

Les réseaux

Collège de France, 14 mars 2008

Cours : **Gérard Berry**

Chaire d'innovation technologique Liliane Bettencourt
Gerard.Berry@college-de-france.fr

Séminaires : **François Bourdoncle (Exalead)**
Laurent Massoulié (Thomson)

Francois.Bourdoncle@exalead.com

Laurent.Massoulie@thomson.fr

Un réseau vu de l'utilisateur

- Composants

1. des services (p. ex. de transport)
2. un moyen d'accès
3. une facture

- Réseaux matériels

réseau électrique : énergie, compteur, abonnement + conso
réseau routier : transport, voiture, impôts et péages
réseau ferré, réseau d'eau, etc

- Réseaux d'information

téléphone à fil : liaison son, poste, abonnement + consommation
GSM (tél portable) : idem mais délocalisé + SMS
GPS : localisation, récepteur, gratuit

Internet : un changement d'échelle

- Services innombrables
courrier, chat, blogs, téléphone, TV, musique, vidéo, jeux, recherche, podcast, météo, journaux, encyclopédie, expos photo, commerce, archivage, logiciels, etc.
- Accès multiforme
ordinateur, Internet café, PDA, console de jeux, téléphone, TV
- Coût : 29,90 par mois ! Non, 19,90 ! 9,90 ! 0.99 ! 0?
- En voie de généralisation aux objets
cf. colloque du 23 mai

Là où la numérisation rapporte vraiment !

Les temps héroïques : 1970-1995

- Des réseaux d'ordinateurs
connexion à distance, transfert de fichiers, courrier
quelquefois amusant : courrier par paquet de cartes virtuel
- Des réseaux de télécommunication numériques
transport de voix et de données bas débit (Minitel)
obligation d'inter-opérabilité, tradition de normalisation
- Des réseaux câblés pour la télévision
transport de vidéo
greffe de transport de données

Cataclysmes de fin de siècle : haut débit, multimédia et convergence

- Internet devient gigantesque
milliards de connexions, moles ($6.023 \cdot 10^{23}$) de bits
- Le haut débit se généralise
des autoroutes optiques partout
l'ADSL ressuscite le cuivre: du vieux 50 Kbits/s à 8+ Mbits/s !
- Image, parole, texte et musique s'emmêlent
c'est rigolo, avant, on les distinguait !
du coup, trois réseaux, c'est idiot !
- Les nouveaux services arrivent de partout
et bientôt les objets...

Apprendre à nager dans les sigles

AAL, ACK, ADSL, AEP, AGCH, AMPS, AMRF, AMRT, APPN, ARP, ASCII, ASK, ATDM, ATM, ATMR, BCD, BCCH, BHD, BTS, CAI, CAL, CAMEL, CAMR, CAN, CAP, CAT, CATV, CBS, CCCH, CETP, CCITT, CDMA, CLNP, CLP, CM, CN, CORBA, CSMA, CT1, CT2, D-AMPS, DAVIC, DCE, DCI, DCM, DCN, DCOM, DCS, DECT, DES, DFWMAC, DNA, DQDB, DSL, DSS, DVB, EBCDIC, ETACS, EVRC, ETSI, FACCH, FCCH, FDDI, FDMA, FDSE, FITL, FPLMTS, FSK, FTP, GAP, GEOS, GigaPoP, GPRS, GSM, HiPPI, HDLC, HLR, HSCSD, HTTP, ICMP, IPDU, INQ, IDU, IEEE, IMSI, INAP, IP, IPSEC, IPv6, IRQ, ISO, JVM, LAN, LAP, MAA, MAC, MAN, MM, MMS, MSC, NFS, NGI, NIC, NIT, NMT, NRZ, ODBC, PABX, PAN, PACS-UA, PCM, PCS, PDU, PHS, PHY, PMD, POTS, PSK, PWT, QoS, RACH, RAN, RCP, RNIS, RPC, RR, RRR, RSA, RS-232, RZ, SAP, SAR, SACCH, SCH, SDCCH, SDH, SDU, SIM, SMS, SMTP, SONET, TACS, TCH/FS, TDMA, TCP, TDD, UDP, UHF, UIT, UMTS, UPT, UUCP, VCI, VoD, VPI, VME, VLR, V24, X25, WAN, WiFi, WiMax, WWW, XML, XTP

Apprendre à nager dans les sigles

AAL, ACK, ADSL, AEP, AGCH, AMPS, AMRF, AMRT, APPN, ARP, ASCII, ASK, ATDM, ATM, ATMR, BCD, BCCH, BHD, BTS, CAI, CAL, CAMEL, CAMR, CAN, CAP, CAT, CATV, CBS, CCCH, CETP, CCITT, CDMA, CLNP, CLP, CM, CN, CORBA, CSMA, CT1, CT2, D-AMPS, DAVIC, DCE, DCI, DCM, DCN, DCOM, DCS, DECT, DES, DFWMAC, DNA, DQDB, DSL, DSS, DVB, EBCDIC, ETACS, EVRC, ETSI, FACCH, FCCH, FDDI, FDMA, FDSE, FITL, FPLMTS, FSK, FTP, GAP, GEOS, GigaPoP, GPRS, GSM, HiPPI, HDLC, HLR, HSCSD, HTTP, ICMP, IPDU, INQ, IDU, IEEE, IMSI, INAP, IP, IPSEC, IPv6, IRQ, ISO, JVM, LAN, LAP, MAA, MAC, MAN, MM, MMS, MSC, NFS, NGI, NIC, NIT, NMT, NRZ, ODBC, PABX, PAN, PACS-UA, PCM, PCS, PDU, PHS, PHY, PMD, POTS, PSK, PWT, QoS, RACH, RAN, RCP, RNIS, RPC, RR, RRR, RSA, RS-232, RZ, SAP, SAR, SACCH, SCH, SDCCH, SDH, SDU, SIM, SMS, SMTP, SONET, TACS, TCH/FS, TDMA, TCP, TDD, UDP, UHF, UIT, UMTS, UPT, UUCP, VCI, VoD, VPI, VME, VLR, V24, X25, WAN, WiFi, WiMax, WWW, XML, XTP

Apprendre à nager dans les sigles

AAL, ACK, ADSL, AEP, AGCH, AMPS, AMRF, AMRT, APPN, ARP, ASCII, ASK, ATDM, ATM, ATMR, BCD, BCCH, BHD, BTS, CAI, CAL, CAMEL, CAMR, CAN, CAP, CAT, **CATV**, CBS, CCCH, CETP, CCITT, CDMA, CLNP, CLP, CM, CN, CORBA, CSMA, CT1, CT2, D-AMPS, DAVIC, DCE, DCI, DCM, DCN, DCOM, DCS, DECT, DES, DFWMAC, DNA, DQDB, DSL, DSS, DVB, EBCDIC, ETACS, EVRC, ETSI, FACCH, FCCH, FDDI, FDMA, FDSE, **FITL**, FPLMTS, FSK, FTP, GAP, GEOS, GigaPoP, GPRS, GSM, HiPPI, HDLC, HLR, HSCSD, HTTP, ICMP, IPDU, INQ, IDU, IEEE, IMSI, INAP, IP, IPSEC, IPv6, IRQ, ISO, JVM, LAN, LAP, MAA, MAC, MAN, MM, MMS, MSC, NFS, NGI, NIC, NIT, NMT, NRZ, ODBC, PABX, PAN, PACS-UA, PCM, PCS, PDU, PHS, PHY, PMD, **POTS**, PSK, PWT, QoS, RACH, RAN, RCP, RNIS, RPC, RR, RRR, RSA, RS-232, RZ, SAP, SAR, SACCH, SCH, SDCCH, SDH, SDU, SIM, SMS, SMTP, SONET, TACS, TCH/FS, TDMA, TCP, TDD, UDP, UHF, UIT, UMTS, UPT, UUCP, VCI, VoD, VPI, VME, VLR, V24, X25, WAN, WWW, XML, XTP

Apprendre à nager dans les sigles

AAL, ACK, ADSL, AEP, AGCH, AMPS, AMRF, AMRT, APPN, ARP, ASCII, ASK, ATDM, ATM, ATMR, BCD, BCCH, BHD, BTS, CAI, CAL, CAMEL, CAMR, CAN, CAP, CAT, CATV, CBS, CCCH, CETP, CCITT, CDMA, CLNP, CLP, CM, CN, CORBA, CSMA, CT1, CT2, D-AMPS, DAVIC, DCE, DCI, DCM, DCN, DCOM, DCS, DECT, DES, DFWMAC, DNA, DQDB, DSL, DSS, DVB, EBCDIC, ETACS, EVRC, ETSI, FACCH, FCCH, FDDI, FDMA, FDSE, FITL, FPLMTS, FSK, FTP, GAP, GEOS, **GigaPoP**, GPRS, GSM, **HiPPI**, HDLC, HLR, HSCSD, HTTP, ICMP, IPDU, INQ, IDU, IEEE, IMSI, INAP, IP, IPSEC, IPv6, IRQ, ISO, JVM, LAN, LAP, MAA, MAC, MAN, MM, MMS, MSC, NFS, NGI, NIC, NIT, NMT, NRZ, ODBC, PABX, PAN, PACS-UA, PCM, PCS, PDU, PHS, PHY, PMD, POTS, PSK, PWT, QoS, RACH, RAN, RCP, RNIS, RPC, RR, RRR, RSA, RS-232, RZ, SAP, SAR, SACCH, SCH, SDCCH, SDH, SDU, SIM, SMS, SMTP, SONET, TACS, TCH/FS, TDMA, TCP, TDD, UDP, UHF, UIT, UMTS, UPT, UUCP, VCI, VoD, VPI, VME, VLR, V24, X25, WAN, WWW, XML, XTP

Pourquoi tant de notions?

- Plusieurs rayons d'actions
personnel (PAN), local (LAN), total (WAN), embarqué, etc.
- Une multitude de supports
câble spécifique (USB), fil téléphonique, fibre optique, radio
techniques de transmissions très différentes
- Des contraintes en perpétuelle évolution
accélération imposée par la loi de Moore des circuits
et par les besoins des utilisateurs (plus que la loi de Moore?)
- La nécessité de la normalisation
obligation d'interopérabilité généralisée
avec des acteurs très nombreux

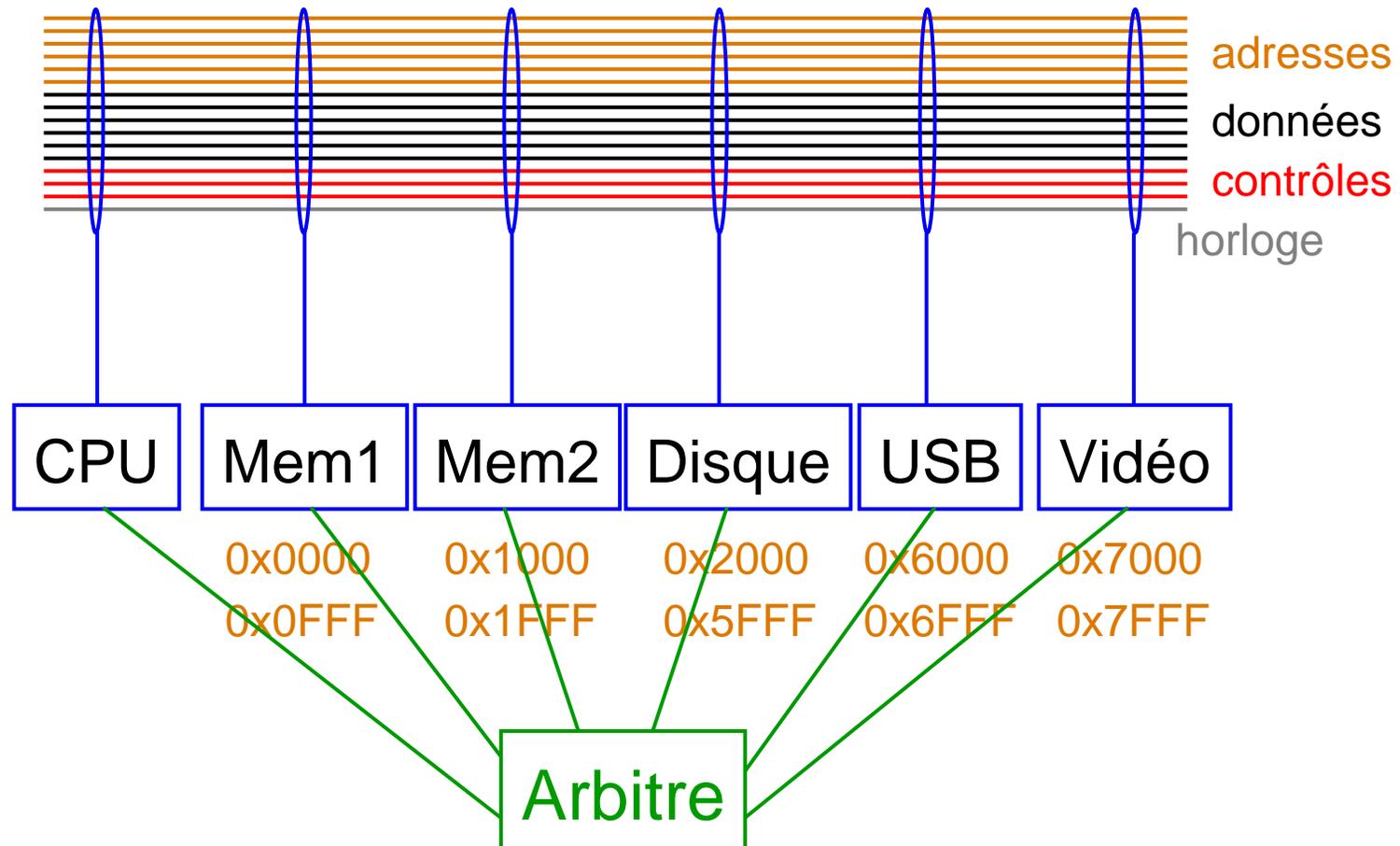
Mais tout se simplifie avec IP (Internet Protocol) !

