
Réseaux I

Acheminement des données dans les réseaux à commutation de paquets

Nicolas Baudru

mél : nicolas.baudru@esil.univmed.fr

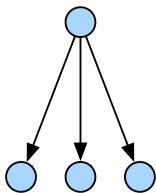
page web : nicolas.baudru.perso.esil.univmed.fr

- 1 Introduction
- 2 Techniques de commutation
- 3 Acheminement dans les réseaux à commutation de paquets
- 4 Protocole de routage
- 5 Adressage et nommage
- 6 Gestion des ressources

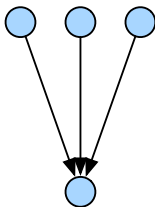
Plusieurs schémas sont issus du livre “Réseaux, d’Andrew Tanenbaum”

- 1 Introduction
- 2 Techniques de commutation
- 3 Acheminement dans les réseaux à commutation de paquets
- 4 Protocole de routage
- 5 Adressage et nommage
- 6 Gestion des ressources

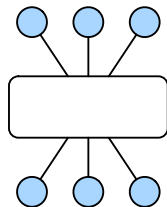
Qu'est ce qu'un réseau à commutation ?



Réseau de diffusion
(de 1 vers n)



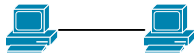
Réseau de collecte
(de n vers 1)



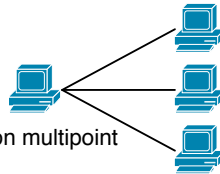
Réseau de commutation
(de n vers n)

Topologie physique des réseaux à commutation

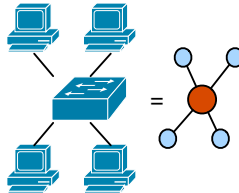
Les topologies de base :



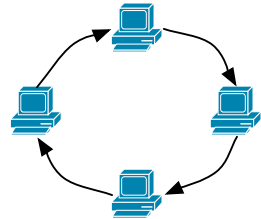
liaison point à point



liaison multipoint

bus
(réseau à diffusion)

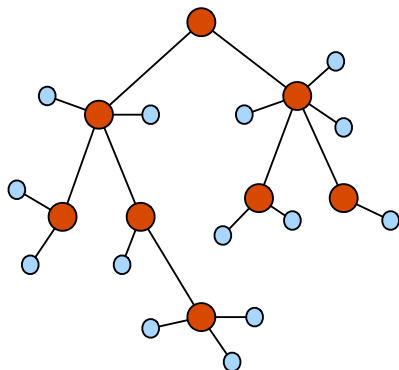
étoile



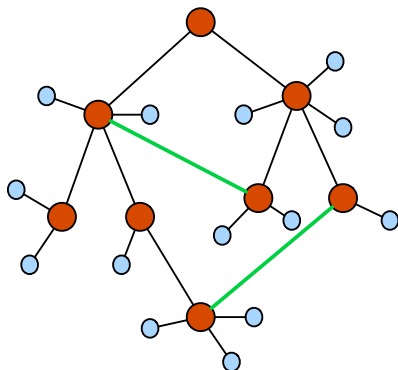
anneau

Topologie physique des réseaux à commutation (suite)

Les topologies construites :

réseau arborescent
(hiérarchique)

Un seul chemin entre deux noeuds



réseau maillé

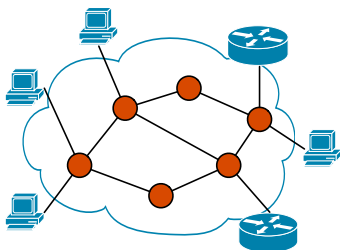
Eventuellement plusieurs chemins
entre deux noeuds

Première notion de commutation

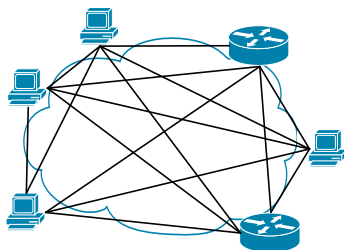
A quoi sert la commutation ?

Mettre en relation un utilisateur avec n'importe quel autre utilisateur.

La commutation permet l'aiguillage de la communication d'un canal en entrée vers un canal de sortie. Ainsi du point de vue utilisateur, la commutation assure l'acheminement des données de bout en bout de manière transparente.



vue physique



vue logique

Pourquoi est-t-elle nécessaire ?

Il n'est pas concevable de créer autant de liaisons point à point que de paires d'utilisateurs. Il faut donc mettre en oeuvre des techniques pour optimiser le partage des ressources (les commutateurs, les circuits de données, ...), appelées **techniques de commutation**.

