Niveau Réseau
"Network Layer"

Généralités: problèmes de routage et de commutation.

Protocole IP ("Internet Protocol")

Niveau Réseau
"Network Layer"

Généralités problèmes de routage et de commutation

Introduction

Adressage

Routage/Commutation

Contrôle de congestion

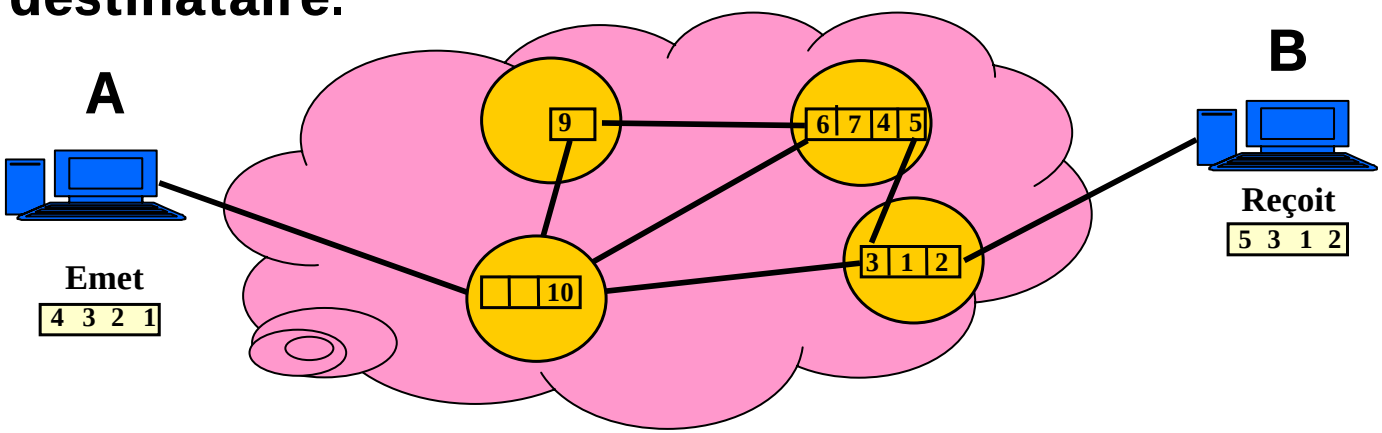
Problèmes généraux de réalisation du niveau réseau

Introduction

Choix de conception.
Réseaux à datagrammes.
Réseaux à circuits virtuels.

Réseaux à datagrammes

- **Modèle analogue à celui de la poste**
  - **Les datagrammes sont des paquets routés indépendamment** les uns des autres**.**
  - **Chaque datagramme comporte dans son entête l'adresse du destinataire.**



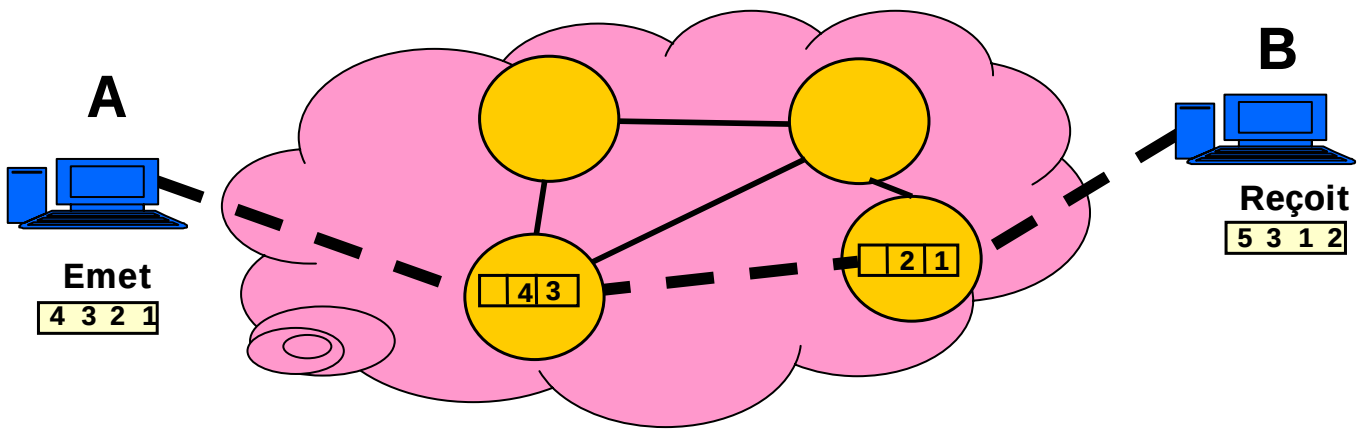
- **Choix coûteux du point de vue du routage**
  - Chaque datagramme subit un routage**.**
- **Choix permettant plus d'optimisation**
  - On peut tenir compte d'informations récentes pour réaliser le routage

Options des réseaux à datagrammes

- **Solutions des problèmes d'adressage et de routage.**
- **Difficultés pour la livraison en séquence**:
  - Non respect de l'ordre local d'émission du site A lors de la délivrance en B
  - Les messages ne se suivent pas.
- **Difficultés pour le contrôle de flux** d'hôte à hôte
  - Difficulté de rétroaction du destinataire sur l'émetteur.
- **Pas de contrôle d'erreurs**
  - Possible mais non retenu.
- **Gestion des ressources**
  - Optimisation globale favorisée par le traitement sur chaque datagramme.
  - Difficulté pour satisfaire des contraintes de QOS spécifiques de chaque usager
    - Difficulté pour la réservation des tampons, de la bande passante.
    - Traitement des problèmes de congestion.
- **Les problèmes non résolus sont reportés au niveau transport.**
- **Exemple : IP Internet Protocol**
  - **Le dernier des protocoles à datagrammes mais le plus important.**
  - **Autres exemples historiques : Cyclades, Decnet ...**