Les invariants

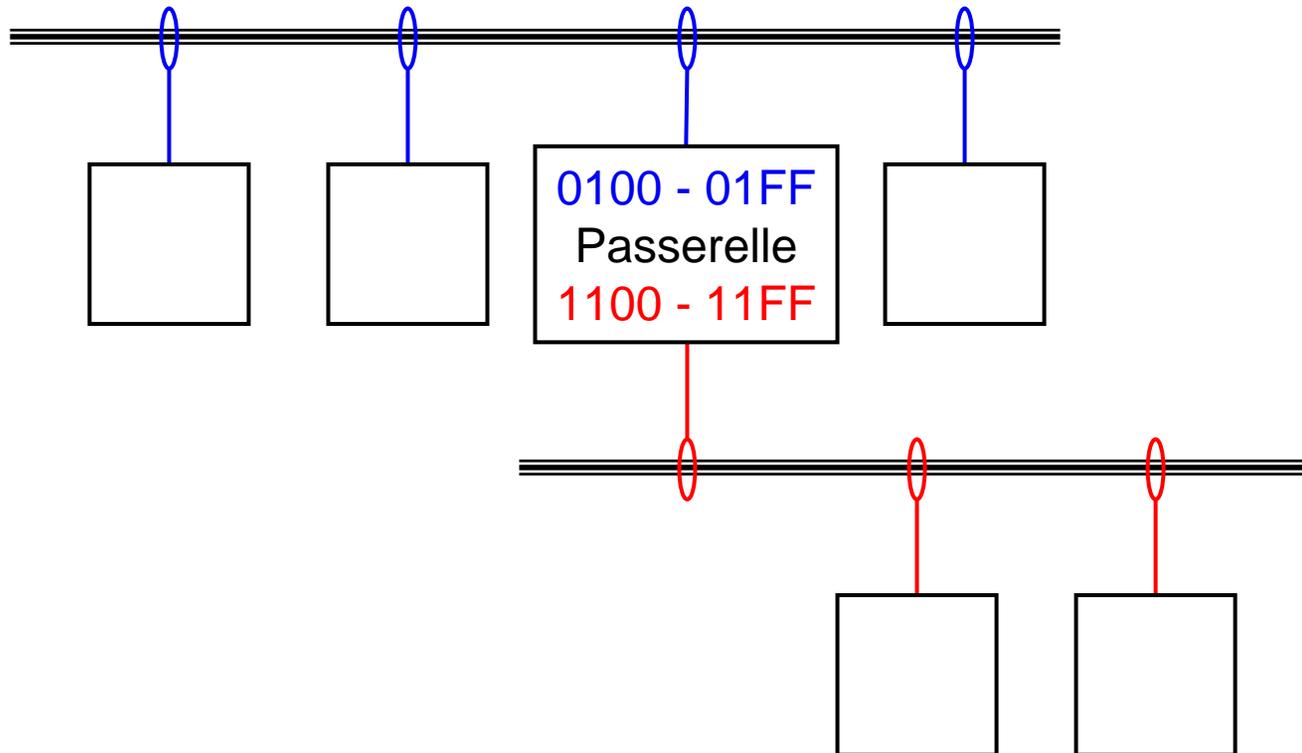
- Découpage en paquets
la clef du multiplexage
- Transmission point à point ou diffusion
avec ou sans contrôle / récupération d'erreurs
- Adressage et routage
dire où l'information doit aller, l'y acheminer
- Contrôle d'accès, de flux et de congestion
assurer le débit en évitant les embouteillages

Notion centrale : le protocole

Le bus machine (PCI, PCI Express, etc.)



Bus hiérarchiques

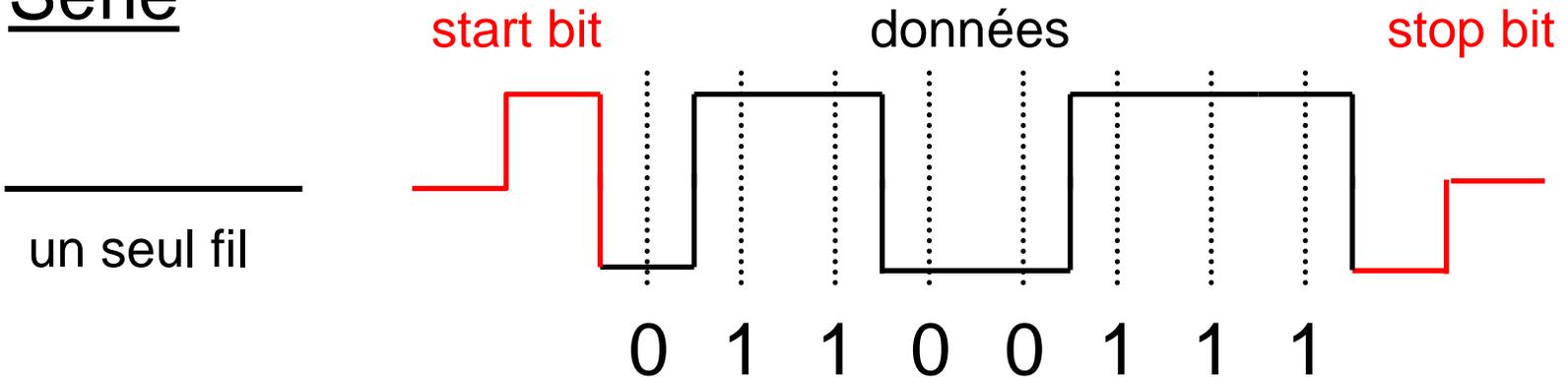


Ordinateur / périphérique : liaisons parallèle et série

Parallèle

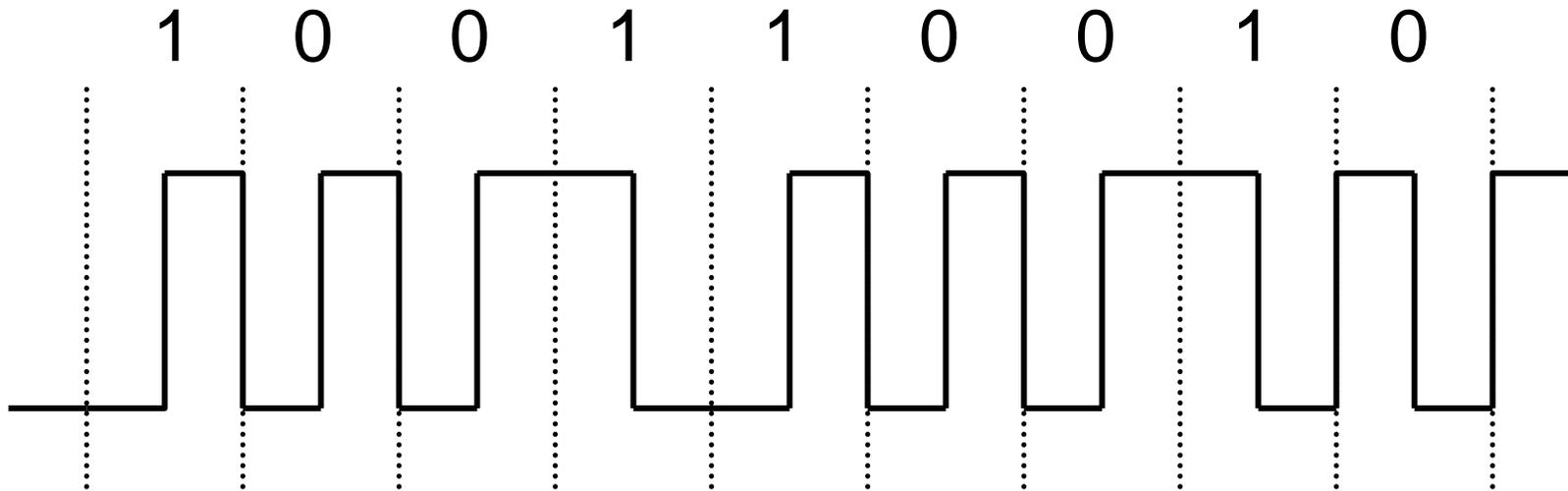


Série



Transmission série rapide

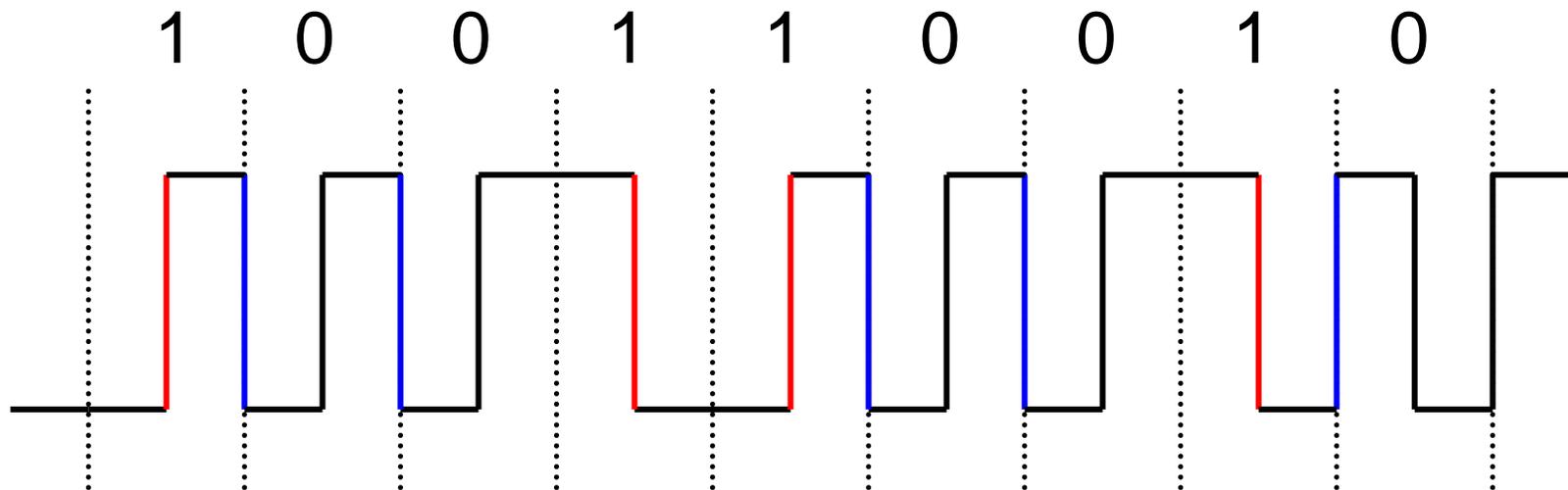
Code de Manchester différentiel



Genre de code utilisé dans Ethernet, USB, Firewire, etc.

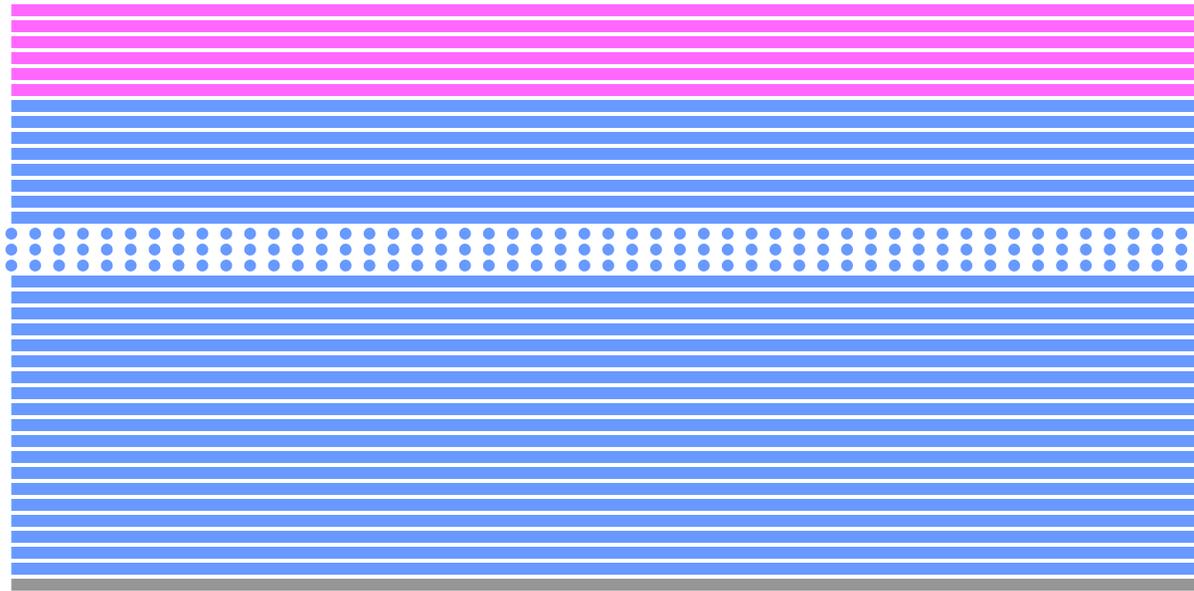
Transmission série rapide

Code de Manchester différentiel



- Les transitions sont plus sûres que les niveaux
 - Toujours une transition au milieu du cycle
 - Une transition au début du cycle pour 0
 - Pas de transition début du cycle pour 1

ADSL ressucite le bon vieux cuivre !



- Voix : porteuse 25 Hz - 3 KHz
- ADSL : 255 sous-porteuses de 4,2 KHz entre 64 KHz et 1,1 MHz
mesure du rapport signal / bruit sur chaque bande
modulation et correction d'erreurs adaptatives
plus de bandes descendantes que de bandes montantes (temporaire?)