Plusieurs techniques de commutation

- ▶ commutation de circuit
- ▶ commutation de messages
- ▶ commutation de paquets
- ▶ commutation de trames
- ▶ commutation de cellules

Que nécessite la commutation ?

Plusieurs mécanismes sont nécessaires au bon acheminement des données :

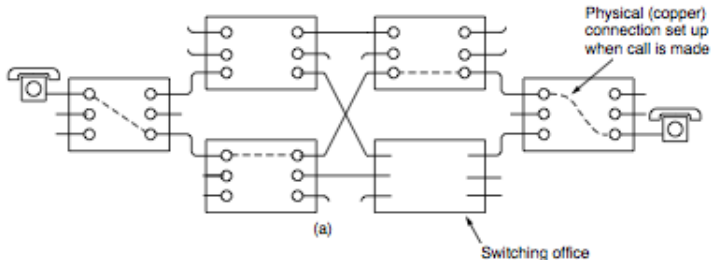
- ▶ des informations d'acheminement
 - ↳ l'adressage
- ▶ des techniques de selection de route
 - ↳ le routage
- ▶ un trafic fluide
 - ↳ contrôle de flux et de congestion

Plan

- 1 Introduction
- 2 Techniques de commutation**
- 3 Acheminement dans les réseaux à commutation de paquets
- 4 Protocole de routage
- 5 Adressage et nommage
- 6 Gestion des ressources

Réseaux à commutation de circuits

Construction physique d'un circuit entre la source et le destinataire avant tout échange, afin de créer une liaison de bout en bout.



Caractéristiques générales :

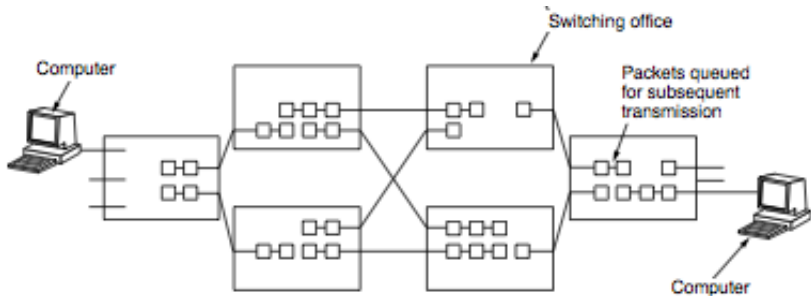
- ☺ respect du séquençement des données
- ☺ bande passante dédiée garantie
- ☺ débit rapide et constant
- ☺ les commutateurs ne sont concernés que par les protocoles de niveaux 1
- ☹ la source et le destinataire doivent avoir le même débit
- ☹ les circuits ne sont pas partagés \implies bloquages possibles

Réseaux à commutation de paquets

Les messages provenant de la couche supérieure sont découpés en fragments appelés **paquets**, puis sont envoyés sur le réseau à commutation de paquets.

Chaque noeud recevant un paquet l'enregistre puis le réémet (store-and-forward) sur la voie adéquate.

Chaque paquet est acheminé dans le réseau indépendamment du précédent.



Caractéristiques générales :

- ☺ Les circuits sont partagés, les paquets sont multiplexés par les noeuds
- ☺ Si un lien interneud est occupé, le paquet est mémorisé jusqu'à ce qu'un lien se libère. Une fois le transfert réalisé, le lien est libéré
- ☹ Mais la mémorisation des paquets sur les commutateurs/routeurs requiert de la mémoire et engendre un ralentissement du temps de transfert
- ☺ la charge du réseau peut être répartie
- ☺ les mécanismes réseaux sont allégés (contrôle de flux et reprise sur erreur impossibles ☹)
- ☹ non respect du séquençement des paquets, problème du réassemblage
- ☹ pas de réservation de bande passante possible
- ☹ non adaptée aux applications temps réel

Ce mode de commutation est utilisé dans les réseaux Ethernet.

Réseaux à commutation de paquets : mode connecté

Afin de combiner les avantages des deux types de commutation, on a imaginé un système qui dans un réseau à commutation de paquets assure le séquençement des paquets : la **commutation de paquets en mode connecté**.