Réseaux à circuits virtuels

- **Modèle analogue à celui du téléphone**
  - **Circuit virtuel** = **chemin fixe** établi entre deux hôtes.
  - **Le chemin est initialisé au préalable:**
    - Exemple "**paquet d'appel**" routé de l'émetteur au destinataire.
  - **Les données empruntent ensuite toujours ce chemin**
    - S'il y a une panne => il faut reconstruire le circuit virtuel.
  - **Simplification des opérations de commutation.**



Réseaux à circuits virtuels à bas débits

- **Un ensemble d'options assez complètes** pour une couche réseau consistante: **Exemple X25 niveau paquet**
- **Fonctions d'adressage et de routage.**
- **Gestion des connexions.**
- **Livraison en séquence** (d'hôte à hôte)
  - Respect de l'ordre local d'émission du site A lors de la délivrance en B
  - Les paquets se suivent sur le circuit virtuel.
- **Contrôle de flux** (d'hôte à hôte)
  - Par rétroaction sur le circuit virtuel.
- **Allocation préalable de ressources** sur un circuit virtuel.
  - Assure la fourniture d'une qualité de service donnée.

Réseaux à circuits virtuels à haut débit

- **Relais de trames FR, "Frame Relay"**
  - **Un allégement des choix X25** (réseaux publics de transmission de données) afin de permettre la commutation efficace de trafics de plus hauts débits.
- **ATM "Asynchronous Transfer Mode**
  - Réseau numérique à intégration de service large bande.
  - Transmission de données multimédia image, voix, données => Satisfaction des contraintes de qualité de service pour ces trois types de données.
- **MPLS "Multi Protocol Label Switching"**
  - Mêmes objectifs que ATM avec des améliorations et **en s'intégrant mieux à IP**.

Choix techniques des réseaux à circuits virtuels hauts débits

- **Adressage et routage**
- **Communication en mode connecté**
- **Livraison en séquence**
  - Paquets à la suite selon un circuit virtuel.
- **Sans contrôle d'erreur**
  - Haut débit : taux d'erreur faible.
  - Contrôle d'erreur par retransmission inadéquat pour le multimédia.
- **Sans contrôle de flux**
  - Inutile pour les trafics isochrones (sons, images).
- **Protocoles supplémentaires** d'adaptation spécifique du type de données échangées.
- **Garantie de qualité de service** (mode circuit virtuel).

Relations entre mode avec ou sans connexion et mode datagramme ou CV

Rappel

- **Mode connecté :** Les échanges ne peuvent avoir lieu qu'entre deux événements ouverture et fermeture.
- **Mode non Connecté :** Les échanges dans une peuvent prendre place à tout moment.
- **Mode datagramme :** Pas de chemin fixe.
- **Mode Circuit virtuel :** Même chemin fixe.

Associations entre modes de fonctionnement

Association entre réseaux à circuits virtuels et communications en connexions

- Désignation des connexions ou des circuits virtuels.
- Facilite la gestion des ressources et la qualité de service (QOS).
- Facilite la correction des erreurs de transmission.
- Facilite la livraison en séquence d'hôte à hôte.
- Facilite le contrôle de flux d'hôte à hôte.

Association entre mode datagrammes et communications sans connexions

- Difficultés pour la livraison en séquence d'hôte à hôte.
- Difficultés pour le contrôle de flux d'hôte à hôte.
- Difficultés pour la gestion des ressources et la qualité de service.

Différences entre modes de fonctionnement

- **A) Possibilité de construire un protocole en mode connecté sur un réseau à datagrammes** (puisqu'on peut communiquer).
- **B) Utilisation dans un réseau à circuits virtuels comme X25 du routage du paquet d'appel** pour transmettre des datagrammes (option "fast select").

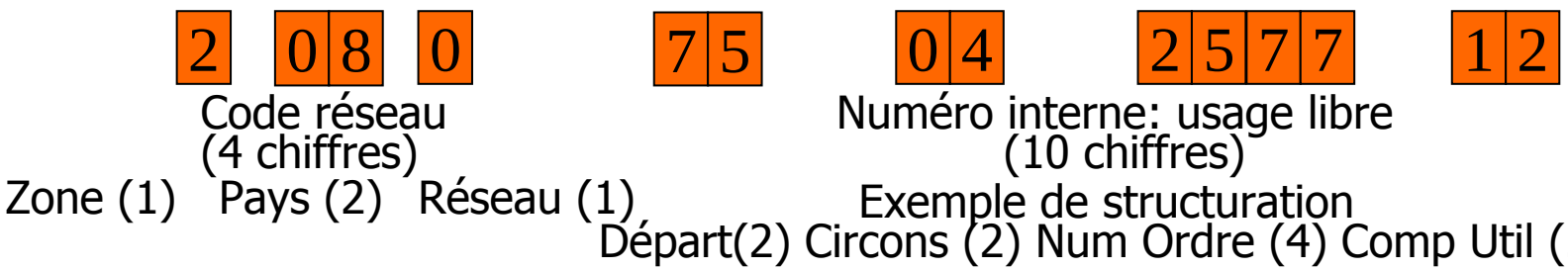
- **Conclusion : Il est tout à fait impropre d'utiliser les équivalences**
  - **Datagramme = Mode non connecté.**
  - **Circuit virtuel = Mode connecté.**

Problèmes généraux de réalisation du niveau réseau

Adressage

Adressage/Nommage/Désignation : Position du problème (1)

- **Addressing, Naming** : L'ensemble des techniques associées aux adresses et aux noms (ici au niveau 3 réseau).
- **1) Politique de structuration** des différentes zones.
  - Comment est organisée la structure de données nom ou adresse.
  - Exemple : les adresses X121 des réseaux publics de transmission de données (type TRANSPAC).