Les couches ISO

7 – Application

6 – Présentation

5 – Session : organisation et synchronisation

4 – Transport : transfert des données

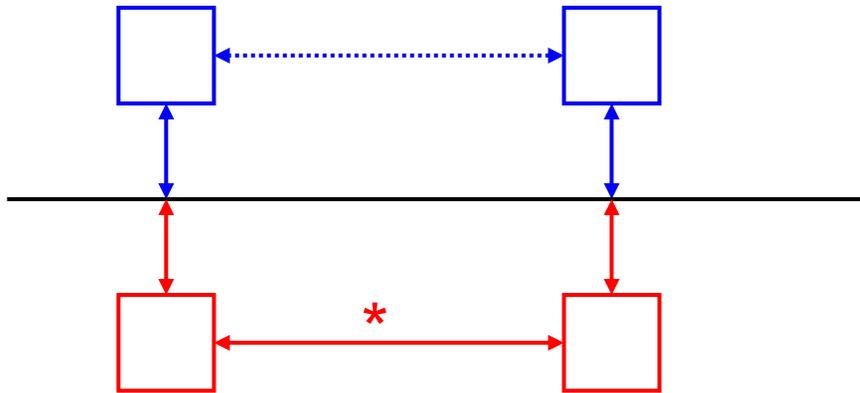
3 – Réseau : acheminement des paquets

2 – Liaison : correction d'erreurs, partage du médium

1 – Physique : accès au médium,

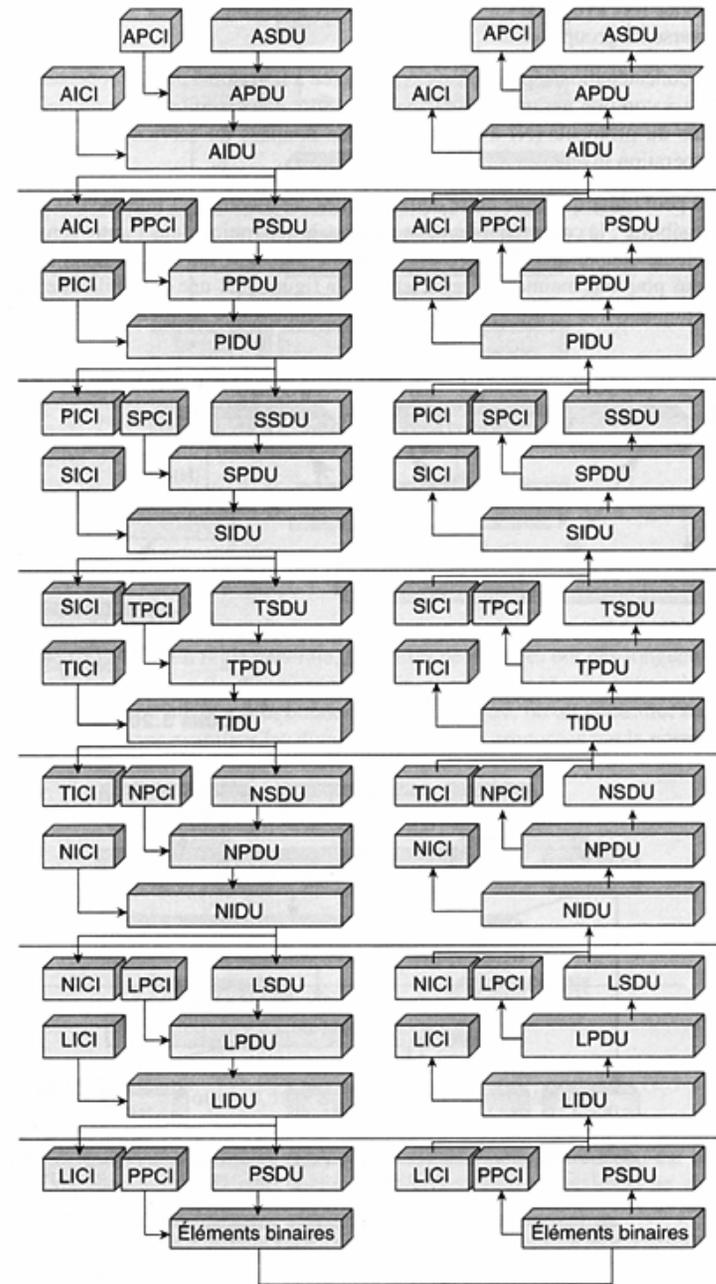
Couche N+1

1 opération



suite
d'opérations

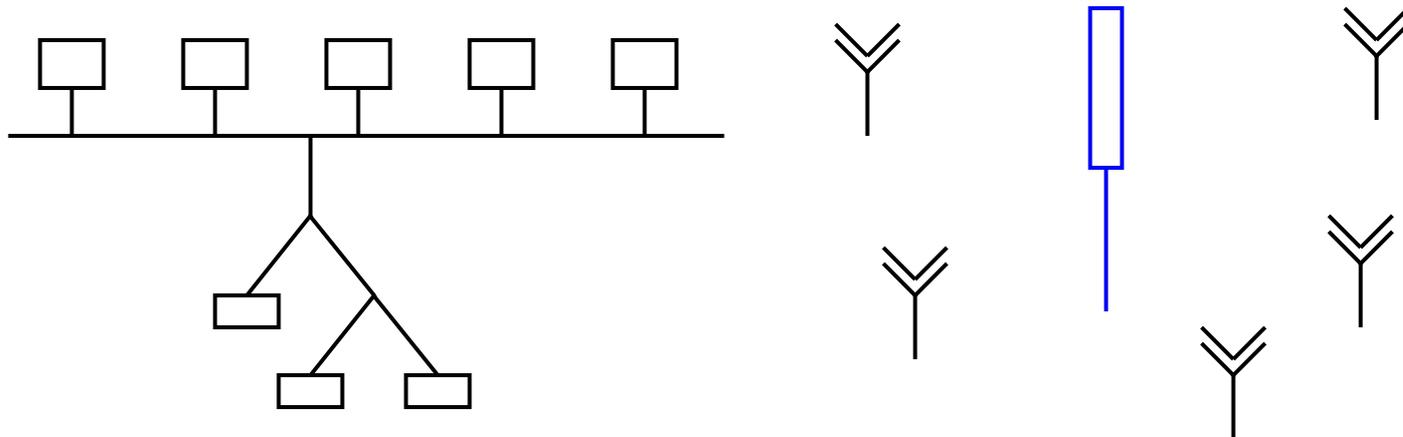
Couche N



Source : Guy Pujolle
Les réseaux

FIGURE 3.22 • Les unités de données de l'architecture OSI

Réseaux à collision: Ethernet, Wifi



1. on ne parle que si le médium est silencieux
2. on écoute pendant qu'on parle
3. si collision, on arrête et on envoie un bourrage
4. on attend un temps aléatoire dans $[0, n]$ et on reparle
4. si re-collision, on multiplie le délai max par 2

Après belle théorie : tirer à pile ou face
et reparler immédiatement si pile est mieux !

Détection et correction d'erreurs

- Bruit et les parasites : erreurs aléatoires !
- Comment utiliser une ligne bruitée ?

=> **Théorie de l'information, Shannon 1948**



bits d'origine

redondance

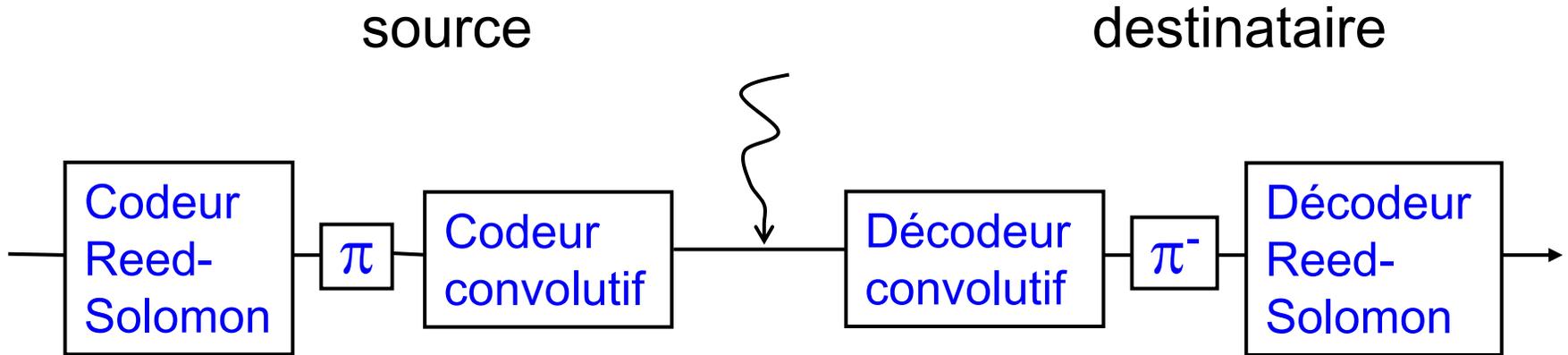
↓ transmission



↓ reconstitution



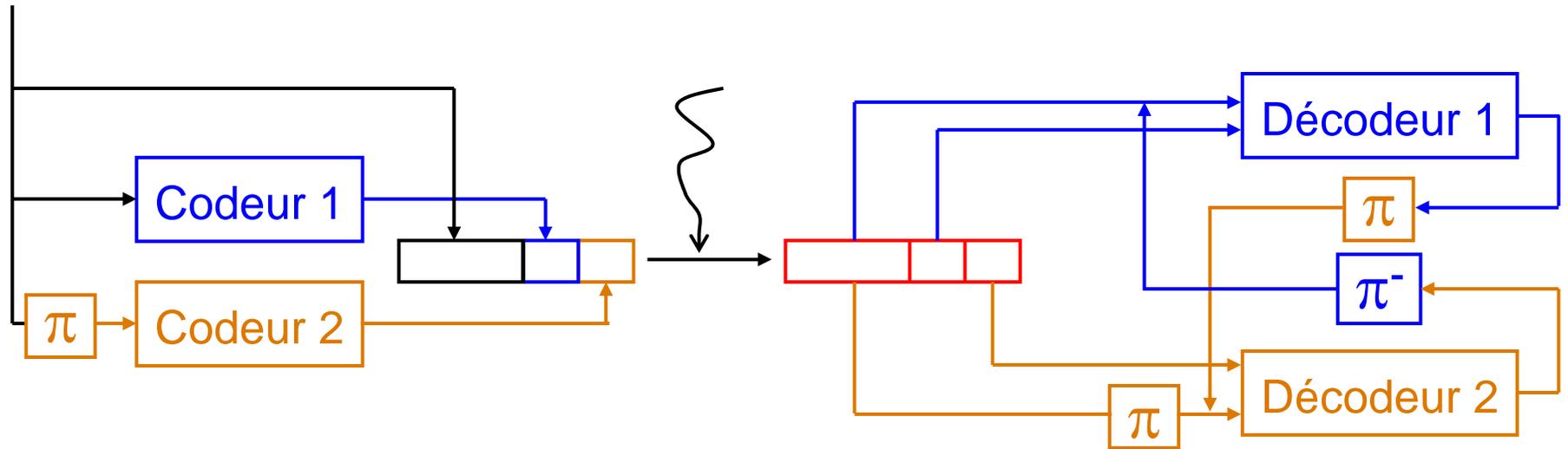
Etat de l'art 1993 : le codage de la TNT



π, π^{-1} : permutations inverses

Les deux codes coopèrent, mais dans un seul sens

Les turbocodes (C. Berrou & A. Glavieux)



Cf. mots croisés : les lignes aident les colonnes et vice-versa !

Deux codes, un décodage **itératif probabiliste**
Limites de Shannon atteintes en pratique
Satellites, UMTS, ADSL 2, ...

Ce qui est reçu



Source : Claude Berrou, Joseph Boutros, ENST

Après une itération de turbo-décodage



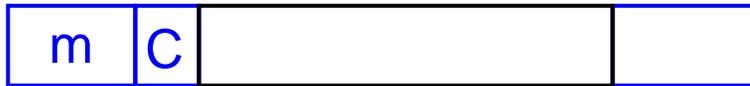
Source : Claude Berrou, Joseph Boutros, ENST

Après huit itérations de turbo-décodage



Source : Claude Berrou, Joseph Boutros, ENST

Fenêtre de transmission (avec ordre)



$C = 0$: paquet simple

$C = 1$: A.R.

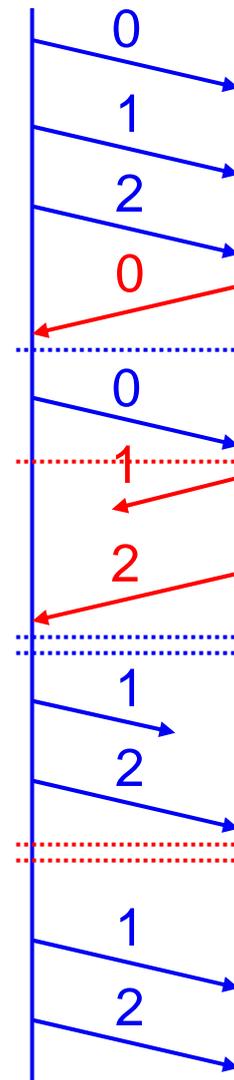
$C = 2$: paquet + ack

$m < N$: numéro de paquet

↙ taille de fenêtre

Pas d'envoi de m
avant A.R. de $(m-1) \bmod N$
 \Rightarrow Contrôle de flux

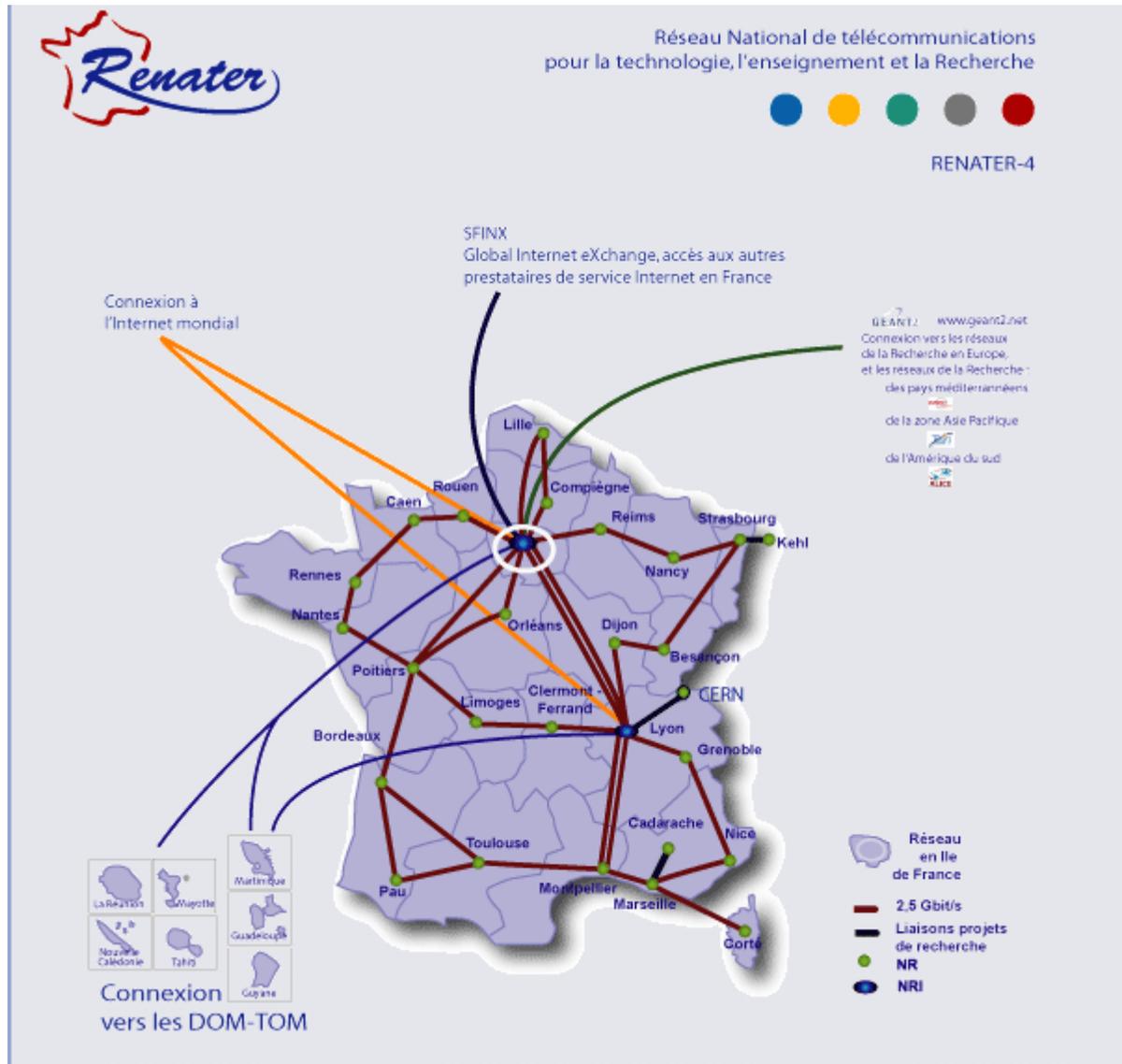
fenêtre (3)



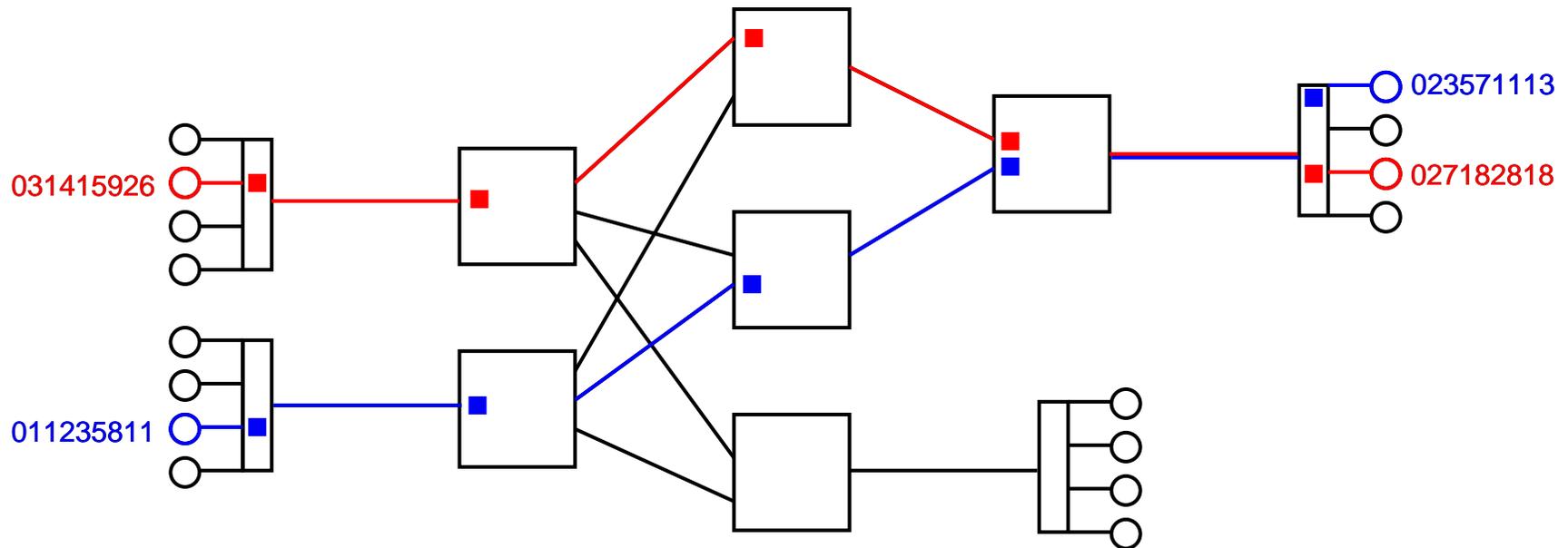
∄ ou 2 ?