Dans ce mode, une route (appelée circuit) entre la source et la destination est déterminée à la connexion :

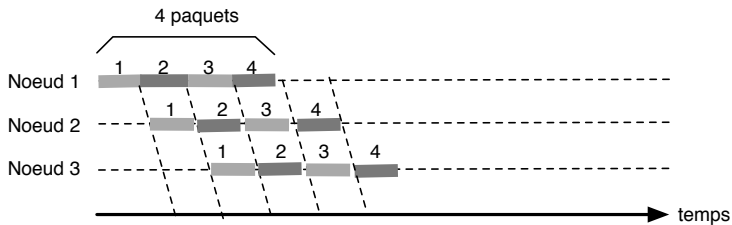
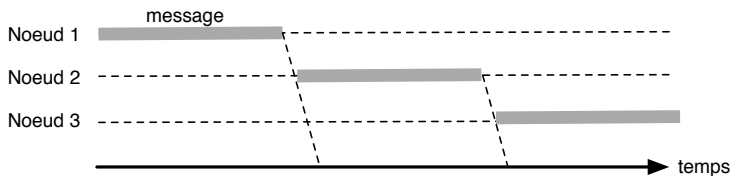
- ☺ tous les paquets d'une source vers une destination suivent la même route et arrivent dans l'ordre
- ☺ possibilité de réservation de bande passante
- ☺ contrôle de flux et reprise sur erreur possibles
- ☹ non résistant à la défaillance
- ☹ gestion des ressources non optimale

Ce mode de commutation est utilisé dans les réseaux X25, FR et ATM.

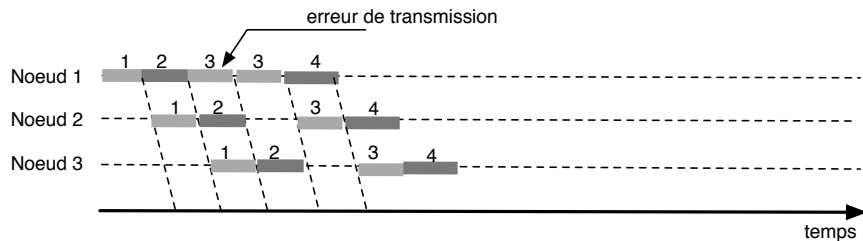
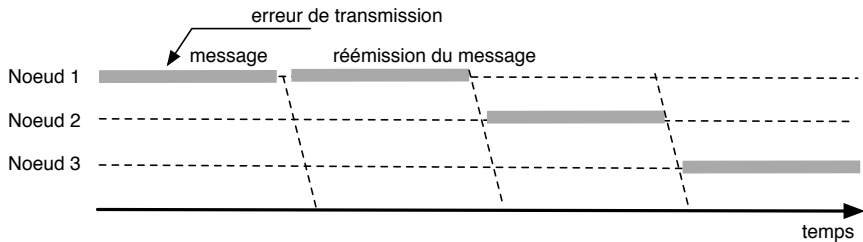
Comparatif des modes connecté et non connecté

Critères	mode connecté	mode non connecté
Mise en relation	oui	non
Délai de connexion	non négligeable	non
Type de circuit	permanent	aucun
Allocation de ressources	à la connexion	non
Contrôle de flux	possible	impossible
Séquencement des paquets	garanti	non
Reprise sur erreur	oui	non
Optimisation réseau	non	lors du routage
Résistance à la défaillance	non	oui
Adressage	simple, label attribué à la connexion	chaque paquet contient l'adresse complète de la source et la destination

Influence de la taille des paquets



Influence de la taille des paquets – avec erreur



Influence de la taille des paquets

Soit

- ▶ L : longueur du message à envoyer (en bits)
- ▶ p : nb de paquets (le message est coupé en p paquet)
- ▶ N : nb de commutations nécessaires pour atteindre le destinataire
- ▶ t_p : temps de transmission d'un paquet
- ▶ H : données protocolaires à rajouter à chaque paquet

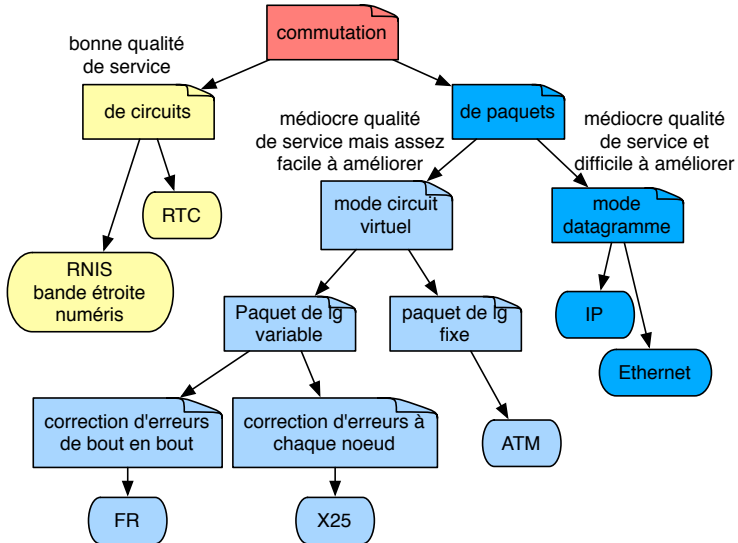
Alors, le temps de transfert total du message (i.e. des L bits) est

$$T_p = (L + pH)/D \cdot (1 + N/p)$$

Commentaires :