- **2) Définition des autorités administratives** compétentes dans l'attribution des différents champs des noms et adresses.
  - Exemples d'autorités : Organismes internationaux, Opérateurs de télécoms, fournisseurs d'accès réseaux, sociétés délégataires.
  - Ex adresses IP : ISOC -> IANA -> RIPE -> Opérateur -> Entreprise.

Adressage/Nommage/Désignation : Position du problème (2)

- **3) Politique de stockage et d'accès** aux différents moyens de désignation : adresses ou noms.
  - Utilisation dans les annuaires : exemple DNS
  - Utilisation dans les tables de routage (tous les protocoles).
- **4) Politique d'utilisation des adresses dans le cadre des opérations de routage**.
  - **Cas des datagrammes.** Dans chaque paquet figurent:
    - L'adresse de l'émetteur
    - L'adresse du destinataire.
  - **Cas des circuits virtuels.**
    - Dans le paquet appel figurent les adresses émetteur et destinataire.
    - Dans chaque paquet figure ensuite l'identifiant du circuit virtuel.

Définitions relatives aux noms et adresses

- **Nom / Adresse**
  - **Nommer**: Identifier de façon unique.
  - **Adresser**: Identifier de façon à retrouver dans un réseau.
- **Nom / Adresse physique ou logique**
  - **Physique:** Identification associée à des aspects matériels invariants (numéro de série, adresse unique MAC) => Plutôt une adresse.
  - **Logique:** Identification selon une chaîne de caractères quelconque => Plutôt un nom.
- **Nom / Adresse fixe ou mobile**
  - **Fixe**: qui ne peut suivre le déplacement de l'appareil connecté Exemple: numéro de téléphone attaché à un autocommutateur).
  - **Mobile**: qui permet de retrouver un destinataire indépendamment de la localisation géographique. Exemple : numéro de téléphone portable localisable dans une cellule du réseau.

Adressage global / Adressage local

- **Pour aller à un endroit on peut :**
  - Donner l'adresse de l'endroit => **Notion d'adresse "globale"**

    Exemple : Mr X, appartement y, z rue de **.....**
  - Définir le chemin à emprunter => **Notion d'adresse "locale"**

    Exemple : Tourner à gauche puis 2 ième à droite **....**
- **Adressage global**
  - Un identifiant unique du site destinataire acheminé dans chaque message pour déterminer son routage et sa délivrance.
  - Exemple: adresse IP, adresse ATM.
- **Adressage local**
  - Un chemin défini par la suite des décisions à prendre lors de la traversée de chaque commutateur.
  - Exemple: identification des circuits virtuels en X25, ATM , MPLS **....**

Structuration des adresses globales : Adressage plat

- **Définition :** Les adresses sont définies dans une zone de n bits sans règles de structuration particulière permettant la localisation.
- **Avantages**
  - Peu de problèmes d'administration.
  - Pas de perte de place : les adresses sont plus courtes

  => Minimisation de l'encombrement dans les messages.
- **Inconvénients**
  - N'offre pas de moyen lié à la structure des adresses pour retrouver un correspondant

  =>Inadapté aux grands réseaux.
- **Exemple :** Adresses de liaison de niveau MAC : IEEE 802.
- **Conclusion :** Utilisation dans les petits réseaux.

Structuration des adresses globales : Adressage hiérarchique

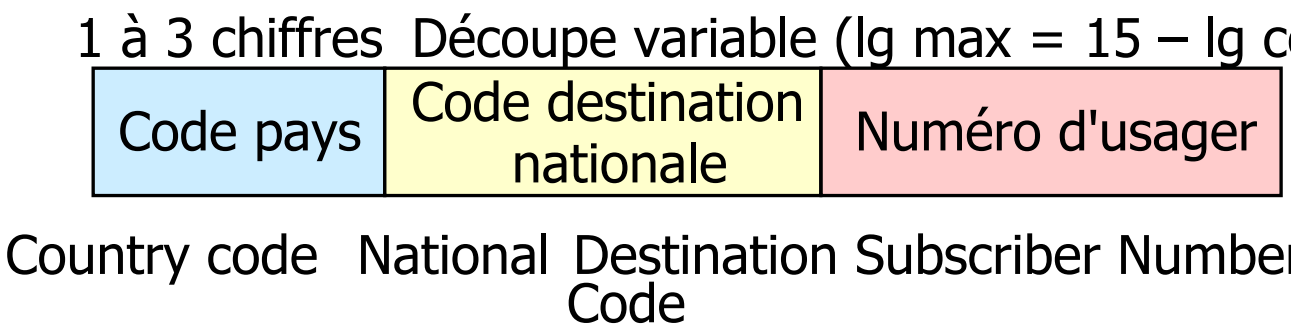
- **Définition :** les adresses sont définies avec des règles de structuration par champs qui correspondent à des regroupements géographiques/topologiques **:**
- **Exemple de découpage géographique :** pays, région, entreprise, réseau, sous/réseau ...
- **Notion de hiérarchisation** du routage/ agrégation de routes:
  - Atteindre un routeur dans le pays puis atteindre un routeur dans la région etc ….
- **Tous les systèmes d'adressage** de niveau 3 sont hiérarchiques.