∄ = respect de l'ordre !

Exemple de réseau : Renater

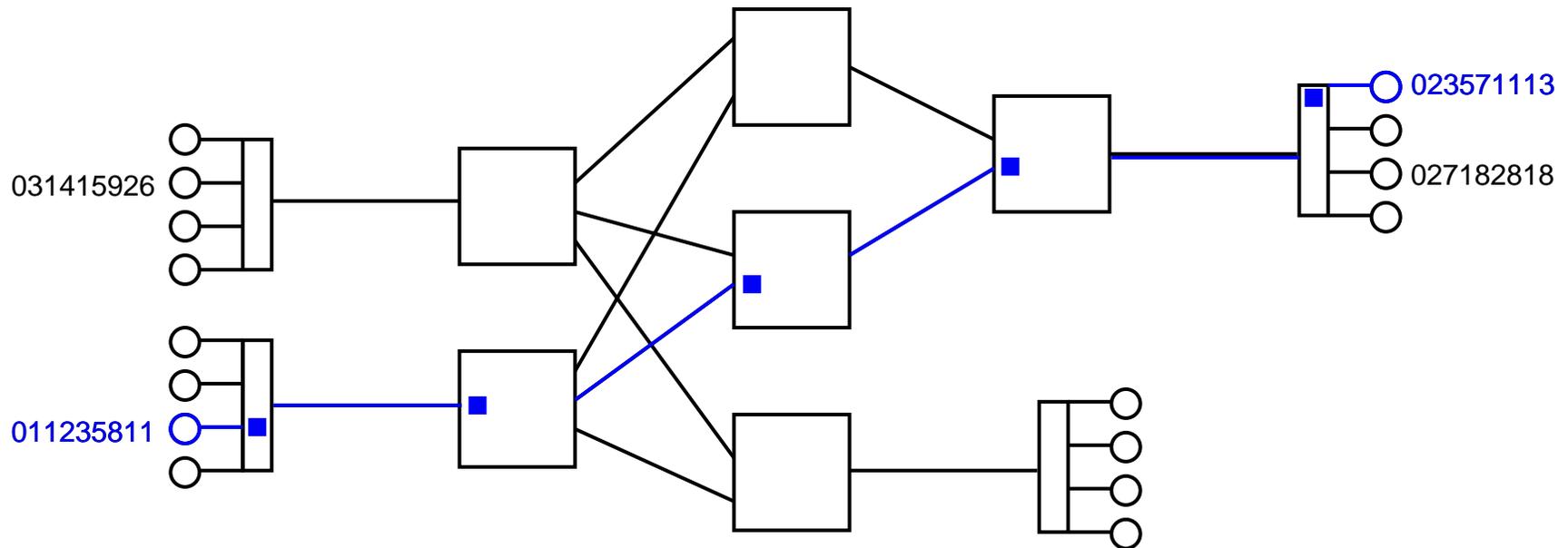


Réseaux commutés (téléphone, ATM)



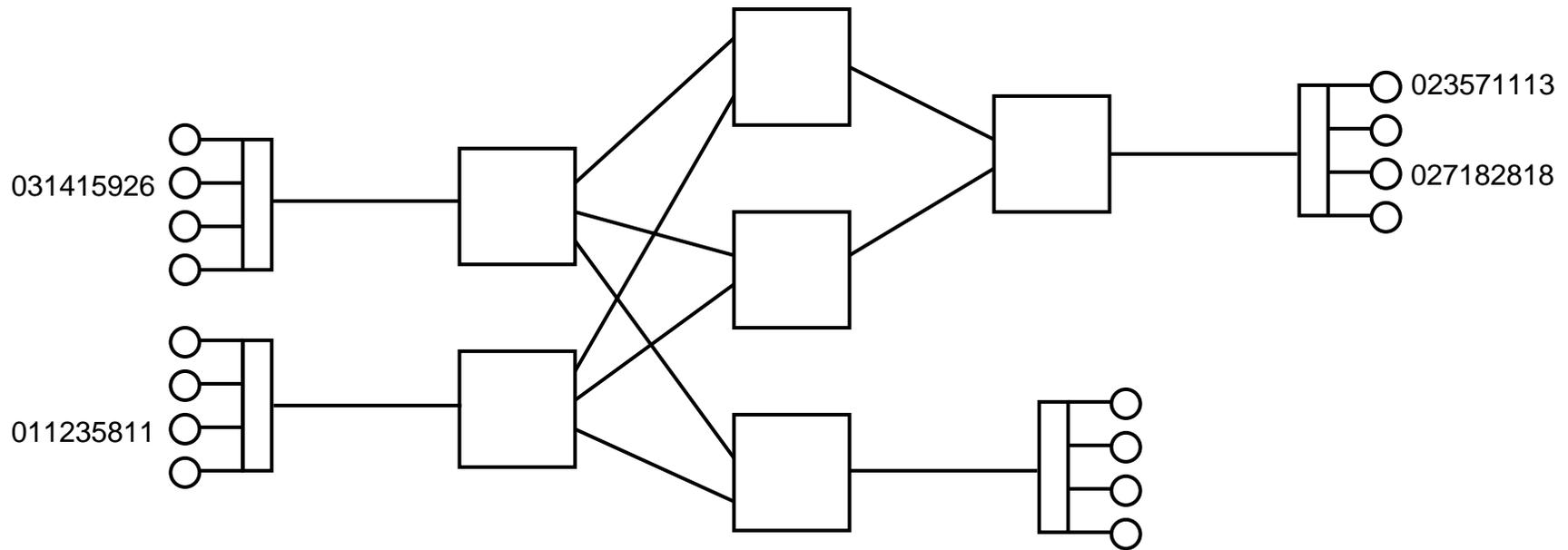
- Ouverture de communication
établissement de la route, allocation de ressources
- Communication
tous les paquets suivent le même chemin
- Fermeture :
désallocation des ressources

Réseaux commutés (téléphone, ATM)



- Ouverture de communication
établissement de la route, allocation de ressources
- Communication
tous les paquets suivent le même chemin
- Fermeture :
désallocation des ressources

Réseaux commutés (téléphone, ATM)



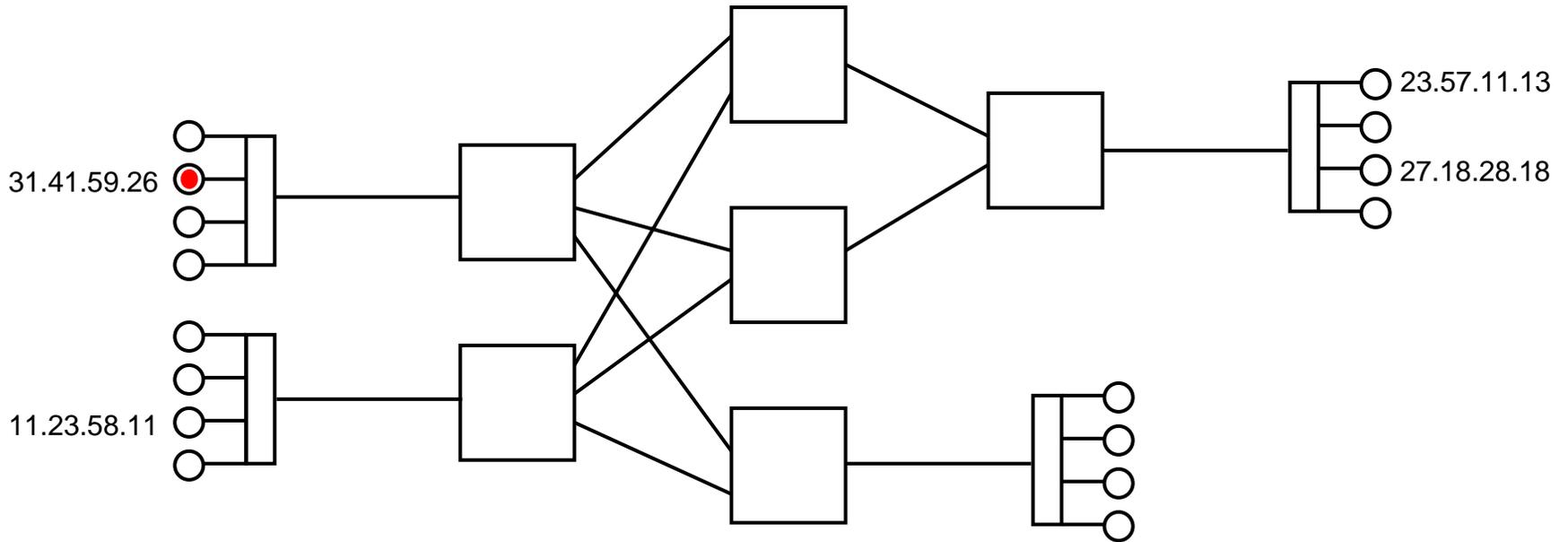
- Ouverture de communication
établissement de la route, allocation de ressources
- Communication
tous les paquets suivent le même chemin
- Fermeture :
désallocation des ressources

Réseaux commutés : caractéristiques

- Création de la communication
 - demande la connaissance de l'état du réseau (complexe)
 - acceptation : tout ou rien
 - re-routage nécessaire si panne sur le trajet
 - re-configuration lourde si changement du réseau
- Routage
 - très simple, qualité de service garantie (sauf pannes)
 - efficace en mode continu
 - mais ressources bloquées en mode sporadique...
- Toute l'intelligence est dans le réseau
 - terminaux stupides (BVTF = bon vieux téléphones à fil)

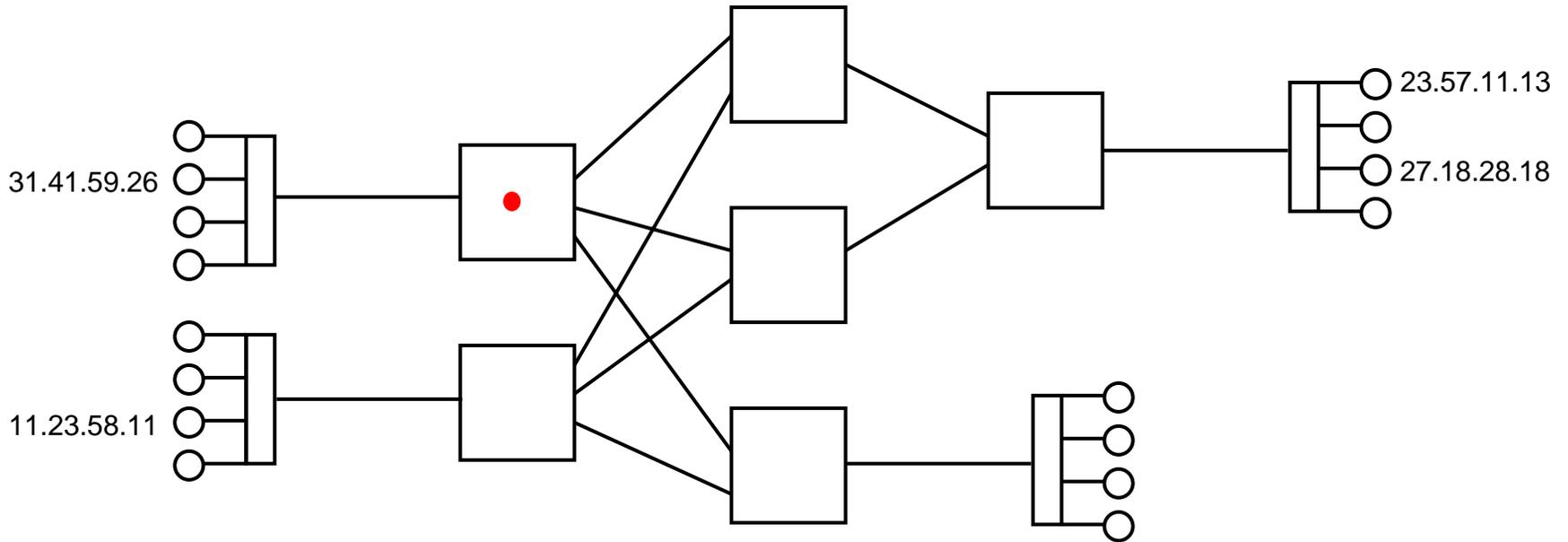
Bon pour la voix, pas pour les données sporadiques

Internet : routage pur (IP)



