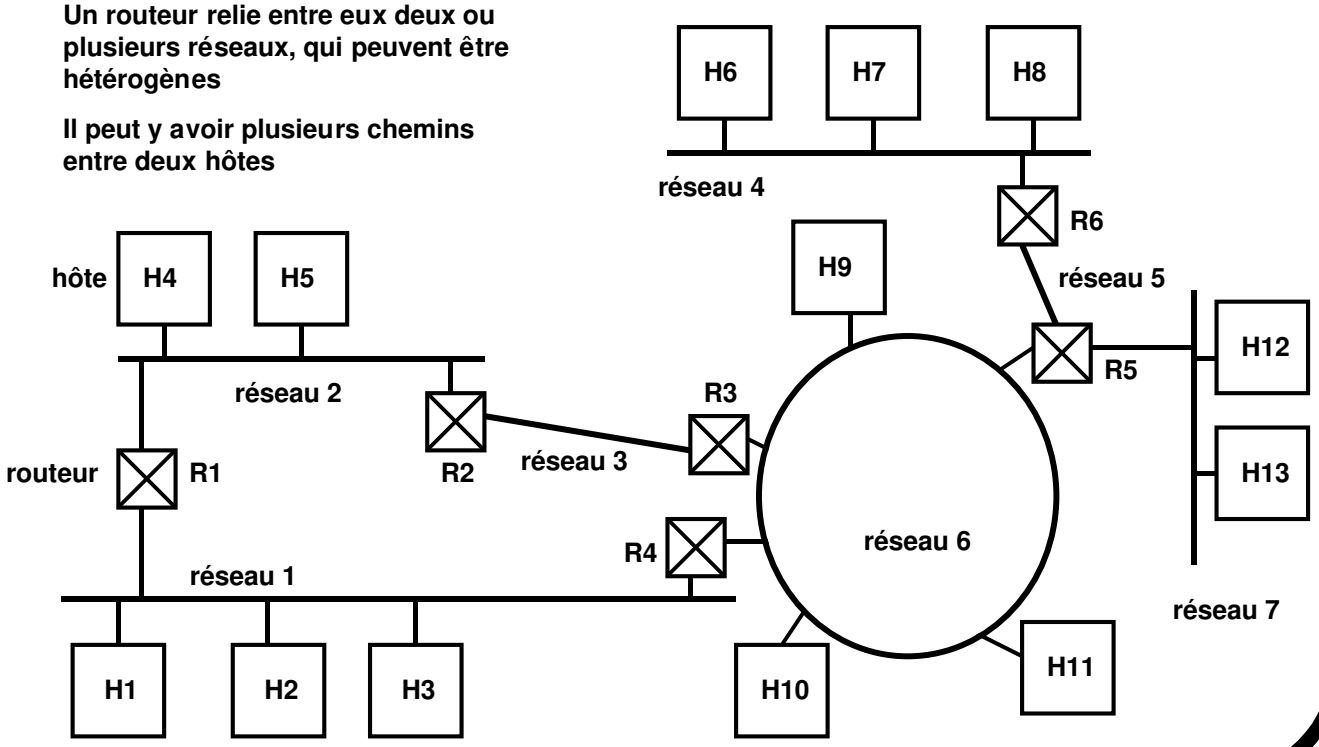
Interconnexion de réseaux

- **Un premier exemple d'interconnexion : les ponts** (déjà vu)
  - Limitations : nombre restreint de réseaux homogènes (ou utilisant le même schéma d'adressage)
- **Les problèmes de l'interconnexion**
  - Hétérogénéité : comment relier des réseaux utilisant des protocoles différents ?
  - Passage à l'échelle : comment maintenir des bonnes performances quand le nombre de sites du réseau augmente (parfois de manière exponentielle) ?
- **La solution de l'Internet**
  - Un ensemble de réseaux (hétérogènes) reliés par des routeurs (organes d'interconnexion et d'aiguillage du trafic)
  - Un protocole unique (Internet Protocol, ou IP), comprenant
    - un schéma unique d'adressage (adresse IP) sur un ensemble de réseaux interconnectés
    - un format unique de "paquets " (unité d'information pour un ensemble de réseaux interconnectés)
    - des algorithmes de routage (acheminement des paquets depuis le site origine jusqu'au site destination, à travers un ensemble de réseaux et de routeurs)
  - Le protocole IP est très largement adopté comme standard