- ▶ plus N est petit est plus T_p est petit
 - ➡ il est important de rechercher les routes possédant le moins de noeuds
- ▶ la taille de l'entête du service réseau influe sur les performances
 - ➡ pour $L = 1500$, $p = 100$ et $n = 5$: ATM ($H = 5$) est presque 2 fois plus rapide que IPv4 ($H = 20$) et 3 fois plus rapide que IPv6 ($H = 40$)

Vue globale des différentes techniques de commutation



Plan

- 1 Introduction
- 2 Techniques de commutation
- 3 Acheminement dans les réseaux à commutation de paquets**
- 4 Protocole de routage
- 5 Adressage et nommage
- 6 Gestion des ressources

L'acheminement dans les réseaux à commutation de paquets

Dans un réseau, **acheminer** les informations signifie assurer le transport des unités de données de leur point d'entrée vers un point de sortie du réseau désigné par son adresse.

Ce processus nécessite l'élaboration de techniques permettant de décider de l'itinéraire à suivre. L'ensemble de ces techniques constitue le **routage**.

En pratique, chaque noeud recevant un paquet va décider localement vers quel noeud suivant le paquet sera transféré. Ainsi, de proche en proche, le transfert du paquet sera assuré de la source jusqu'au destinataire.

Informations nécessaires à chaque noeud pour prendre la “bonne” décision :

- ▶ chaque paquet doit contenir une information précisant son destinataire
- ▶ une **table d'acheminement** enregistrée sur le noeud, construite à partir d'un **algorithme de routage**. La table d'acheminement explicite pour chaque destinataire comment l'atteindre et avec quel coût. Cette table est donc généralement constituée de trois champs :

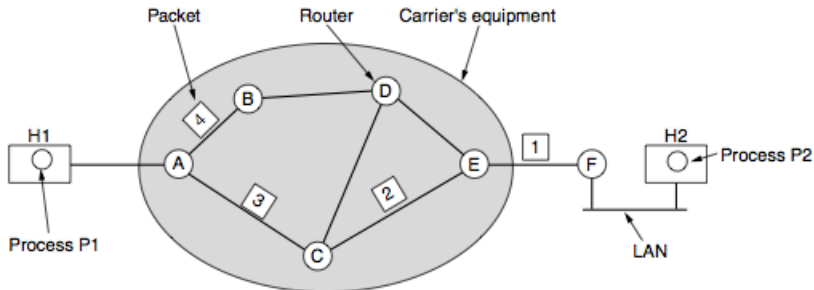
<destination, noeud suivant, coût>

Routage et commutation

On parle de **routage** lorsque la décision d'acheminement est prise en fonction de l'adresse destination (mode sans connexion ou paquets d'établissement du circuit virtuel dans le mode connecté). Dans ce cas :

- ▶ les paquets contiennent une adresse destination
- ▶ les noeuds sont alors des **routeurs**,
- ▶ la table d'acheminement est une **table de routage**,
- ▶ la décision d'acheminement est prise par chaque routeur et pour chaque datagramme.

Routage et commutation



A's table

	initially	later
A	-	-
B	B	B
C	C	C
D	B	B
E	C	B
F	C	B

C's table

A	A
B	A
C	-
D	D
E	E
F	E

E's table

A	C
B	D
C	C
D	D
E	-
F	F

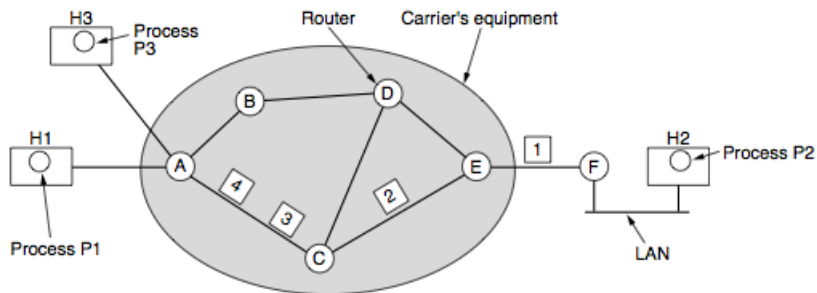
Dest. Line

Routage et commutation

On parle de **commutation** lorsque l'adresse destination n'intervient pas dans la décision d'acheminement (mode connecté après l'établissement du circuit virtuel). Dans ce cas :