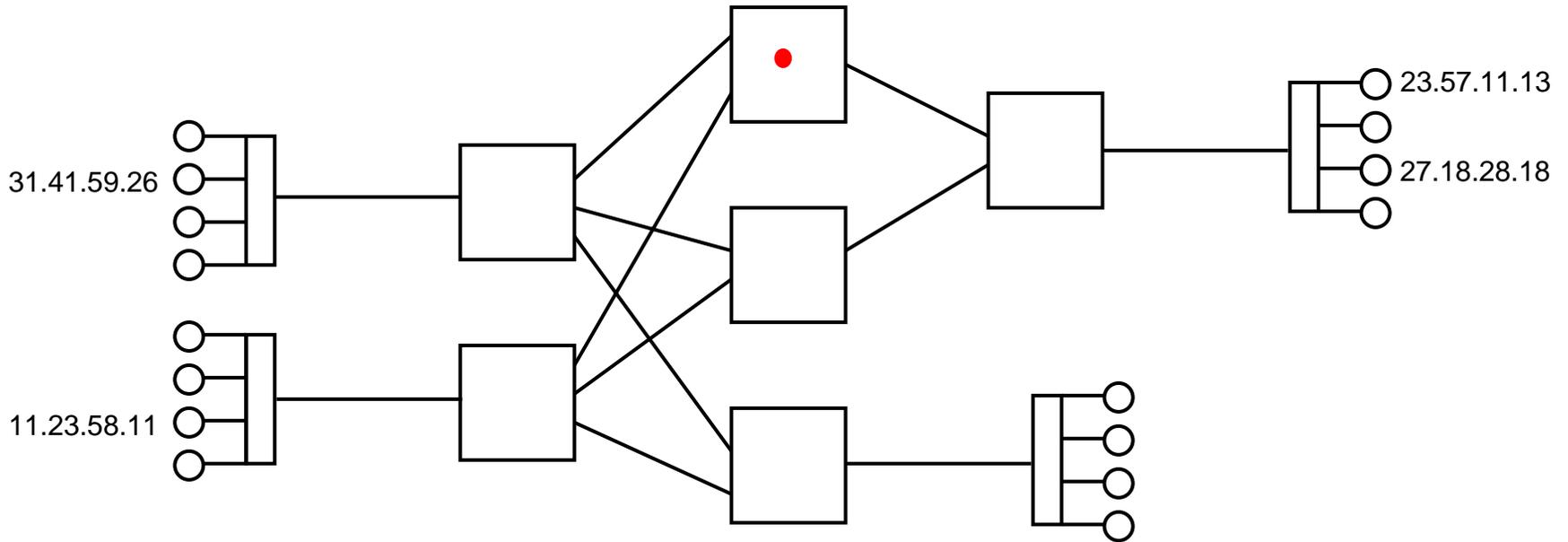
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



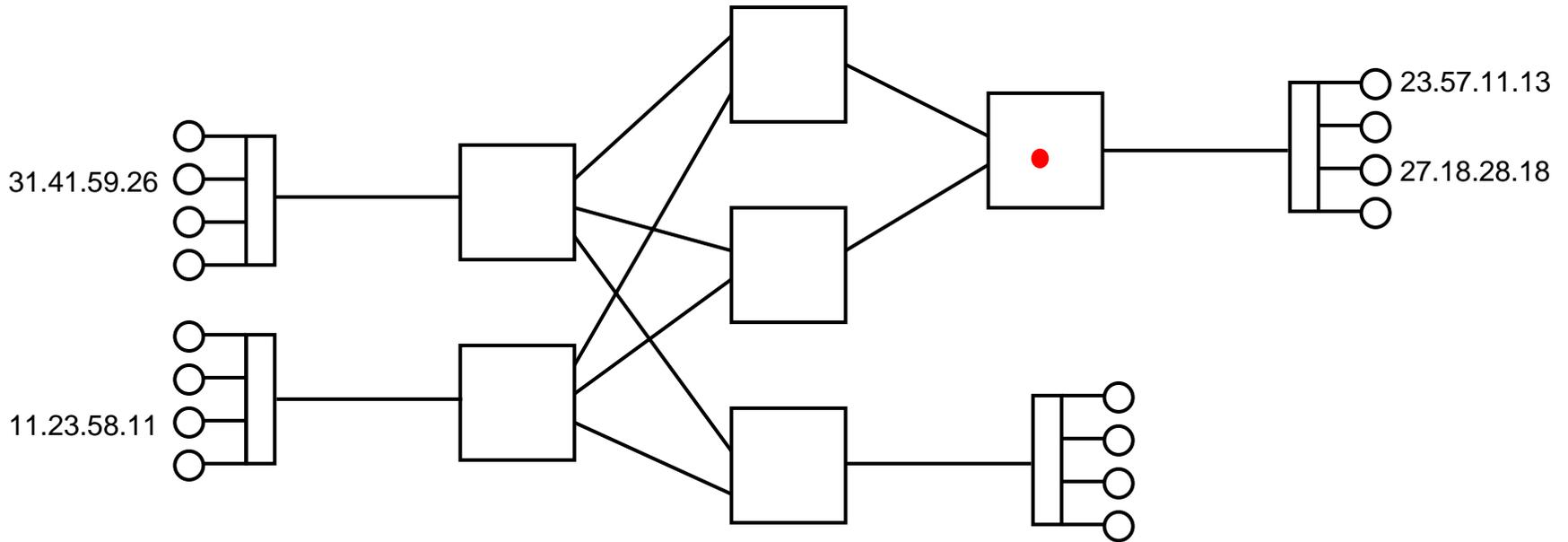
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



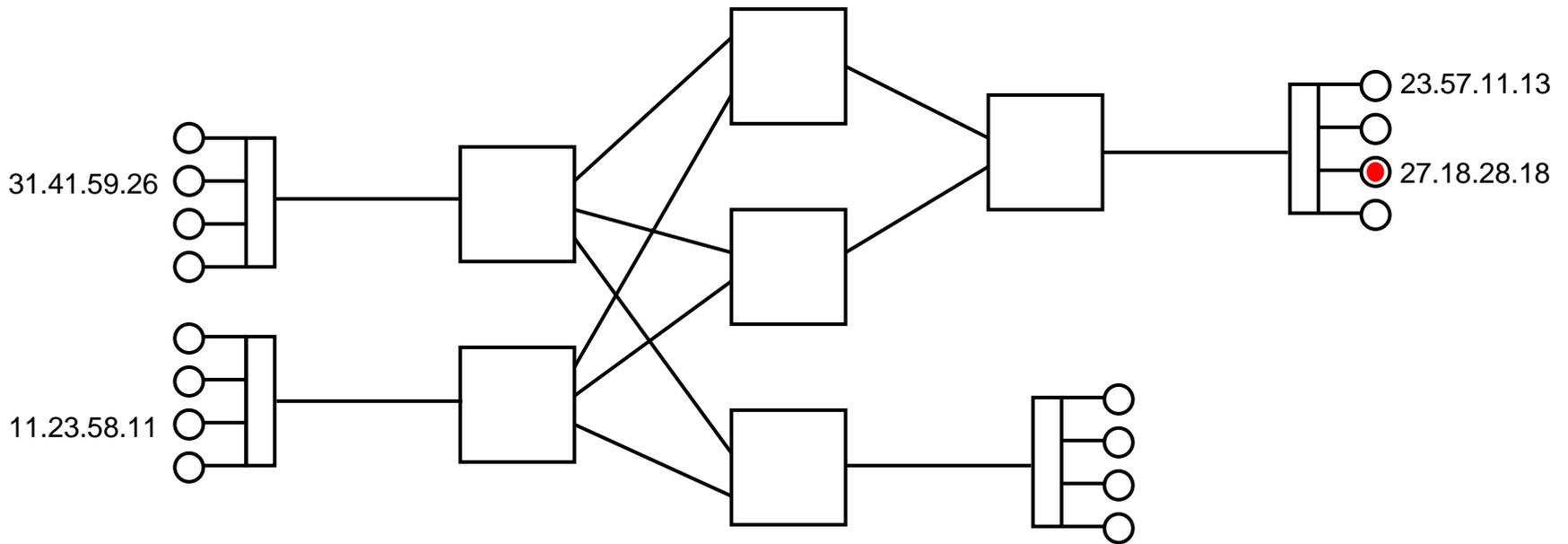
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



Adresse IPv4 : 32 bits, **31.41.59.26**
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

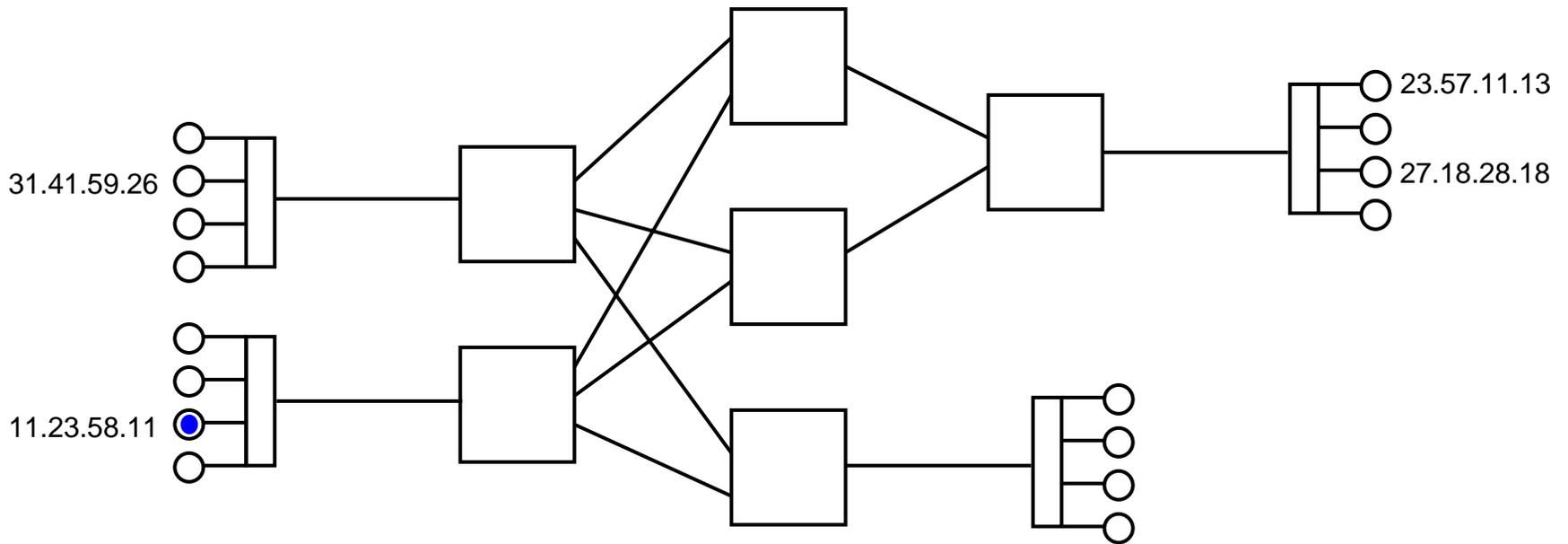
Internet : routage pur (IP)



Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26

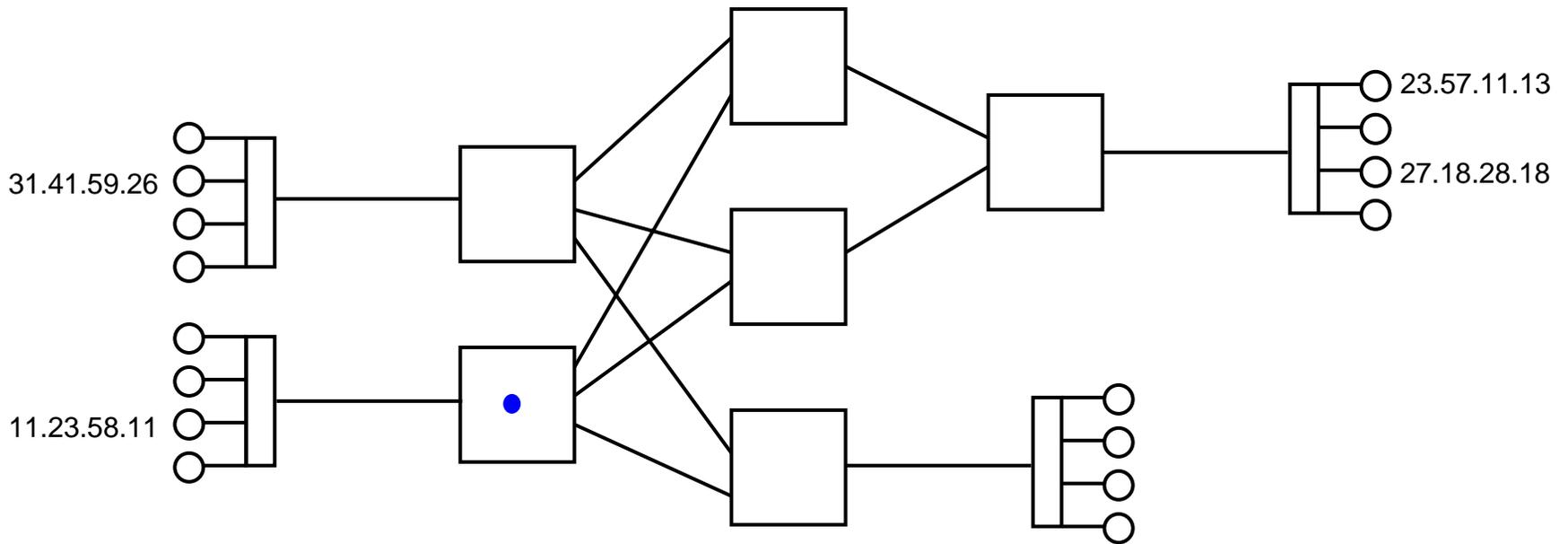
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



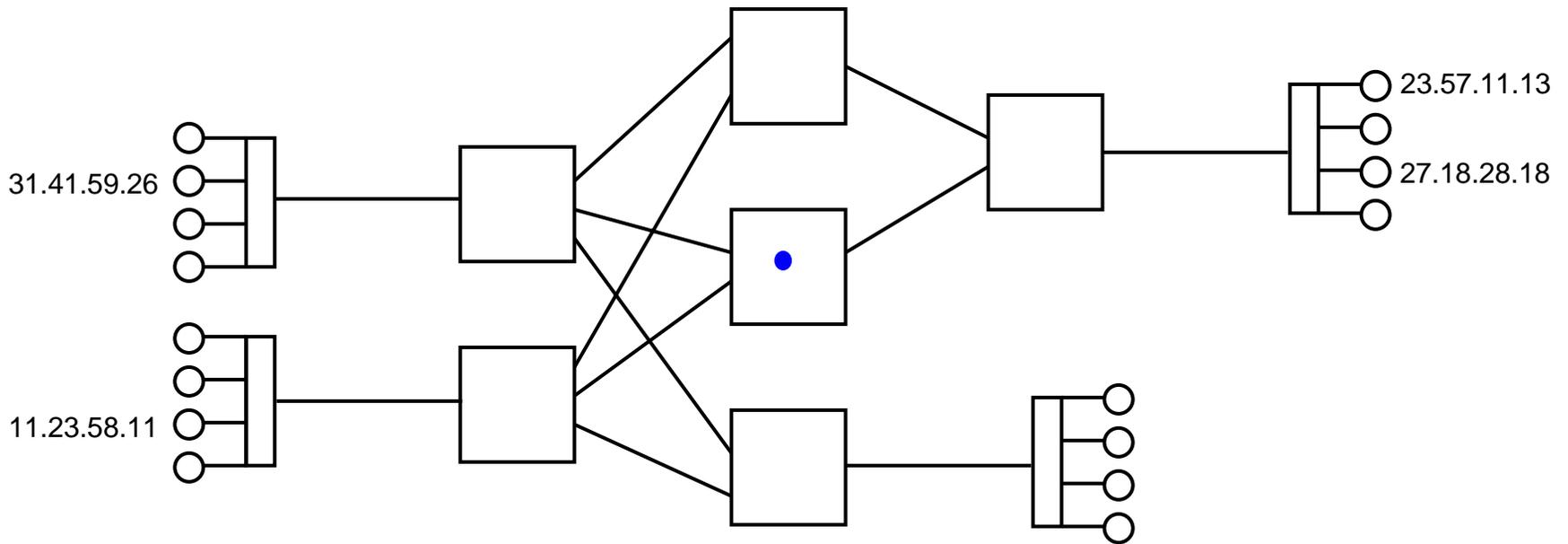
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