Adressage hiérarchique : avantages, inconvénients

- **Avantages**
  - **Adapté aux grands réseaux** => Possibilité de gérer de grands espaces. L'administration des adresses peut se faire de façon locale à chaque unité de découpage.
  - **Adapté à la localisation**
    - Les adresses permettent de localiser le destinataire.
    - Au moyen d'un routage hiérarchisé.
- **Inconvénients**
  - **Encombrement** Le découpage opéré peut-être plus ou moins efficace dans chaque champ
    - =>généralement les adresses sont volumineuses.
    - grande perte de capacités d'adressage (gaspillage d'adresses).
  - **Changement de localisation difficile**
    - Un site qui change de localisation doit changer d'adresse.
    - Sauf mise en place un mécanisme de redirection.

Exemple d'adressage hiérarchique 1) Adressage E164

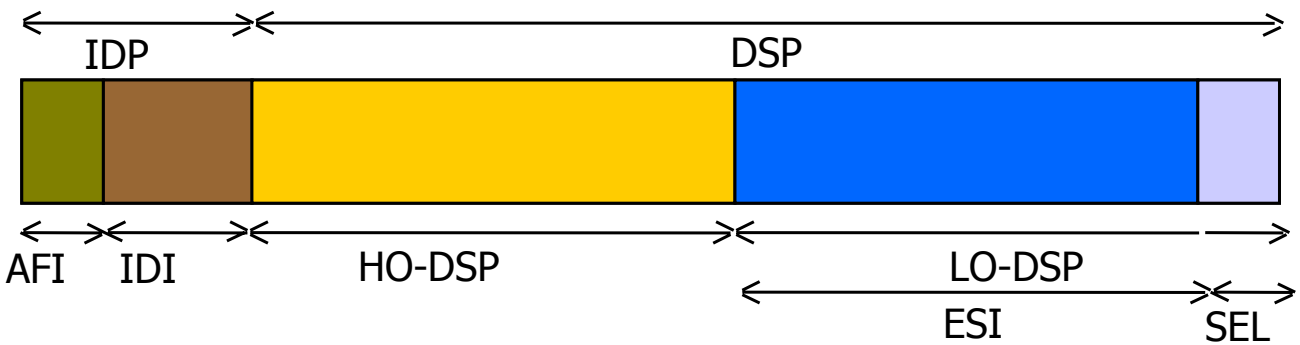
- **Utilisation :** Le plan de numérotation du téléphone classique. **RTC**: **R**éseau **T**éléphonique **C**ommuté ou **PSTN/POTS**: **P**ublic **S**witched **T**elephone **N**etwork ou **P**lain **O**ld **T**elephone **S**ystem
  - Mais aussi réseaux de téléphonie mobile, réseau RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Service), réseaux ATM publics ….
- **Structure :**
  - **Adresse basée sur un système de 15 chiffres décimaux** maximum codés en BCD (Binary Coded Decimal) deux chiffres par octets.
  - Forme générale d'une adresse téléphonique géographique.



  - Autres structures : Services, adresses résaux (code pays spécial).
  - Représentation en DNS: 2.4.2.4.5.5.5.1.e164.arpa (numéro 1-5554242).

Exemple d'adressage hiérarchique 2) Adressage normalisé OSI 8348

- **Utilisation :** réseaux ATM privés
- **Format variable en deux parties** pour des adresses de NSAP **("Network Service Access point")**
- **Taille maximum** : 20 octets.
- **Structure :**

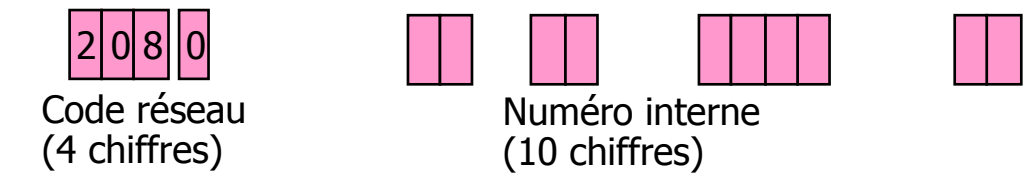


- **IDP "Initial Domain Part"** : Spécifie le format de l'adresse (AFI) puis l'autorité responsable de l'attribution de cette adresse (IDI).
- **DSP "Domain Specific Part"** : Spécifie plus particulièrement un site.

  Séparé en trois parties: "High Order Bits" (pour le routage), une partie identificateur de site ("End System Identifier) plus un sélecteur d'application (SEL) ("Low Order Bits").