- ▶ un circuit (une suite de noeuds intermédiaires) est établi entre la source et le destinataire
- ▶ les paquets contiennent une étiquette (identifiant) de circuit
- ▶ les noeuds sont considérés comme des **commutateurs**,
- ▶ la table d'acheminement est une **table de commutation** construite par une opération de routage. Elle contient un identifiant de flux et la voie à prendre.
- ▶ un circuit ayant préalablement été choisi, un commutateur ne fait que transmettre le paquet au commutateur suivant le long du circuit

Routing et commutation



A's table		C's table		E's table	
H1	1	C	1	C	1
H3	1	C	2	F	1
In		Out			

Routage – cas particulier du mode connecté

Dans le cas de la commutation par paquets en mode connecté, un route doit être choisie avant de commencer l'échange.

Cette route est choisie par une opération de routage, en fonction du niveau de qualité de service requis par la connexion demandée.

La façon de choisir une route dépend directement du **mode de signalisation** :

- ▶ si la signalisation se fait **dans la bande**, alors la demande d'établissement de route est transportée comme une unité de données normale. Par conséquent, le processus de signalisation entre en concurrence avec le processus de commutation, d'où une perte de performances.
- ▶ si la signalisation se fait **par canal sémaphore**, alors la demande d'établissement de route utilise un "réseau différent" dédié à l'établissement des routes. Les informations de signalisation y transitant peuvent alors être très riches. Les performances du réseaux de données ne sont jamais altérées.

Politiques d'acheminement

Il existe trois politiques d'acheminement, indépendamment du processus de construction des tables d'acheminement :

- ▶ **déterministe.** A chaque couple (source, destination) correspond une seule route. La gestion des tables de routage est simple, centralisée ou non.
- ▶ **adaptatif.** Le chemin évolue en fonction de l'état courant du réseau (charge, noeud en panne, ...). La gestion des tables de routage est généralement distribuée : chaque noeud assure la mise à jour de sa table de routage.
- ▶ **mixte.** Lorsqu'une connexion est demandée entre une source et un destinataire, un chemin est fixé pour toute la durée de la connexion en fonction de l'état courant du réseau. C'est la technique utilisée en mode orienté connexion.

- 1 Introduction
- 2 Techniques de commutation
- 3 Acheminement dans les réseaux à commutation de paquets
- 4 Protocole de routage
- 5 Adressage et nommage
- 6 Gestion des ressources

Le concept de routage

L'opération de routage, ou **routage** plus simplement, consiste à calculer les tables d'acheminement utilisées par les noeuds pour acheminer les paquets dans le réseau.

Les règles utilisées par les routeurs et le types d'informations échangées par les routeurs pour l'établissement des tables constituent le protocole de routage.

Pour construire les tables d'acheminement, l'opération de routage peut prendre en compte :

- ▶ la topologie du réseau
- ▶ d'autres paramètres caractérisant le coût.

Le choix d'un chemin se fera donc le plus souvent sur un critère de coût minimal.

Le problème majeur du routage est celui de la prise en compte des modifications de l'état du réseau dues à des pannes, un trafic élevé, la mobilité des processus (pour des réseaux wifi ou ad-hoc), ...

Différents types de routage

Il existe deux grandes classes de routage :

- ▶ **non dynamique ou statique.** Les tables de routage sont configurées de façon définitive dans chaque noeud par l'administrateur réseaux. La mise en oeuvre est simple et le séquençement des paquets est garanti.
- ▶ **dynamique.** Les tables de routage évoluent en fonction de l'état courant du réseau (topologie, charge, noeud en panne, ...). La gestion des tables de routage est généralement distribuée : chaque noeud assure la mise à jour de sa table de routage.

Routage du plus court chemin

Chaque table est construite une fois pour toute en utilisant des algorithmes de calcul de plus court chemin entre deux noeuds d'un graphe pondéré représentant le réseau (Ex. algorithme de Dijkstra).

Avantages et inconvénients :

Routage du plus court chemin

Chaque table est construite une fois pour toute en utilisant des algorithmes de calcul de plus court chemin entre deux noeuds d'un graphe pondéré représentant le réseau (Ex. algorithme de Dijkstra).

Avantages et inconvénients :

- ☺ facile à mettre en oeuvre
- ☺ le séquençement des paquets est garanti
- ☹ non optimal
- ☹ pas de gestion de pannes.

Routage par inondation

Chaque noeud envoie le message reçu sur toutes ses lignes sauf celle d'où provient le message.

Avantages et inconvénients :

Routage par inondation

Chaque noeud envoie le message reçu sur toutes ses lignes sauf celle d'où provient le message.