Principe de l'interconnexion de réseaux

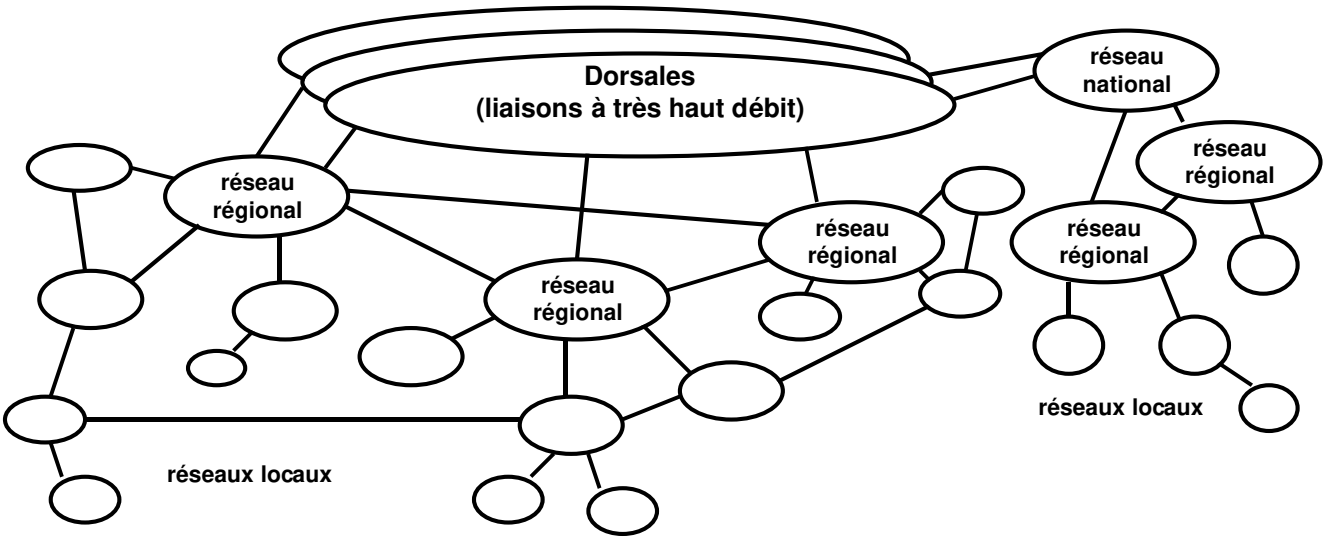
Un routeur relie entre eux deux ou plusieurs réseaux, qui peuvent être hétérogènes

Il peut y avoir plusieurs chemins entre deux hôtes



Organisation de l'Internet

(très simplifiée)



Interconnexion de domaines autonomes (ensembles de réseaux), dont chacun est géré par une autorité administrative
Des regroupements (national, régional, local, etc.) permettent de coordonner la gestion

Exemple en France : RENATER (Réseau de la Recherche), ARAMIS en Rhône-Alpes, etc.

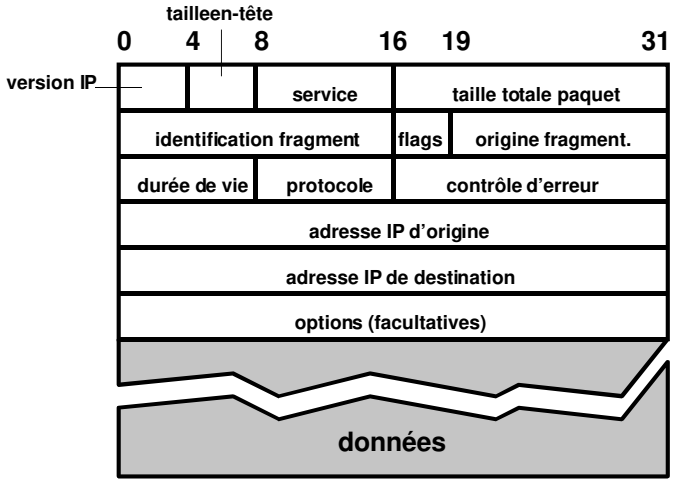
Adresses IP

- **Tout hôte connecté à l'Internet a une adresse IP**
  - **Adresse = (muméro de réseau, numéro de l'hôte sur le réseau)**
  - **Actuellement (IP v4) : 32 bits. 3 classes de réseaux**