Exemples d'adressage hiérarchique
Autres exemples

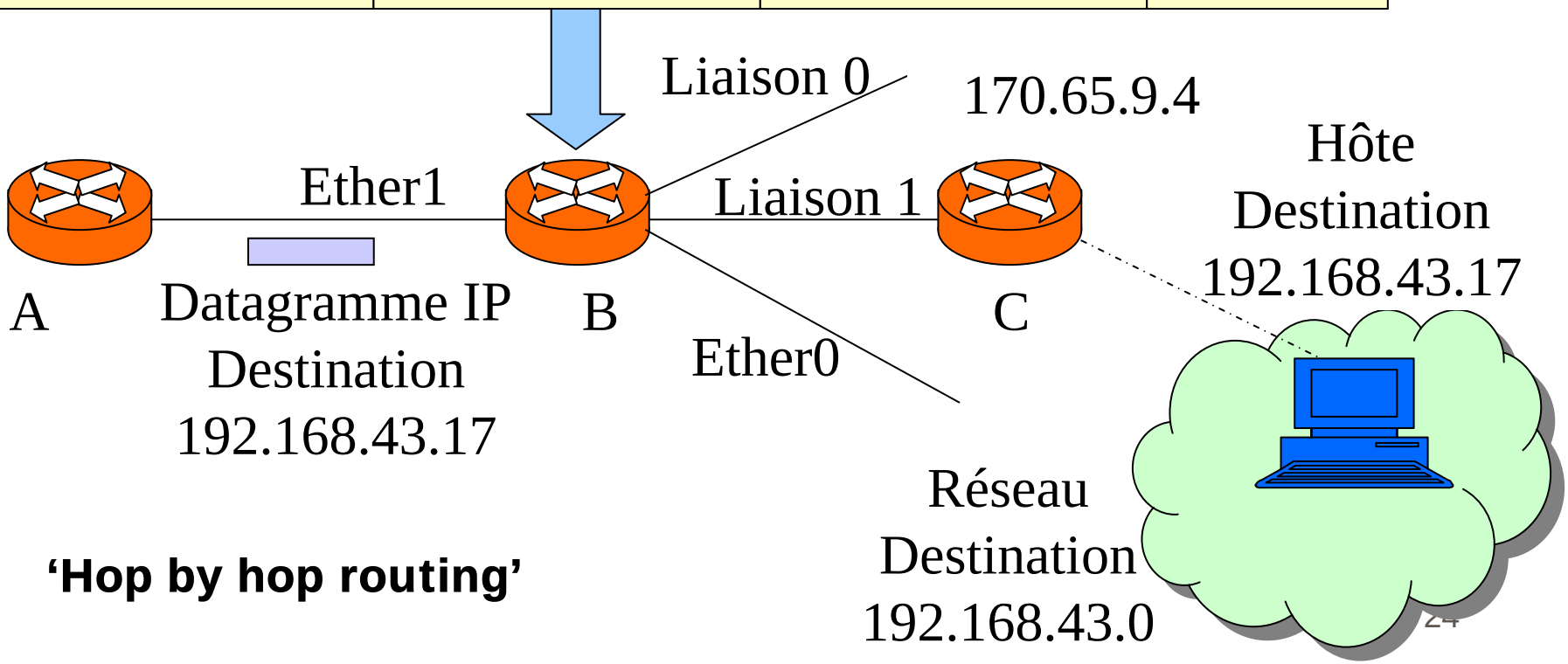
- **3) Adressage des réseaux publics X121**
  - Sur 14 chiffres décimaux (4 chiffres pour le réseau, 10 chiffres pour l'adresse hôte dans le réseau).
  - Pour un réseau différentes possibilités de structuration de la partie numéro interne.



- **4) Adressage IP (Internet niveau 3)**
  - **Deux normes d'adressage** correspondent aux deux versions successives majeures.
  - **IPV4** Adresse sur 32 bits.
  - **IPV6** Adresse sur 128 bits.
  - Traité en détail dans le cours IP.

Utilisation des adresses globales : routage saut par saut en IP

Préfixe Dest	Masque Dest	Prochain saut	Interface
192.168.43.0	/24	170.65.9.4	Liaison 1
…	…	…	…

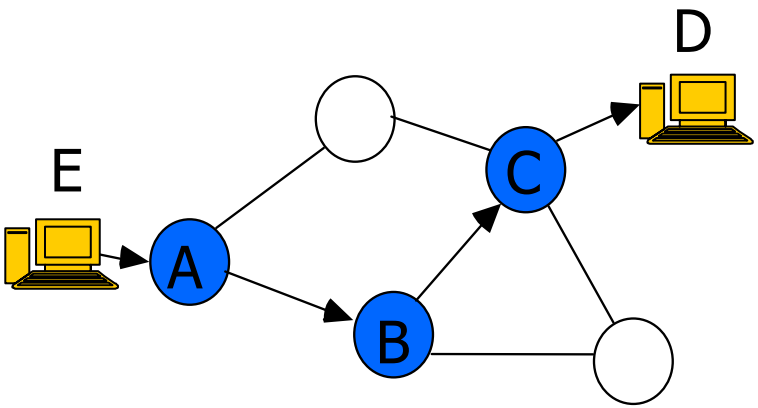


‘Hop by hop routing’

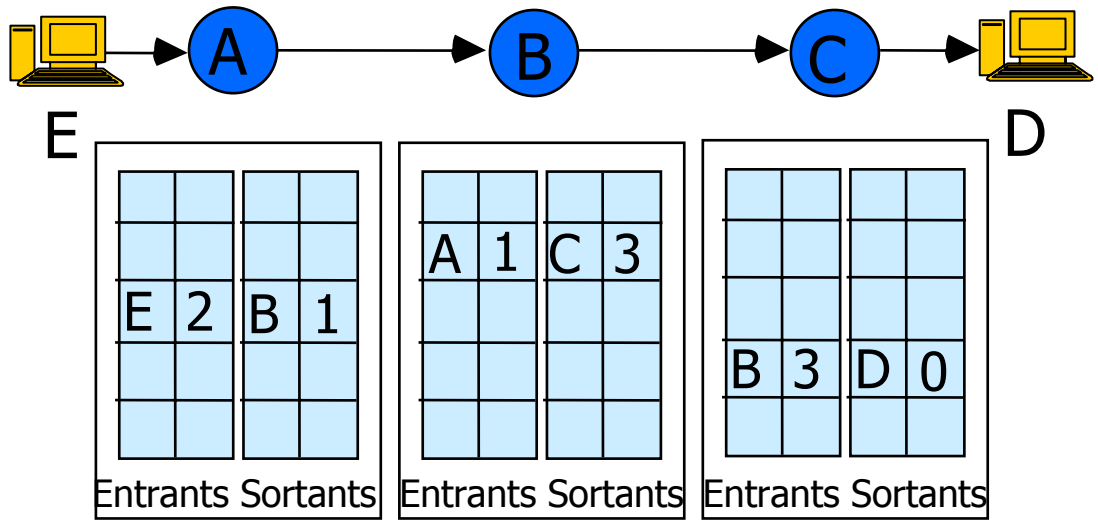
Adresses locales dans les réseaux à Circuits Virtuels (CV)