Avantages et inconvénients :

- 😊 système très robuste
- 😊 le chemin le plus court est toujours trouvé
- 😞 des mécanismes doivent être mis en oeuvre pour éviter le surcharge du réseau et le bouclage.

Routage adaptatif

Les tables de routage vont être modifiées dynamiquement pour s'adapter aux changements du trafic ou de la topologie du réseau. Plusieurs variantes selon :

- ▶ le type de métrique utilisée pour l'optimisation (nombre de saut, bande passante, ...)
- ▶ la façon dont les noeuds obtiennent les informations sur le réseau lorsque les routes subissent des variations (localement de la part des routeurs voisins, ou de la part de tous les routeurs).

Avantages et inconvénients :

Routage adaptatif

Les tables de routage vont être modifiées dynamiquement pour s'adapter aux changements du trafic ou de la topologie du réseau. Plusieurs variantes selon :

- ▶ le type de métrique utilisée pour l'optimisation (nombre de saut, bande passante, ...)
- ▶ la façon dont les noeuds obtiennent les informations sur le réseau lorsque les routes subissent des variations (localement de la part des routeurs voisins, ou de la part de tous les routeurs).

Avantages et inconvénients :

- ☺ chemin toujours optimal
- ☺ système robuste
- ☹ pas de garantie du séquençement des paquets
- ☹ consommation de la bande passante au détriment des données
- ☹ mécanismes à mettre en oeuvre pour assurer la cohérence des données
- ☹ mécanismes à mettre en oeuvre pour gérer les problèmes liés à la convergence de ce type d'algorithmes

Routage adaptatif par vecteur distance

Aussi appelé routage de Bellman-Ford. Cet algo était utilisé dans ARPAnet et dans le protocole RIP (Routing Information Protocol) sur l'internet.

Principe. Chaque routeur doit :

1. maintenir un vecteur de distance indiquant la meilleure distance pour atteindre chaque routeur et la ligne de sortie correspondante.
2. mettre à jour ce vecteur en fonction des informations reçues de ses voisins.
3. envoyer périodiquement à tous ses voisins son vecteur distance

Remarque : chaque routeur doit connaître ses voisins et le coût pour les atteindre.

Attention au problème de convergence.

Routage adaptatif par information d'état des liens

C'est l'algorithme employé de nos jours. Il permet de pallier le problème de la lenteur de la convergence de l'algorithme à vecteur distance.

Principe. Chaque routeur A doit :

1. découvrir les routeurs voisins
2. calculer le délai d'acheminement pour atteindre chaque voisin
3. construire un paquet contenant, pour chaque voisin X de A , le coût pour le lien AX , puis envoyer ce paquet à tous les routeurs
4. calculer le plus court chemin vers chaque routeur (Dijkstra) en utilisant une matrice de coût élaborée grâce aux paquets reçus des autres routeurs.

Routage hiérarchie

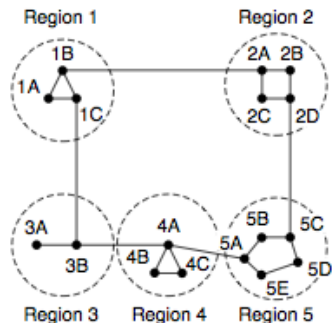
Le routage à vecteur distance ou à état de lien nécessite la diffusion d'informations pour pouvoir maintenir les tables de routage.

➡ Consommation de bande passante, de mémoire et de temps de calcul CPU pour établir les tables.

Il est alors nécessaire de regrouper les routeurs du réseau en région, appelée **AS, Autonomus System**. Chaque routeur sait comment aiguiller les messages dans sa région, en utilisant un des protocoles vu précédemment. Ce protocole interne à la région est appelé **IGP, Interior Gateway Protocol**.

Dans chaque région, certains routeurs appelés **routeurs de bordure** devront aussi gérer l'interconnexion des régions, en routant les messages entre les régions. Ce deuxième niveau de routage, entre routeurs de bordure, est appelé **EGP, External Gateway Protocol**.