  - **Notation standard d'une adresse IP : 4 tranches de 8 bits (ex : 194.199.20.61)**
  - **Évolution future (IP v6) : 128 bits**
- **Adressage des routeurs**
  - **Un routeur connecté à plusieurs réseaux possède plusieurs adresses IP (une sur chaque réseau)**

Format des paquets IP

- Le protocole IP encapsule dans des paquets les informations transmises par les protocoles spécifiques de niveau supérieur (TCP, UDP, voir plus loin)
- Paquet IP = en-tête + données (définies par le format du niveau supérieur)
- L'en-tête contient toutes les informations nécessaires à l'acheminement du paquet



- Taille max. d'un paquet = 2^{16}-1 octets (65535)
- Durée de vie : nombre maximal de retransmissions (par défaut 64)
- Informations de fragmentation : servent à transmettre des paquets en plusieurs fragments (la taille max. des données n'est pas la même sur tous les réseaux)
- Protocole : identification du protocole de niveau supérieur

Protocole IP : acheminement des paquets (1)

- Problème de l'acheminement (*forwarding*)
  - Comment un paquet IP est-il transmis entre son hôte d'origine et son hôte de destination (l'un et l'autre définis par leur adresse IP) ?
  - Réponse : en utilisant des informations d'aiguillage présentes dans les routeurs (sur quelle sortie renvoyer un paquet en fonction de son adresse de destination)
- Problème du routage (*routing*)
  - Comment construire les informations d'aiguillage (tables de routage) qui servent à l'acheminement ?
  - Comment faire évoluer ces informations au cours du temps, pour maintenir les performances du réseau et résister aux défaillances des lignes ou des routeurs ?

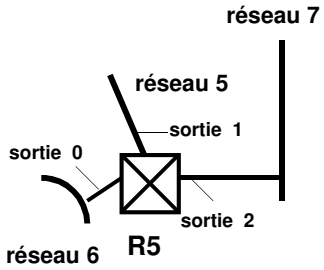
Protocole IP : acheminement des paquets (2)

- **Exemple de table de routage pour le routeur R5 de la figure 8-2**

N° réseau destination	envoyer à
1	R4 (sur réseau 6)
2	R3 (sur réseau 6)
3	R3 (sur réseau 6)
4	R6 (sur réseau 5)
5	sortie 3
6	sortie 0
7	sortie 2
par défaut	R3 (sur réseau 6)

Les adresses dans les tables de routage sont des adresses IP

Il y a toujours un routeur "par défaut" auquel on transmet les paquets si le réseau destinataire n'est pas dans la table de routage

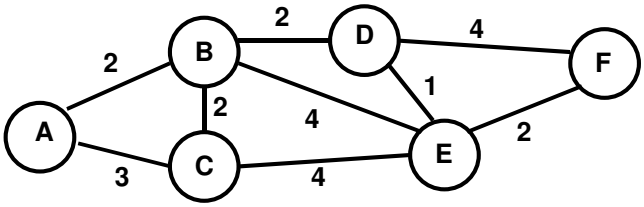


Intérêt de la décomposition de l'adresse IP en (adresse de réseau, adresse locale au réseau) : on réduit le nombre d'informations dans les tables de routage (une entrée par réseau plutôt qu'une par hôte), d'ou meilleure capacité de croissance

Dans un petit réseau, les tables de routage peuvent être remplies "à la main". Sur un réseau de grande taille, elles sont construites automatiquement et modifiées dynamiquement

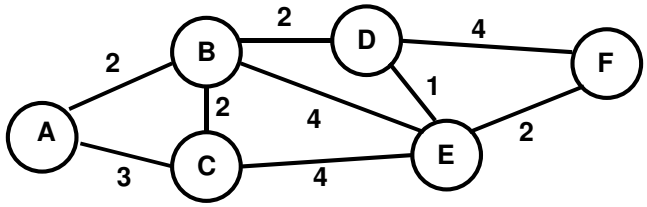
Le problème du routage

- **Une première formulation générale du problème**
  - Étant donné un graphe (ensemble de nœuds reliés par des arcs), on cherche le "meilleur" chemin entre deux nœuds quelconques (il faut donner des critères permettant de définir le "meilleur")
  - On veut créer sur chaque nœud les informations permettant de choisir le meilleur chemin vers une destination donnée