- **Problème d'identification d'un circuit virtuel.**
  - **Comment désigner un chemin** pour aller d'un point à un autre dans un réseau à circuits virtuels (CV) ?
- **Nom unique global de CV.**
  - **Par exemple :** adresse appelant, adresse appelé, numéro CV.
  - **Solution très encombrante** Exemple: 30 digits pour des adresses X121 plus un numéro de CV.
  - **N'apporte pas de solution particulière** pour le routage.
- **Nom contextuel local de CV.**
  - **Gestion locale** de noms de petite taille (par exemple 12 bits).
  - **Problèmes d'homonymie** : à l'ouverture d'un CV sur un site on lui attribue un numéro libre.
  - **Chaque commutateur traversé** doit pouvoir modifier le numéro du circuit virtuel en lui attribuant un nom unique libre localement.
  - **Dans chaque commutateur il faut une table de routage** : correspondance entre les circuits entrants et sortants.

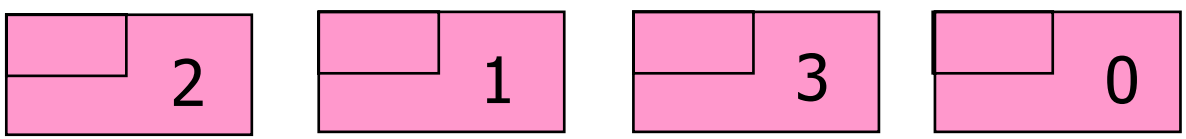
Fonctionnement de l'adressage local dans les circuits virtuels



Réseau avec un CV E A B C D



Tables des CV entrants et sortants en A B C
(tables de routage locales)



Évolution des entêtes de paquets (désignation du circuit virtuel)

Problèmes généraux de réalisation du niveau réseau

Commutation et routage

Introduction/généralités
Exemples de protocoles de routage

Introduction / généralités

Acception traditionnelle

- **Commutation ('switching')** : terminologie créée dans le contexte des réseaux téléphoniques.
  - **Opération de retransmission d'une information** d'un port entrée vers un port de sortie **réalisée plutôt par du matériel** spécialisé en mode circuit.
  - **Exemple:** la commutation de réseaux locaux, ATM.
- **Routage ('routing')** : terminologie créée dans le contexte des réseaux IP.
  - **Opération de retransmission d'information réalisée par un ordinateur** utilisant un logiciel, des tables de routage, une technique de stockage et retransmission.
  - **Exemple:** le routage IP.

Notions de commutation et de routage

- **Pour acheminer un paquet** : deux problèmes à résoudre.
  - **Problème A) Construire des routes** (des tables de routage dans les routeurs) pour aller d'un émetteur à un destinataire

    => Le travail réalisé par un protocole de routage (dynamique).
  - **Problème B) Réaliser effectivement l'acheminement** : acquérir un paquet, consulter son entête, consulter une table de routage, renvoyer le paquet dans la bonne direction.
- **Terminologie classique pour les problèmes A et B**
  - **Problème A)** Découverte des routes ('route discovery), annonce des routes ('route advertisment').
  - **Problème B)** Relayage ('forwarding'), commutation ('switching').
- **Spécialisation terminologique constatée.**
  - **Problème A) Routage ('routing')** : le problème de construction des routes (des tables de routage) par un protocole de routage.
  - **Problème B) Commutation ('switching')**: l'acheminement, le relayage d'un paquet par un commutateur.

Les trois idées principales pour réaliser le routage dans un réseau maillé

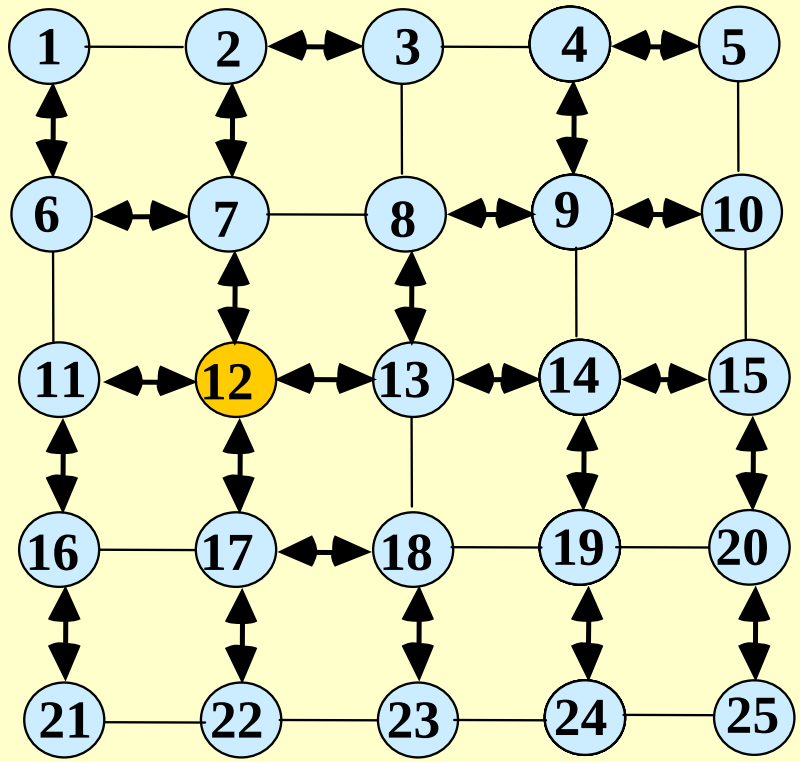
- **1) Routage utilisant la diffusion** (‘Broadcast routing’)
  - Tous les sites du réseau étant atteints, seuls les destinataires adressés dans le message délivrent le message => Besoin d’une diffusion
  - **Diffusion naturelle sur une voie commune** partagée (réseau local).
  - **Diffusion réalisée sur réseau maillé par inondation** (‘Flooding’).
    - Chaque nœud retransmet le paquet sur tous ses liens adjacents.
- **2) Routage défini par la source** (‘Source routing’)
  - La route est déterminée par l’émetteur et insérée dans le paquet.
  - Les routeurs successifs appliquent cette route pour acheminer le paquet.
- **3) Routage défini saut par saut** (‘Hop by hop routing’)
  - Chaque routeur doit connaître des routes vers tous les destinataires en échangeant des informations sur la topologie du réseau.
  - Chaque routeur applique une décision de routage vers un routeur voisin.