Routage hiérarchie



(a)

Full table for 1A

Dest.	Line	Hops
1A	—	—
1B	1B	1
1C	1C	1
2A	1B	2
2B	1B	3
2C	1B	3
2D	1B	4
3A	1C	3
3B	1C	2
4A	1C	3
4B	1C	4
4C	1C	4
5A	1C	4
5B	1C	5
5C	1B	5
5D	1C	6
5E	1C	5

(b)

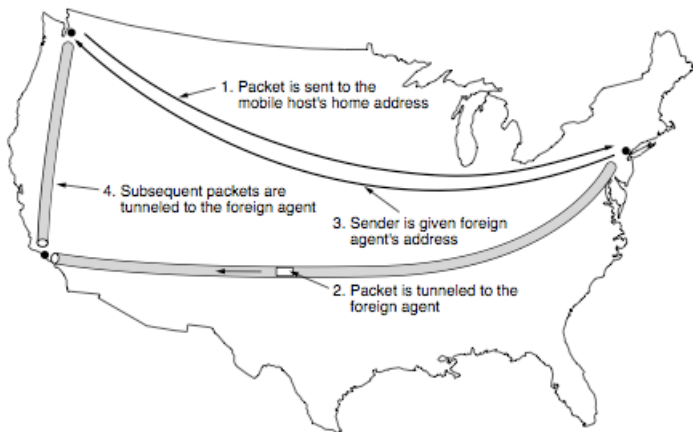
Hierarchical table for 1A

Dest.	Line	Hops
1A	—	—
1B	1B	1
1C	1C	1
2	1B	2
3	1C	2
4	1C	3
5	1C	4

(c)

Routage pour les hôtes mobiles

Principe. Utilisation d'agents de domiciliation et d'agents extérieurs



Principaux protocoles de routage sur l'Internet

- ▶ RIP (Routing Information Protocol, RFC 1058, RFC 1723) : De type vecteur distance, premier protocole de routage interne d'Internet.
- ▶ OSPF (Open Short Path First, RFC 2178) : Remplaçant de RIP. De type état des liens.
- ▶ IS-IS (Intermediate System to Intermediate System, ISO 10586) : Routage à état des liens.
- ▶ IGPR (Interior Gateway Routing Protocol, Cisco) : du type vecteur distance.
- ▶ EGP (Exterior Gateway Protocol, RFC 827) : premier protocole de routage externe d'Internet.

- 1 Introduction
- 2 Techniques de commutation
- 3 Acheminement dans les réseaux à commutation de paquets
- 4 Protocole de routage
- 5 Adressage et nommage**
- 6 Gestion des ressources

Deux types d'adressage

Adressage à plat.

L'adresse est seulement un identifiant machine sans signification particulière.

Par exemple : adresse MAC

Adressage hiérarchique.

- ▶ Permet de localiser sans ambiguïté un utilisateur final dans un réseau hiérarchique
- ▶ L'adresse est décomposée en plusieurs parties, chacune correspondant à un niveau du routage hiérarchique. Son contenu est donc significatif puisqu'il désigne un niveau de routage, le réseau logique de ce niveau et les noeuds de ce réseau participant à l'acheminement du message.
- ▶ Le champs d'adresse diminue au fur et à mesure de la progression du message dans le réseau

Techniques d'adressage

L'adressage dépend en partie de l'architecture réseau et du service attendu.

- ▶ Pas de champs d'adresse : seules deux entités peuvent communiquer
- ▶ Adresse destinataire seule : pour des architectures maître/esclave
- ▶ Adresse source seule : pour des messages de diffusion, broadcast
- ▶ Adresse source/destination : cas le plus fréquent
- ▶ Adressage par label : l'adresse est remplacée par une étiquette représentant la voie logique entre la source et le destinataire. La convention d'étiquetage est établie en amont, durant une phase de signalisation.

Nommage et annuaire

Le **nommage** est une technique complémentaire de l'adressage. Avantages :

- ▶ dissocie l'objet de sa localisation géographique
- ▶ plus simple à manipuler pour l'utilisateur
- ▶ permet de désigner un hôte mobile

Deux types de représentation :

- ▶ le nommage à plat (attention à l'unicité des noms)
- ▶ le nommage hiérarchique : le nommage est organisé en domaines. Convient très bien à la gestion d'annuaires importants comme celui d'internet.

L'**annuaire** permet de localiser un objet nommé. Il met en relation son nom avec son adresse. Deux façons de réaliser cette association :

- ▶ par consultation d'un fichier local
- ▶ par consultation d'une base de données centralisée ou répartie (le nommage est alors décentralisé)

Plan

- 1 Introduction
- 2 Techniques de commutation
- 3 Acheminement dans les réseaux à commutation de paquets
- 4 Protocole de routage
- 5 Adressage et nommage
- 6 Gestion des ressources

Adaptation de la taille des unités de données

Internet est un réseau de réseaux. Chaque réseau impose une taille maximale aux paquets qu'il achemine à cause