  - Supposons que
    - les temps de transit entre deux nœuds sont constants et connus
    - le "meilleur" chemin est celui qui prend le moins de temps
  - Alors (par énumération) on peut construire pour chaque nœud les "tables de routage" indiquant pour chaque destination finale le prochain nœud du meilleur chemin
  - Mais la réalité est différente...
    - les temps de transit changent en permanence, en fonction de la charge
    - les temps de transit sont inconnus a priori
    - des nœuds peuvent tomber en panne et des arcs peuvent être coupés

Principe (simplifié) du routage adaptatif (1)



On va construire progressivement les tables des plus courtes distances, à partir d'une estimation initiale grossière
Cette construction se fait en échangeant de l'information entre les nœuds
Estimation initiale : temps 1 vers les voisins, infini vers les autres

table initiale

nœud	distance vers A	B	C	D	E	F
A	0	1	1	∞	∞	∞
B	1	0	1	1	1	∞
C	1	1	0	∞	1	∞
D	∞	1	∞	0	1	1
E	∞	1	1	∞	0	∞
F	∞	∞	∞	1	1	0

Chaque nœud estime sa distance à ses voisins (1/2 durée d'aller-retour), met à jour sa table et l'envoie à ses voisins. Ensuite, chaque nœud peut calculer les meilleurs chemins de proche en proche, par addition et comparaison

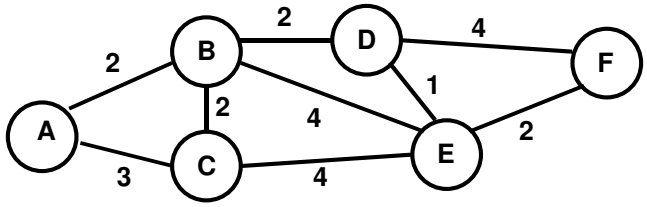
Chaque nœud réévalue ses distances à ses voisins et transmet périodiquement sa table à ses voisins

Panne d'un nœud = distance infinie

table mise à jour

nœud	distance vers A	B	C	D	E	F
A	0	2	3	4	5	7
B	2	0	2	2	3	5
C	3	2	0	4	4	6
D	4	2	4	0	1	3
E	5	3	4	1	0	2
F	7	5	6	3	2	0

Principe (simplifié) du routage adaptatif (2)



À partir des tables des plus courtes distances, on peut construire les tables de routage (il suffit de connaître le prochain nœud de chaque meilleur chemin, non le chemin entier)
Ces tables sont également mises à jour périodiquement, en fonction des modifications des durées mesurées et de la disponibilité des nœuds.

table de routage du nœud B

destination	temps	prochain nœud
A	2	A
B	0	B
C	2	C
D	2	D
E	3	D
F	5	D

table de routage du nœud B après panne du nœud D

destination	temps	prochain nœud
A	2	A
B	0	B
C	2	C
D	∞	-
E	4	E
F	6	E

Rappel : sur l'Internet, les destinations dans les tables de routage sont des réseaux, non des hôtes

Protocole IP : compléments et conclusion

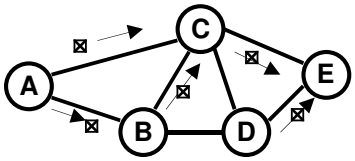
- **Un problème non abordé : la congestion**
  - Les routeurs ont un espace de stockage intermédiaire pour les paquets en transit
  - En cas de surcharge, cet espace peut être insuffisant ; des paquets sont alors perdus
  - Les protocoles de transport (notamment TCP) utilisent des algorithmes de contrôle de congestion pour limiter (non entièrement éviter) la congestion
- **Quel service fournit le protocole IP ?**
  - Le protocole IP fait "de son mieux" (*best effort*) pour acheminer un paquet entre son origine et sa destination
  - Mais il ne garantit pas
    - l'arrivée effective du paquet à destination
    - un temps maximal de transit
    - que les paquets arriveront dans l'ordre de leur émission
  - C'est aux protocoles de niveau supérieur de prendre les mesures nécessaires pour tenir compte de ces caractéristiques : détecter les pertes, réordonner les paquets, réserver des ressources, etc.
  - En contrepartie, la simplicité et la robustesse d'IP lui assurent une position de standard universel