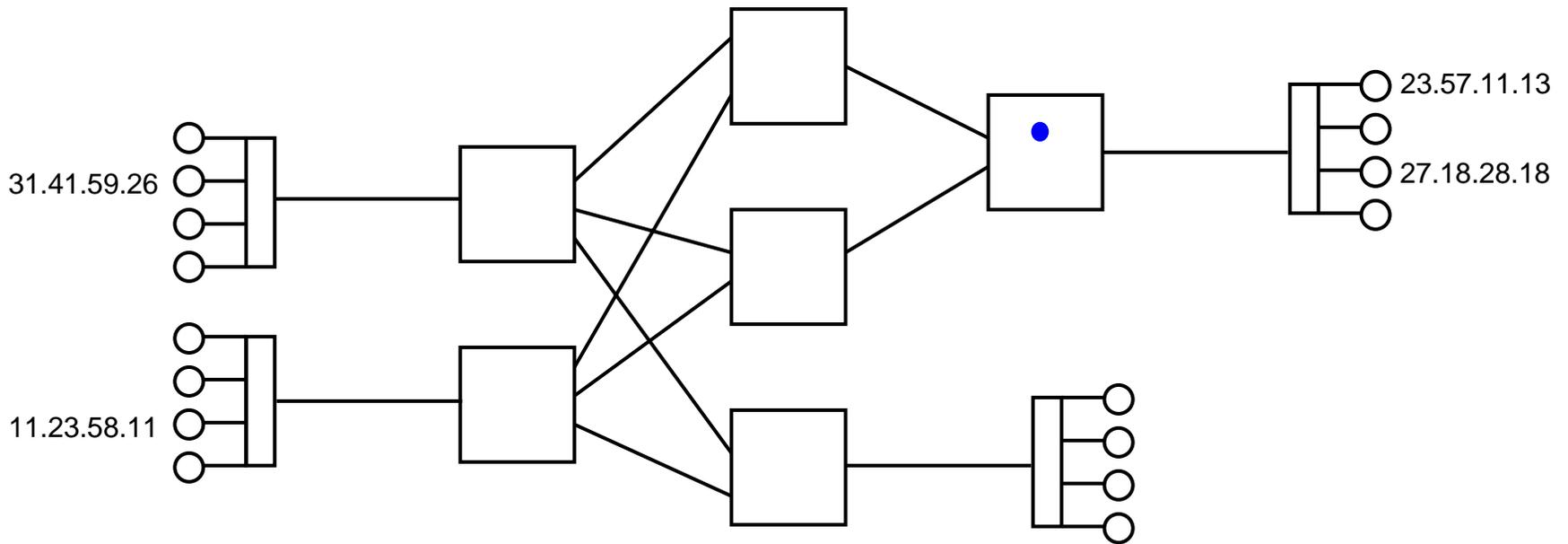
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



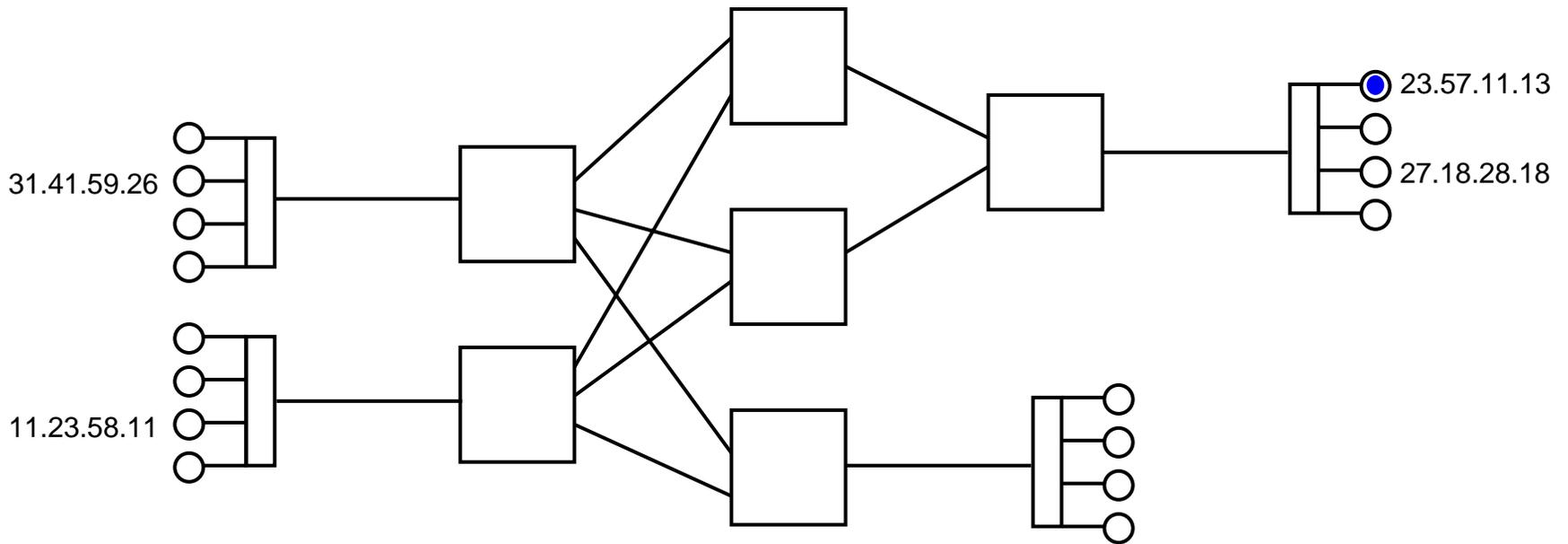
Adresse IPv4 : 32 bits, **31.41.59.26**
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



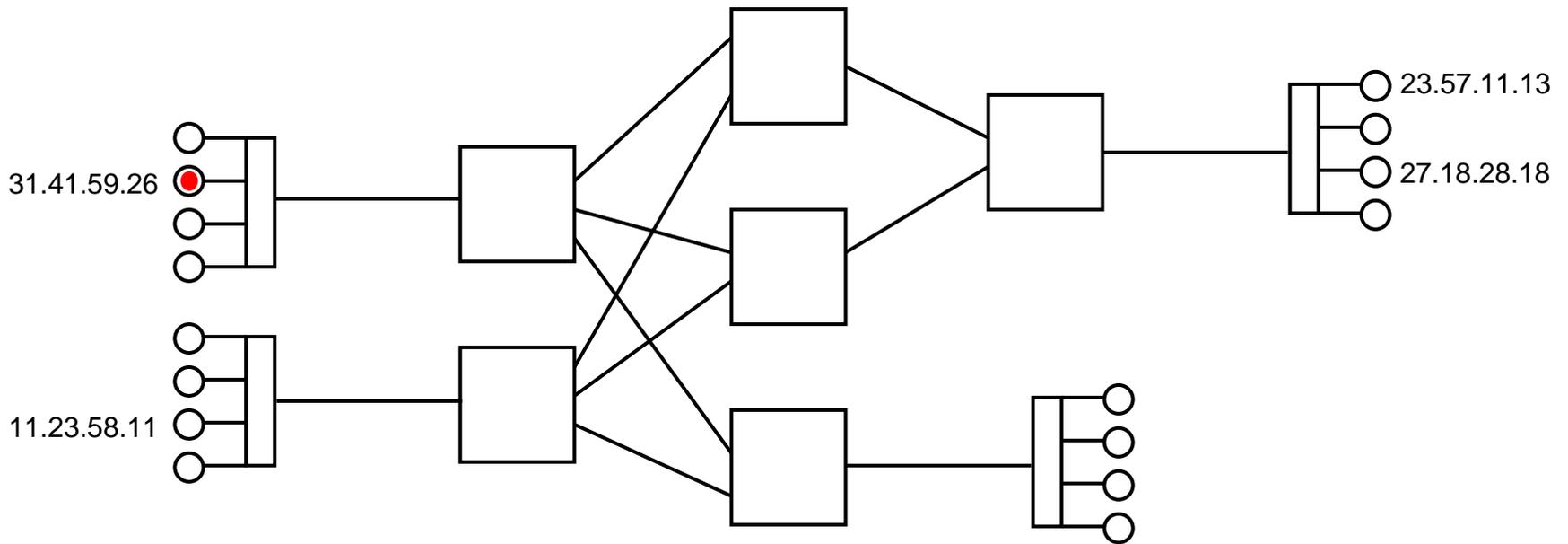
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



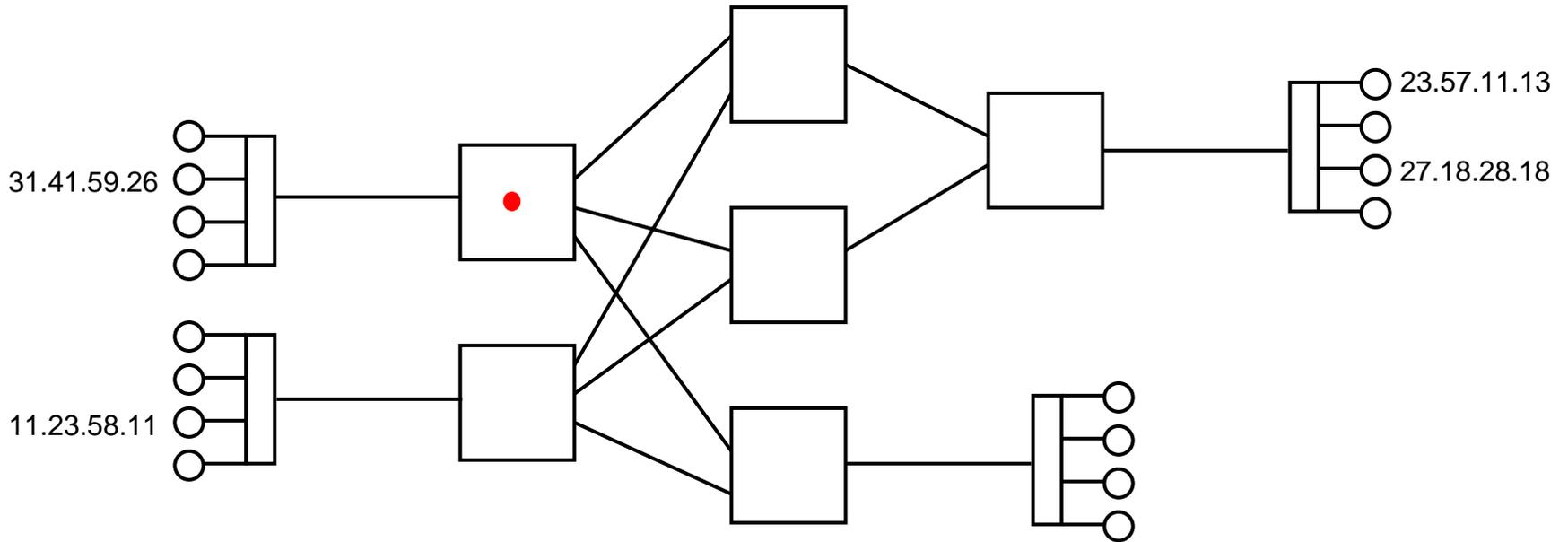
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



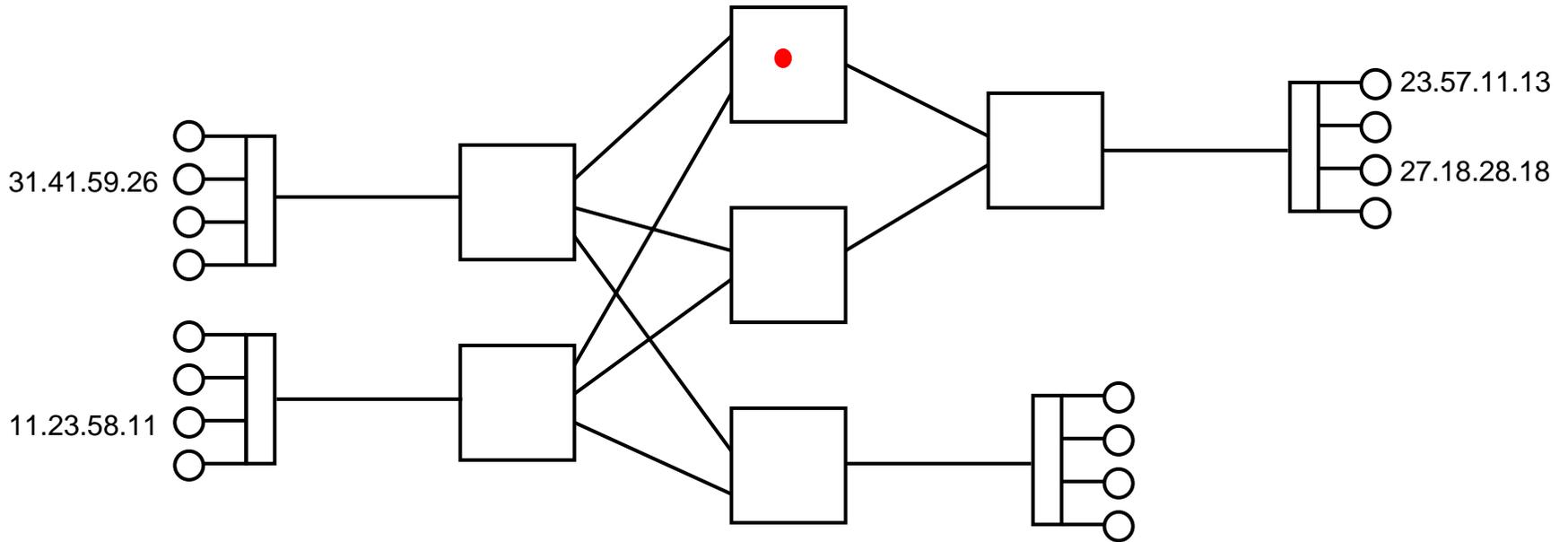
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