La gestion des tables de routage en mode saut par saut

- **Dans un routeur :** à partir d'une adresse destinataire **choisir la meilleure direction de sortie.**
  - Les noeuds mémorisent dans des tables de routage des informations du type: destinataire ; prochain site à atteindre (par quel port l'atteindre, quel contrôleur de voie physique à utiliser).
- **Utilisation du routage saut par saut**
  - **Dans le mode datagramme** -> pour chaque paquet.
  - **Dans le mode circuit virtuel** -> à l'établissement de chaque circuit virtuel (ou lors de sa reconstruction).
- **Routage saut par saut :** de très loin le plus employé au niveau 3.
  - Les autres solutions sont employées de façon marginale.

Routage saut par saut : Notion d'arbre couvrant (arbre de routage)

- Le **réseau de communication** est considéré comme un **graphe.**
- Chaque commutateur est considéré comme la **racine d'un arbre couvrant ('spanning tree').**
- **L'arbre définit les chemins** pour atteindre tous les hôtes du réseau.
- **Exemple d'un arbre couvrant** pour le noeud 12 dans un réseau de type grille.



- **Exemple de table de routage** pour le nœud 12

Destinataire	1	2	3	4	5	6	...
Adjacent Préféré	7	7	7	13	13	7	...

Arbre couvrant des plus courts chemins

- **Construction d'un arbre couvrant qui optimise un critère de coût.**
  => Notion d'arbre couvrant des plus courts chemins.

Différents critères de coûts (métriques, "metrics")

- **Longueur du chemin** : en nombre de commutateurs traversés.
- **Délai de traversée du chemin** : temps effectif d'acheminement (somme des délais d'attente dans les files des commutateurs, de propagation, …).
- **Débit d'un chemin** : débit des commutateurs et des voies empruntées.
- **Bande passante des voies empruntées sur un chemin** : un chemin qui ne comporte que des voies à 100 Mb/s est jugé préférable à un chemin qui emprunte une voie à 56000b/s.
- **Fiabilité d'un chemin** : on utilise les chemins selon leur fiabilité.
- **Coût monétaire effectif** : différences entre une voie louée à coût marginal minime ou une voie avec tarification au volume (Transpac).

Gestion des tables de routage

- **Routage statique (sans prise en compte de coûts)**
  - Définition statique de tables (compatibles).
- **Routage dynamique avec des coûts fixes (stabilisés)**
  - **Principe d'optimalité (Bellman):** Si J est sur le chemin optimal de I à K alors le chemin de J à K est aussi optimal.
  - **Justification du routage saut par saut (tables de routage locales à chaque routeur).**
- **Routage dynamique (coûts variables, modification permanente des coûts)**
  - **Prise en compte des informations les plus récentes.**
  - **Problème de routage : problème de contrôle optimal (mesure de coût puis rétro action sur le routage du réseau)**
    - Possibilité de bouclage pour certains messages.
    - Besoin d'une convergence rapide vers une solution stable si les coûts se stabilisent.

Qualités d'un algorithme de routage

- **Correct :** Permet d'atteindre effectivement le destinataire.
- **Adaptatif :** Évolutif en fonction de la charge (évite la congestion).
- **Optimal :** Choix du meilleur chemin au sens de critères
  - **Usager => ** Satisfaction d'un contrat de service (QOS)
  - **Exploitant réseau => ** Taux d'utilisation des ressources réseaux.
- **Robuste :** Prévu pour tolérer les pannes du réseau
- **Stable :** Convergence rapide d'un routage dynamique vers de nouvelles tables lors de modifications (sans oscillations).
- **Simple :** Comportement facile à décrire (peu de types de messages différents).
- **Efficace:** Ne consommant pas beaucoup de ressources (temps de calcul, nombre de messages échangés).
- **Équitable :** Traite tous les usagers de la même façon.

Algorithmes de routage : Quelques définitions

- **Routages plats** ("flat routing")
  - Gestion d'un seul chemin par destinataire.
- **Routages multi-chemins** ("multi path")
  - Gestion de plusieurs chemins.
- **Routage non hiérarchique**
  - **Pour un grand réseau nécessité d'une très grande table**
    - Encombrement mémoire important.
    - Temps de recherche important (de nombreuses recherches par seconde)
- **Routage hiérarchique : Exemple à deux niveaux**
  - Division du réseau en régions ou domaines.
  - Deux types de routages pouvant relever de solutions différentes
    - **Routage intra-domaine** (chaque domaine réalise un routage interne).
    - **Routage inter-domaine** (pour chaque domaine un (ou plusieurs) commutateur sont spécialisés dans le trafic inter domaines (trafic externe).