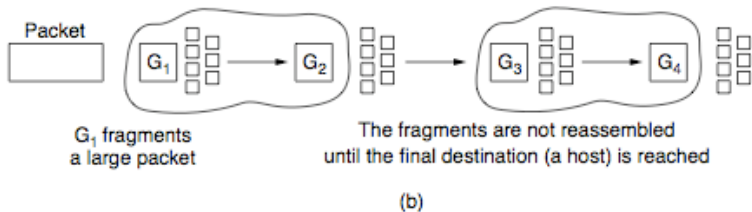
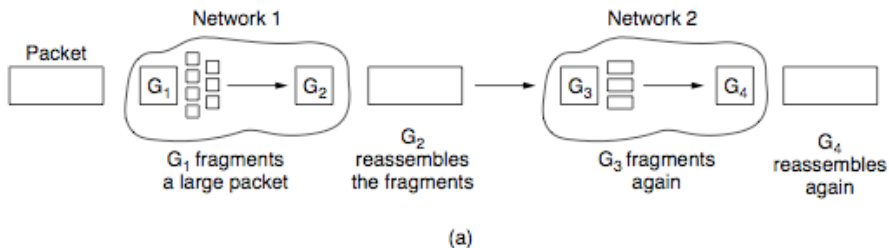
- ▶ du matériel,
- ▶ du SE,
- ▶ des protocoles utilisés,
- ▶ des normes à respecter,

ou pour limiter

- ▶ les erreurs de transmission et les retransmissions
- ▶ l'utilisation du canal par un paquet.

➡ il faut parfois **fragmenter** et **reassembler** les paquets

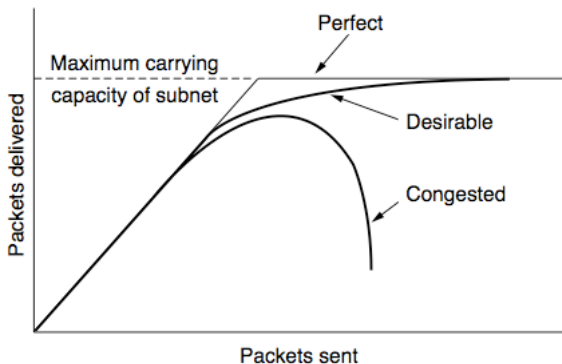
Adaptation de la taille des unités de données



fragmentation transparente (a) et non transparente (b)

Congestion - définition

Lorsque trop de paquets circulent sur le réseau (ou une portion de ce réseau) les performances peuvent se dégrader : c'est une **congestion**.



Congestion – causes

Facteurs pouvant provoquer une congestion :

- ▶ flux entrant dans un routeur trop important
- ▶ processeurs trop lents
- ▶ débits des lignes trop faibles

Tous ces problèmes génèrent un dépassement de mémoire dans les routeurs

Choix de la quantité de mémoire dans les routeurs :

- ▶ trop de paquets sont perdus si la mémoire est insuffisante
- ▶ trop de paquets expirent si la mémoire est trop grande

Dans les deux cas, il faut réémettre des paquets

➡ effondrement des performances et congestion

Congestion – solutions

Deux solutions selon que le problème est traité en prévention ou non.

Mécanisme de prévention de la congestion : il faut faire les bon choix

- ▶ au niveau 2 : contrôle de flux (stratégie d'acquittement, temporisateur, ...)
- ▶ au niveau 3 : contrôle d'admission (si CV), ordonnancement, routage, ...
- ▶ au niveau 4 : idem qu'au niveau 2 mais plus difficile

La résolution ou la guérison de la congestion :

1. Surveiller le système pour détecter quand et où la congestion se produit
2. Transmettre l'information aux entités pouvant agir (client, routeur, FAI)
3. Corriger le problème
 - ▶ avertir les machines qui en sont à l'origine
 - ▶ router les paquets pour éviter la zone encombrée
 - ▶ éliminer des paquets à l'entrée du réseau

Notions de qualité de service (QoS)

Le multimédia nécessite de garantir une certaine QoS dans les réseaux.

Application	Reliability	Delay	Jitter	Bandwidth
E-mail	High	Low	Low	Low
File transfer	High	Low	Low	Medium
Web access	High	Medium	Low	Medium
Remote login	High	Medium	Medium	Low
Audio on demand	Low	Low	High	Medium
Video on demand	Low	Low	High	High
Telephony	Low	High	High	Low
Videoconferencing	Low	High	High	High

Quelques mécanismes mis en place pour garantir la QoS :

- ▶ réservation en excès : méthode très coûteuse
- ▶ mise en tampon chez le destinataire : réduction de la gigue
- ▶ canalisation du trafic côté serveur
- ▶ réservation de ressources à la création d'un CV
- ▶ contrôle d'admission

Les trois derniers points nécessitent un contrat entre le client et le serveur ou entre le client et l'opérateur/FAI.