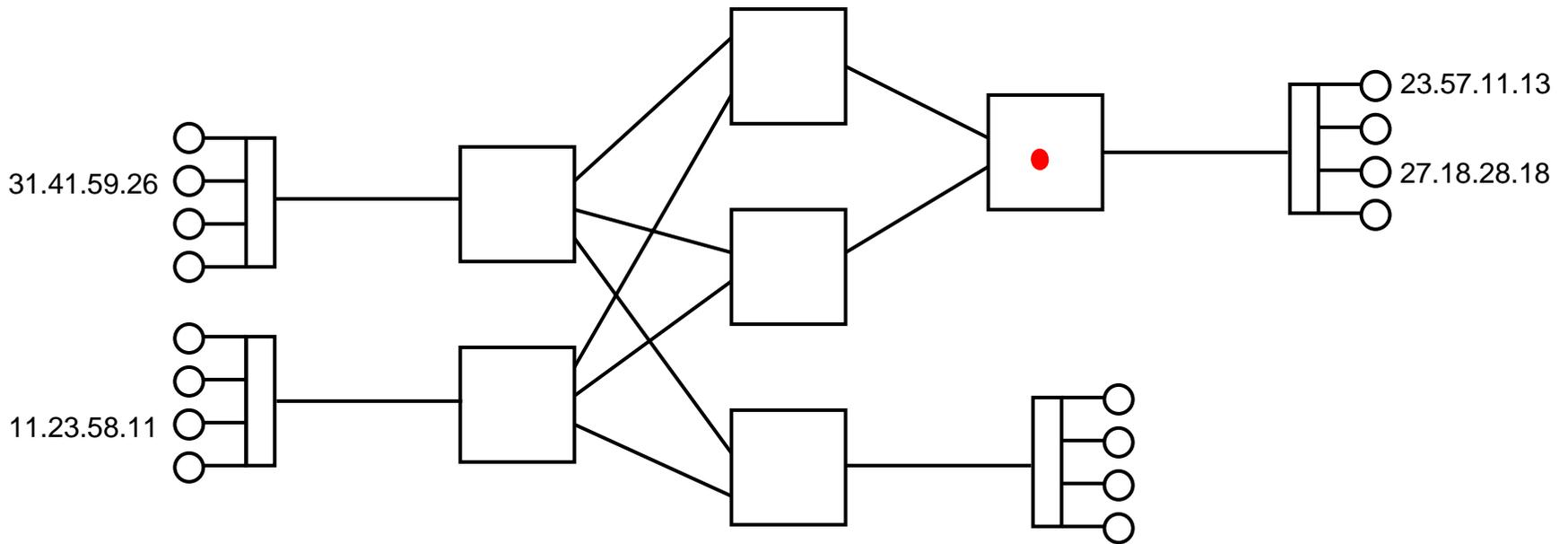
Adresse IPv4 : 32 bits, **31.41.59.26**
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



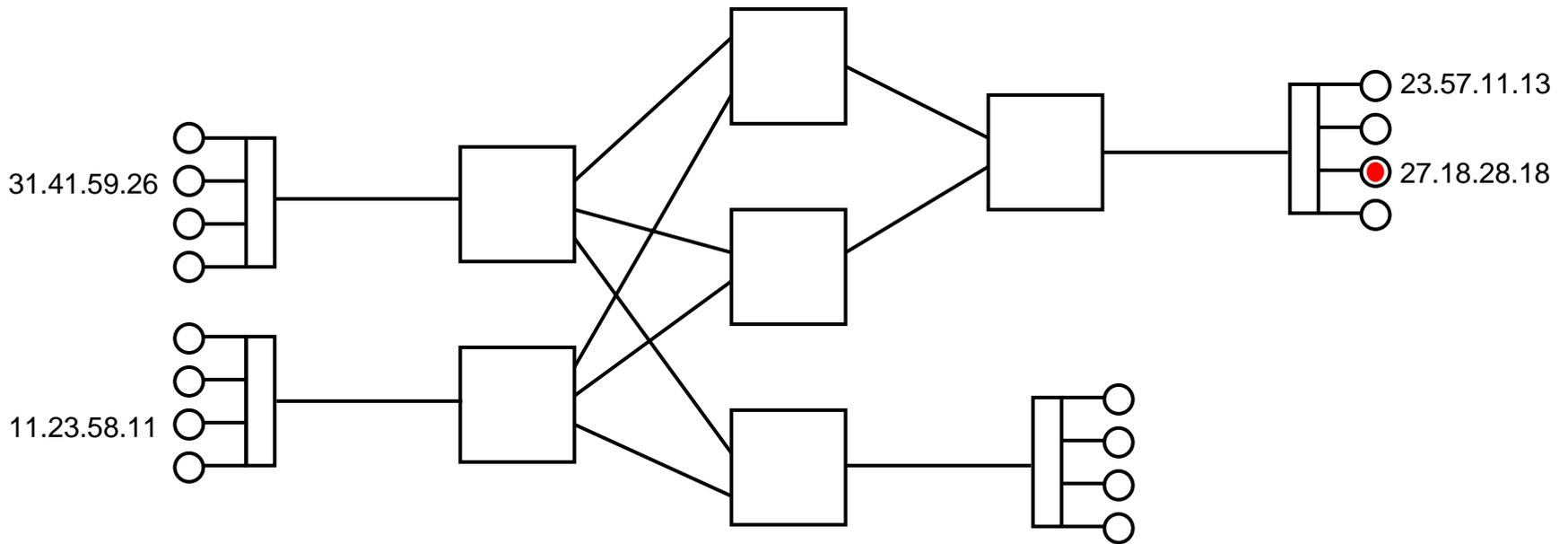
Adresse IPv4 : 32 bits, **31.41.59.26**
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



Adresse IPv4 : 32 bits, **31.41.59.26**
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

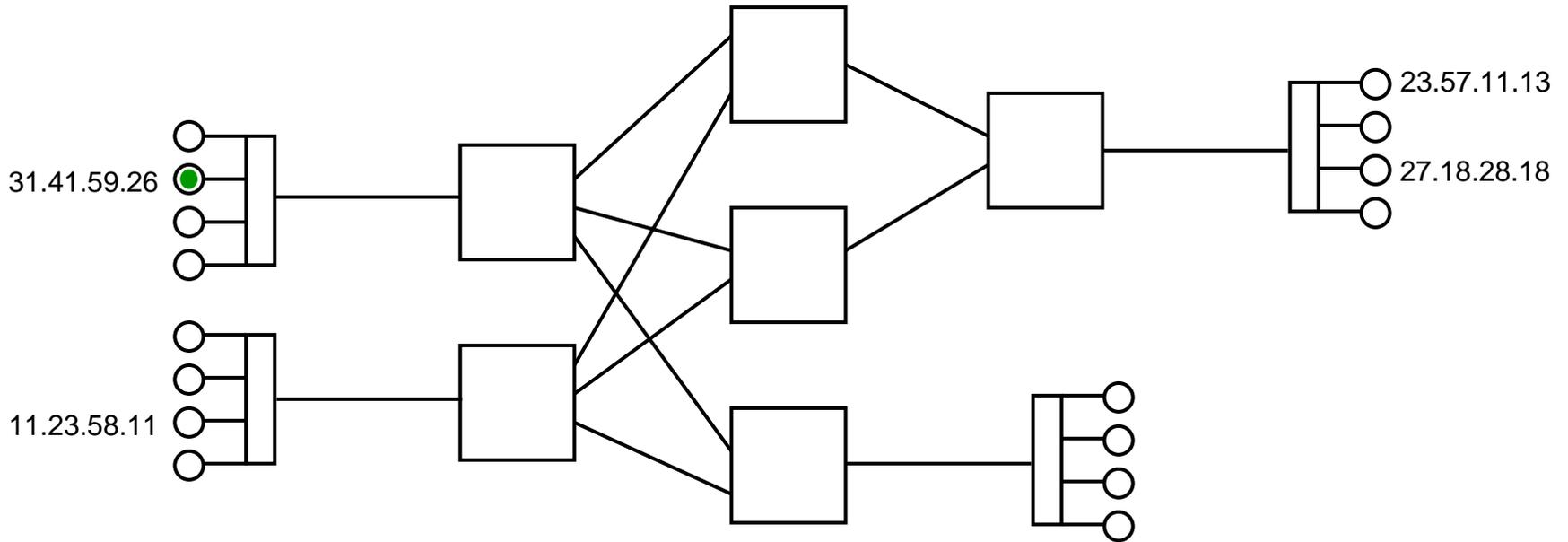
Internet : routage pur (IP)



Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26

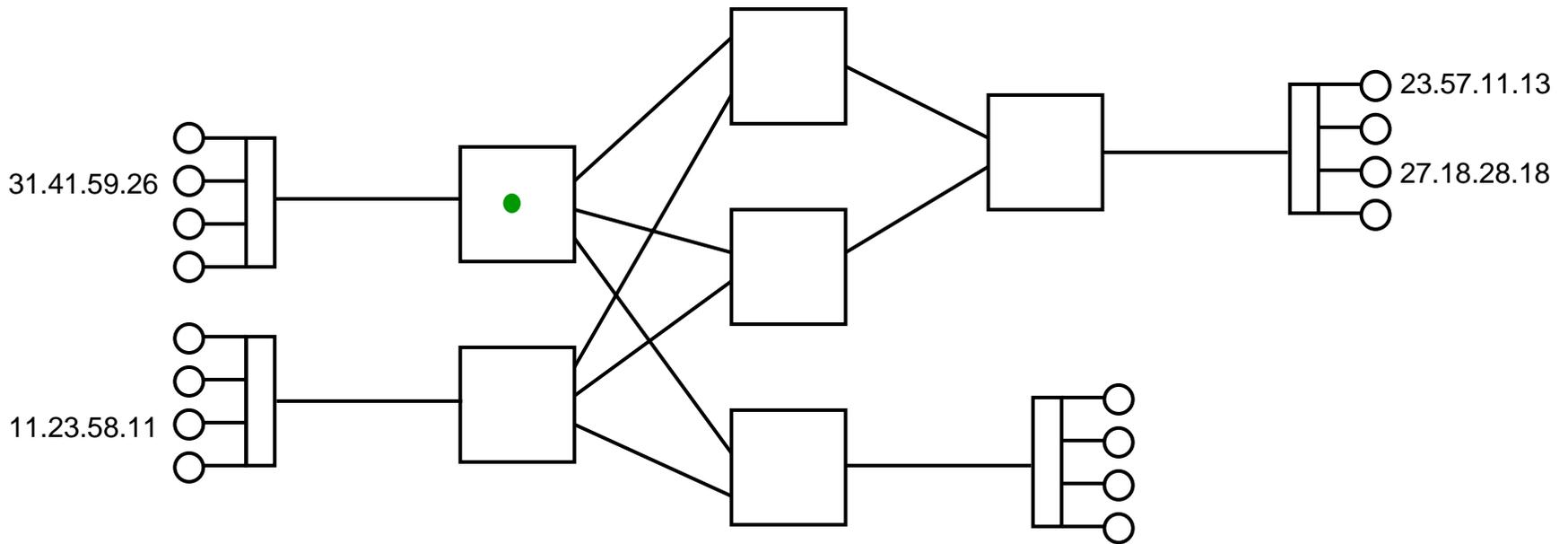
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



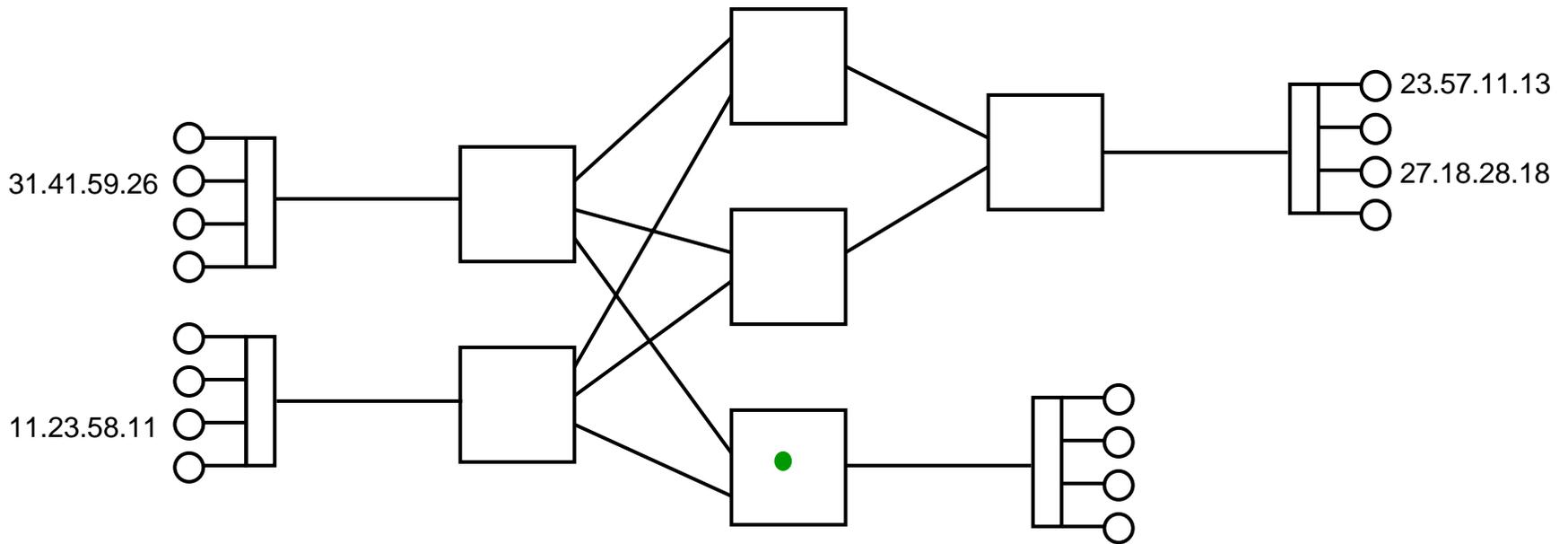
Adresse IPv4 : 32 bits, **31.41.59.26**
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



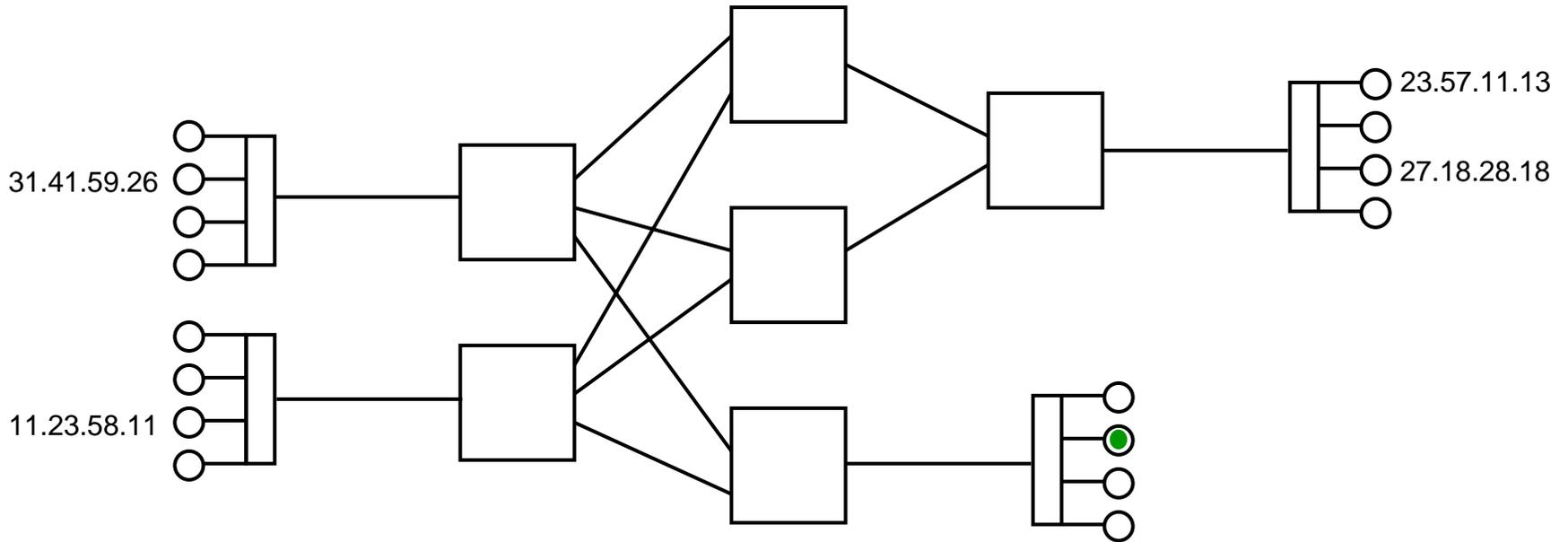
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Internet : routage pur (IP)



