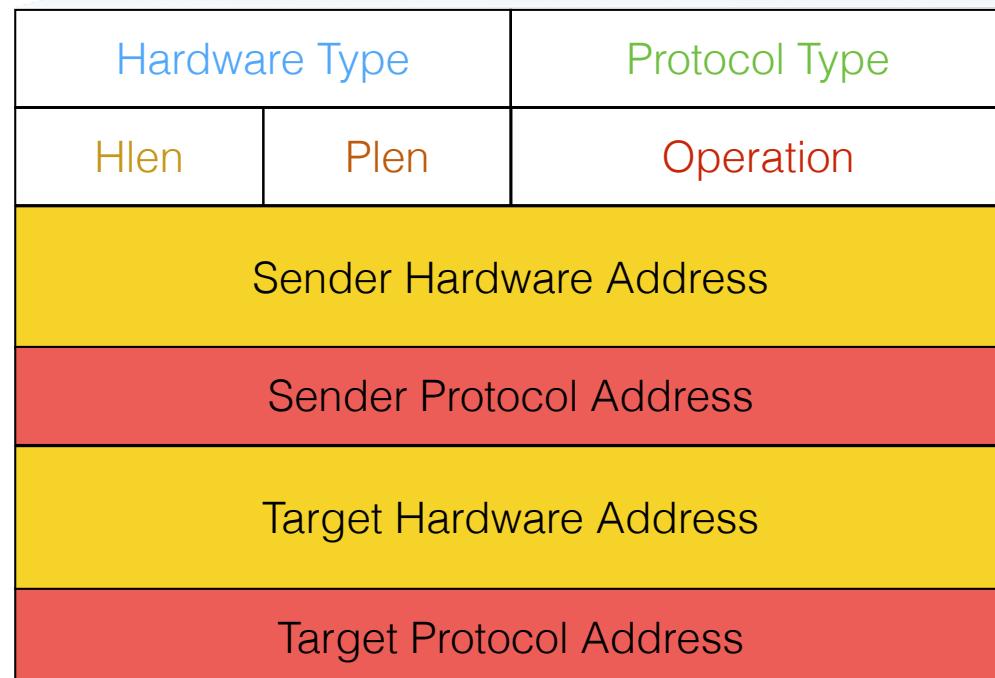
- B reconnaît son adresse IP et envoie à A (en unicast) une **réponse ARP**
 - « L'adresse MAC de la machine possédant l'adresse IP 1.1.1.12 est : CC:49:DE:D0:AB:7D »



Format des messages ARP



- Hardware Type
 - Ethernet = 0x0001
- Protocol Type
 - IPv4 = 0x0800
- Hlen (longueur adresse physique)
 - Ethernet = 6
- Plen (longueur adresse logique)
 - IPv4 = 4
- Operation
 - Requête ARP = 1
 - Réponse ARP = 2



Conclusion

- Adresses IP
 - sur 32 bits pour IPv4 (128 bits pour IPv6)
 - hiérarchiques
 - pour une utilisation efficace
 - pour un acheminement efficace
 - variables dans le temps
 - allocation statique et configuration manuelle : fréquentes et fastidieuses
 - allocation et configuration dynamique : protocole DHCP
 - partagées dans le temps
 - allocation temporaire d'une adresse, à la demande des machines hôtes
 - réutilisation d'une adresse pour identifier différentes machines hôtes
- Acheminement de paquet
 - basé sur le préfixe des adresses
 - le plus long partagé entre adresses destination des chemins et celle des paquets
- Protocole ARP
 - permet de découvrir l'adresse MAC d'une machine voisine à partir de son adresse IP

A faire

- Cours 5
 - à relire attentivement
- Devoir 5 sur Moodle
 - date de rendu : dimanche 12 octobre
- TP 4
 - lire le document « Préparation des TP Kathará »