Conversion entre adresses IP et adresses locales

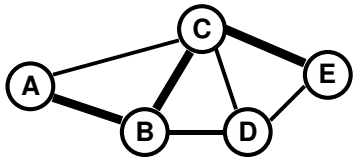
- **Exemple : un Ethernet connecté à l'Internet**
  - Adresse locale Ethernet (48 bits), utilisée par le protocole Ethernet (CSMA/CD)
  - Adresse IP sur l'Internet (32 bits), utilisée par le protocole IP
- **Un protocole de conversion : *Address Resolution Protocol* (ARP)**
  - Objectif : construire sur chaque hôte du réseau local une table de correspondance entre adresse locale (Ethernet) et adresse IP
  - Principe : utiliser le fait que Ethernet est un réseau à diffusion (chaque hôte reçoit tous les messages) - même chose sur FDDI
  - Un hôte (ou routeur) qui veut connaître l'adresse locale d'un autre hôte de l'Ethernet, connaissant son adresse IP, diffuse un message d'interrogation sur l'Ethernet, incluant cette adresse IP (ainsi que sa propre adresse locale et sa propre adresse IP)
  - L'hôte possédant cette adresse répond en donnant son adresse locale
  - Tous les hôtes (et pas seulement le demandeur) reçoivent la réponse et peuvent mettre à jour leur table de correspondance
  - De plus, les hôtes enregistrent le couple (adresse IP, adresse locale) du demandeur
  - Les informations sont invalidées périodiquement (15 minutes) et doivent être regénérées

Un autre mode d'acheminement dans les réseaux : les circuits virtuels

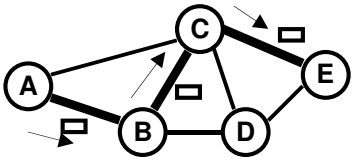
- Le transport des messages par paquets indépendants n'est pas la seule technique utilisée
- La notion de circuit virtuel vise à reconstituer entre deux hôtes l'équivalent d'un circuit physique
- L'avantage principal est la garantie de disponibilité des ressources, qui permet de garantir une qualité de service
- Les organes intermédiaires sont des commutateurs (*switches)*



Paquets : un message entre A et E est décomposé en paquets indépendants Certains suivent le chemin ABCE, d'autres ABDE, d'autres ACE, etc. Ils arrivent dans un ordre quelconque.



Circuits, phase 1 : établissement. Un circuit est créé par étapes successives entre origine et destination (ABCE par exemple) . Les ressources sont réservées dans les nœuds intermédiaires



Circuits, phase 2 : transmission. Les messages sont envoyés sur le circuit, et acheminés (dans l'ordre) en utilisant les ressources réservées

Comparaison entre ponts et routeurs

- **Similitudes**
  - Les ponts et les routeurs servent à interconnecter des réseaux
  - Les ponts et les routeurs contiennent des informations permettant d'acheminer l'information vers sa destination
    - Ces informations peuvent être préparées à l'avance ou construites dynamiquement
- **Différences**
  - Les ponts opèrent au niveau 2 (protocole de liaison, trames) entre réseaux homogènes (ou au moins ayant le même format d'adresses)
    - les ponts servent à construire des réseaux locaux étendus
    - un pont a une adresse locale sur chacun des réseaux qu'il relie
  - Les routeurs opèrent au niveau 3 (protocole de réseau, paquets) entre réseaux hétérogènes
    - les routeurs servent à construire des interconnexions de réseaux ; ils sont les constituants de base de l'Internet (et des "intranets")
    - un routeur a une adresse IP sur chacun des réseaux qu'il relie

Comparaison entre routeurs et commutateurs

- **Similitudes**
  - Les routeurs et les commutateurs fonctionnent au niveau 3 (réseau)
  - Les routeurs et les commutateurs utilisent des tables internes et des techniques adaptatives
- **Différences**
  - Les routeurs sont des organes d'interconnexion de réseaux (éventuellement hétérogènes) ; leur rôle est d'acheminer des paquets entre un réseau et un autre, en estimant la meilleure route
  - Les commutateurs sont des organes internes à un réseau (homogène) ; leur rôle est d'acheminer des paquets entre les hôtes du réseau, en assurant les ressources nécessaires à chaque communication (un commutateur peut assurer par exemple un débit garanti entre deux entrées)
- **En fait, la distinction devient floue**
  - Les routeurs tendent à utiliser des techniques de commutation
  - Il existe des organes mixtes assurant les deux fonctions

Résumé de la séance 8

- **Interconnexion de réseaux**
  - Principes et problèmes
  - Fonctions d'un routeur ; différences entre ponts et routeurs
- **L'Internet et le protocole IP**
  - Place et objectifs du protocole IP
  - Adressage : adresses IP
  - Un algorithme de routage adaptatif
  - Conversion IP - adresses locales