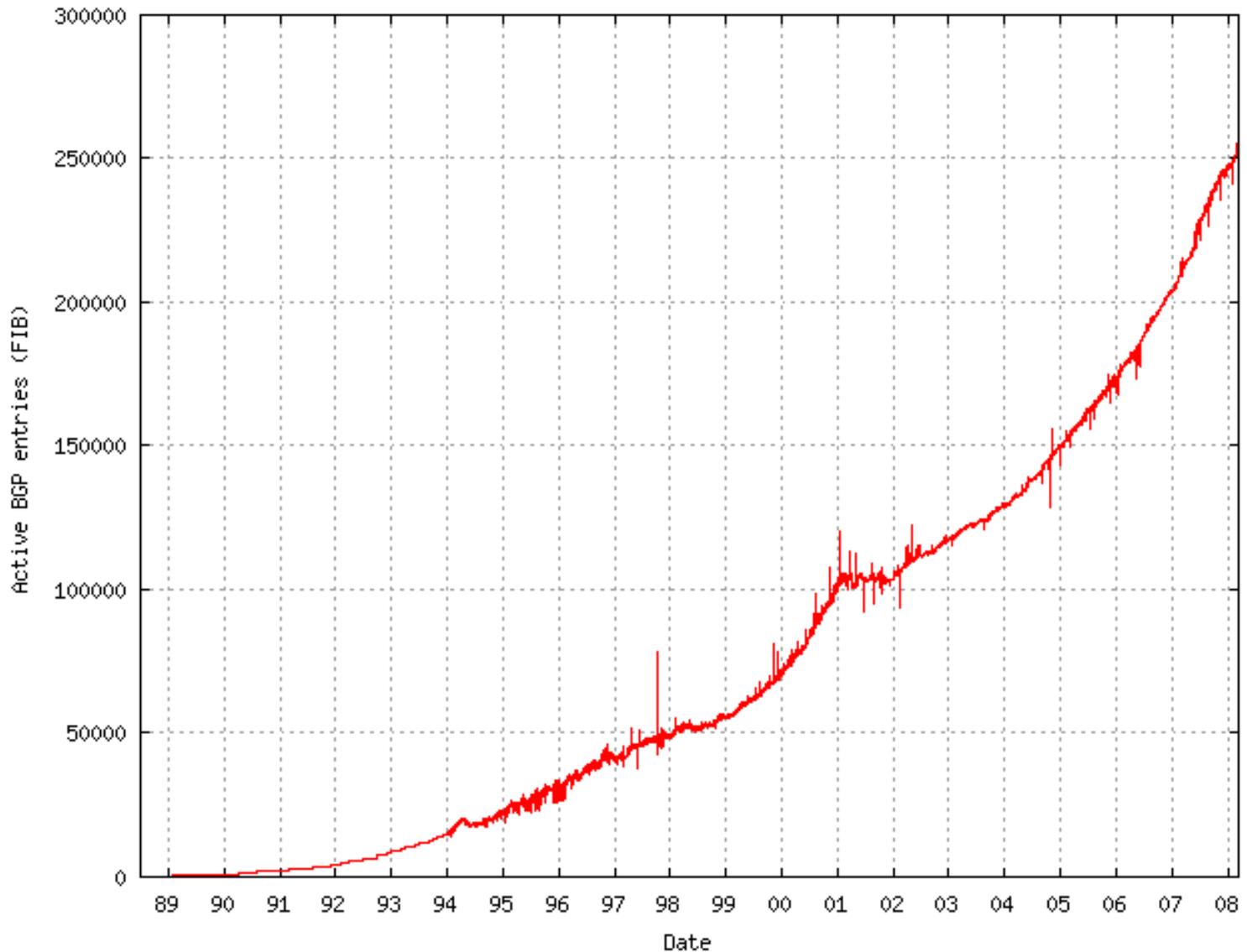
Adresse IPv4 : 32 bits, 31.41.59.26
Adresse IPv6 : 128 bits, une par objet !

Tables de routage

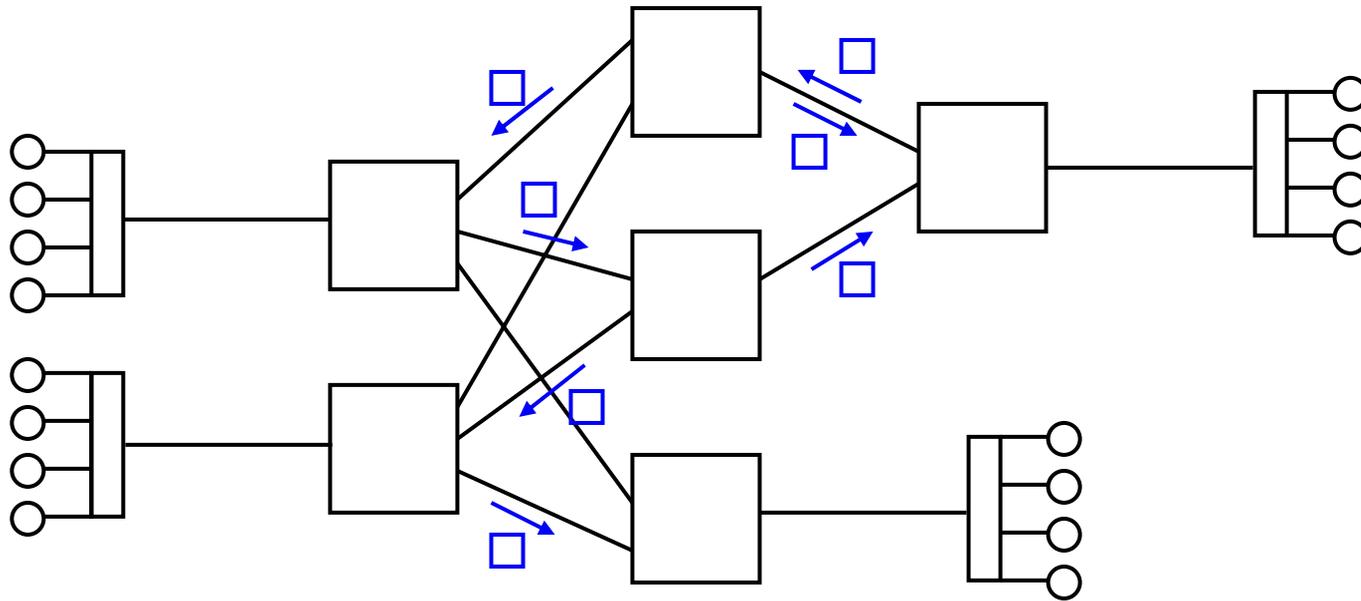
110.*.*.*	1 ^e à gauche
127.*.*.*	2 ^e à droite
92.*:*:*	tout droit en face
31:41:59:26	PC de mamie
31:24:63:*	réseau du salon
...	

serveurs de noms
college-de-france.fr 134:22:31:48

Croissance des tables de routage

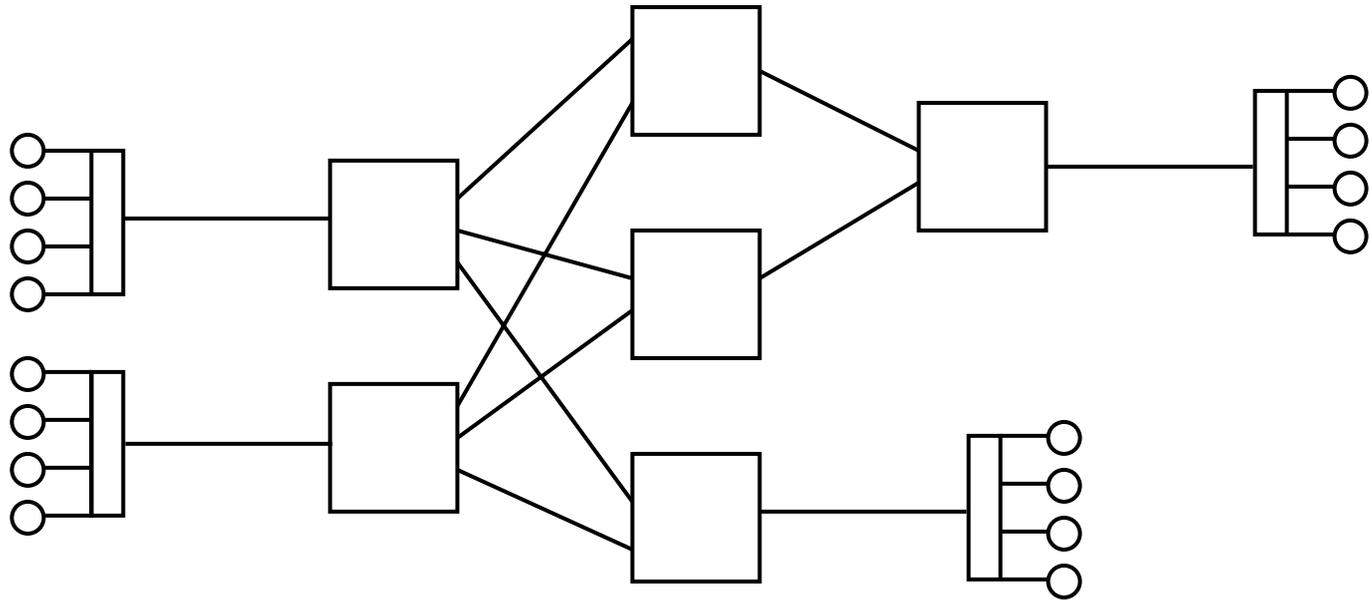


Echange de tables de routage

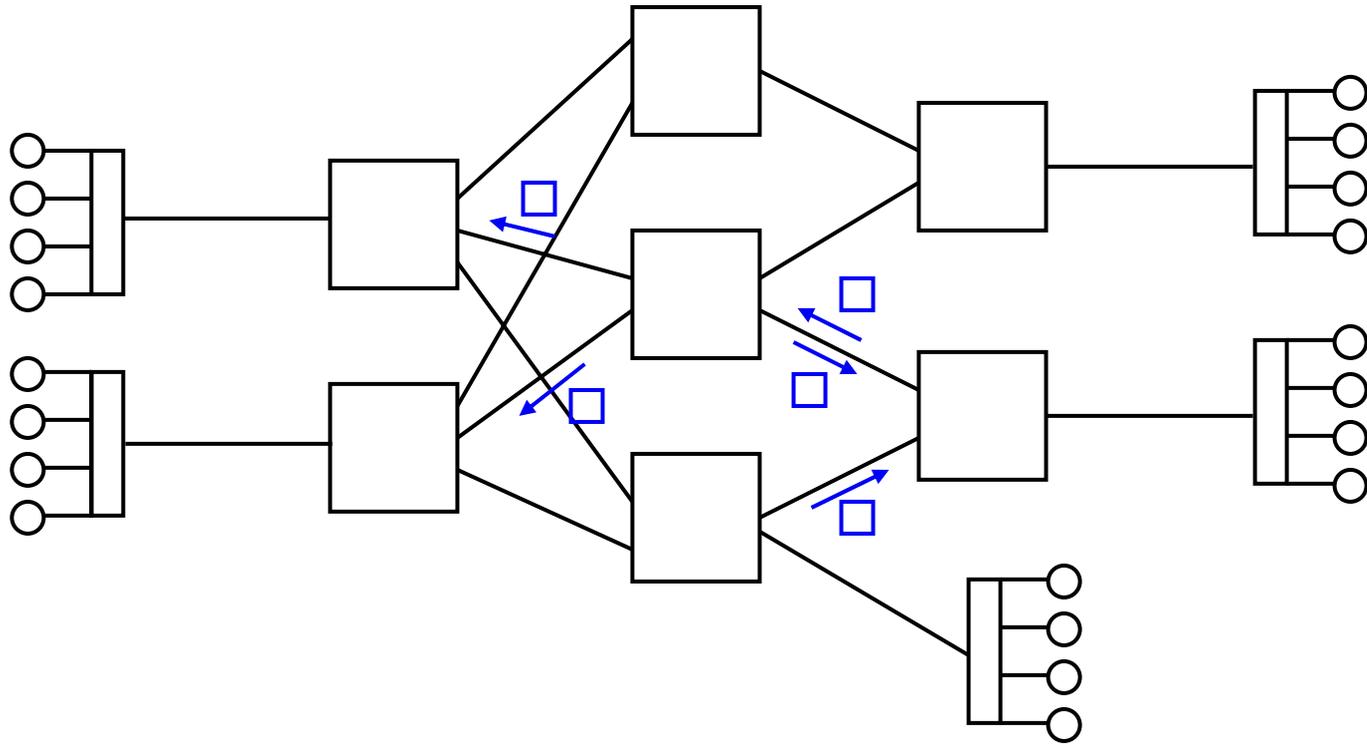


Calcul itératif des routes optimales
(grosse information dans chaque routeur)

Echange de tables de routage



Auto-reconfiguration



Contrôle de congestion : TCP

- Contrôle dans les terminaux, pas dans le réseau
routeur plein => paquets jetés !
- Bonus additif
tant qu'on reçoit des A.R., on fonce !
en incrémentant linéairement la taille de fenêtre
- Malus multiplicatif
tant qu'on ne reçoit plus des A.R., on freine !
en divisant par 2 la taille de fenêtre

Partage équitable des ressources
Mais plus de qualité de service garantie...

Les réseaux embarqués

- Tolérance aux perturbations radio-électriques
- Réseau CAN (automobile)
 - collisions, résolution par priorité de 0 sur 1
 - non-déterminisme global
- Réseaux TTP & FlexRay (automobile, avionique)
 - permettre l'automatique distribuée => déterminisme
 - synchronisation d'horloges
 - transmissions prévisibles
 - redondance et tolérance aux pannes
- Ethernet temps-réel, Ethernet déterministe, ...

Où est la science dans tout ça ?

- transmission : traitement du signal, théorie de l'information
- liaison, réseau : protocoles, vérification formelle
- protection : cryptologie, sécurité (IPSEC)
- routage : graphes, ordonnancement
- contrôle de flux : algorithmes distribués
- dimensionnement : statistiques & probabilités
- diffusion : systèmes dynamiques

Merci à François Baccelli, Claude Berrou,
Laurent Massoulié, Guy Pujolle

Albert Robida, le téléphonoscope

www.robida.info



« Les cours par téléphonoscope », *La Vie électrique*, Paris, Librairie Illustrée, [1893], in-texte p. 25.

télé-enseignement (1893)



Le sac de Pékin présenté aux Parisiens

E-commerce dès 1893 !



« Emplettes par télé », *La Vie électrique*, Paris, Librairie Illustrée, [1893], in-texte p. 32.

Phono-opéragraphe = lecteur MP3 !



www.robida.info

*Mais Albert Robida n'a inventé
ni le moteur de recherche
ni le pair à pair !*

D'où les deux séminaires
qui suivent !