Classification des algorithmes de routage

- **Critère d'adaptabilité en fonction de la charge.**
  - **Routage "statique" , "non adaptatif", "prédéterminé"**
    - Tables non modifiées en fonction des conditions de charge.
    - Détermination manuelle des tables.
  - **Routage "dynamique", "adaptatif", "évolutif".**
    - Tables modifiée périodiquement en fonction de la charge et des pannes.
- **Critère de sûreté de fonctionnement.**
  - **Routage "centralisé" , "dissymétrique".**
    - Un site spécialisé calcule les tables de routage et les distribue.
    - => Problèmes de panne et de surcharge du site centralisé.
  - **Routage "décentralisé" , "réparti" , "symétrique".**
    - Toutes les stations calculent les informations de routage .
    - **Routage local :** connaissances locales (longueur des files d'attente).
    - **Routage global :** connaissances échangées avec le reste du réseau (le voisinage immédiat ou tout le réseau).
  - **Routage hybride :** Pouvant utiliser à la fois un site central et un algorithme réparti.

Commutation et routage

Exemples de protocoles de routage

Routages par inondation "Flooding"

- **Rappel**
  - Construction d'un protocole d'inondation pour atteindre tous les destinataires potentiels et délivrer à qui de droit.
- **Inondation générale ("Flooding")**
  - Pour tout paquet arrivé dans un routeur on retransmet une copie sur tous les adjacents.
  - Complément indispensable: stratégie d'arrêt de l'inondation.
- **Inondation sélective ("Selective Flooding")**
  - On transmet le paquet sur tous les adjacents d'un commutateur pris dans une liste.
    - Soit tirée aléatoirement dans l'ensemble des voisins.
    - Soit correspondant à des sites en direction du destinataire
  - Nécessité d'une stratégie d'arrêt de l'inondation (comme précédemment).

Stratégies d'arrêt de l'inondation

- **Solution 1 : Liste des sites déjà visités**
  - On évite de renvoyer une copie du paquet au site dont on l'a reçu (puisqu'il le connaît déjà).
  - On note dans chaque message la liste des sites déjà visités pour ne pas leur renvoyer (risque d'allongement excessif des messages).
- **Solution 2 : Durée de vie**
  - On note dans chaque copie le nombre de commutateurs traversés.
  - La copie est détruite après traversée de n commutateurs.
  - On doit prendre n > diamètre du réseau => beaucoup de surcharge.
- **Solution 3 : Estampille**
  - Les paquets sont identifiés : estampille comportant l'adresse émetteur et le numéro de séquence de l'émetteur.
  - La première copie reçue fait l'objet d'une inondation et les copies ultérieures sont détruites.
  - Nécessite de mémoriser des estampilles sur chaque routeur.
  - Coût de l'inondation: seulement deux copies d'un même message sur chaque liaison (une dans chaque sens).

Conclusion : Routages par inondation

- **Avantages**
  - **Technique très simple** à mettre en oeuvre.
  - **Très robuste :** détermine un chemin s'il existe.
  - **Détermine le chemin le plus court** (permet de délivrer des paquets très vite sauf problèmes de surcharge).
- **Inconvénients**
  - **Induit une charge élevée**.
- **Utilisation de l'inondation**
  - **Domaine des cas de pannes fréquentes** ou importantes (réseaux militaire, reconstruction d'un réseau).
  - **Implantation de protocoles à diffusion générale**
    Exemple : utilisation de l'inondation dans l'échange des informations de topologie et de coût dans les protocoles de routage (OSPF).

Routages par la source "Paquets fléchés","Source Routing"

- **Principe général**
  - **Chaque émetteur doit connaître la topologie d'ensemble** du réseau et déterminer son arbre de routage.
  - **Dans chaque paquet l'émetteur définit le chemin** qu'il doit emprunter pour atteindre son destinataire.
  - **Les routeurs appliquent le chemin**.
- **Variantes**
  - **1) Définition stricte** du chemin ('strict source routing').
  - **2) Définition non stricte** du chemin ('loose source routing') : définition d'un sous-ensemble de routeurs **qui doivent être traversés obligatoirement** mais le routage peut ajouter d'autres relais intermédiaires.

Conclusion : Routages par la source

- **Avantages**
  - Facilite le travail de chaque routeur intermédiaire (pas de calcul de route, commutation uniquement).
- **Inconvénients**
  - Volume d'informations dans les messages (une route).
  - Nécessité d'une connaissance globale de la topologie de tout le réseau par tous les émetteurs.
  - La connaissance globale peut être vieille.
- **Exemples :**
  - Commutateurs de réseaux locaux IBM.
  - Routage par la source en IP.
  - Algorithme du 'cranckback' en ATM (ouverture d'un CV).

Routages saut par saut : Routages statiques

- **Principe général**
  - **Les tables de routage stables définies manuellement**, modifiées rarement (lors de l'insertion ou de la disparition de sites) et invariantes.
  - **Les tables sont établies en fonction de critères de topologie et de performance** (évalués hors ligne) par le concepteur du réseau.
- **Avantages**
  - **Technique très simple** à mettre en œuvre.
- **Inconvénients**
  - **Non adaptatif en cas de charge élevée.**
  - **Sans apprentissage automatique** beaucoup trop de routes à définir.
- **Utilisation**
  - **Utilisable pour un réseau de petite taille.**
  - **Au démarrage du réseau le routage statique permet la définition de connaissances** de routage indispensables minimales (routes de délivrance locale) avant mise en oeuvre d'un routage dynamique.

Routages saut par saut dynamiques centralisés (adaptatifs)

- **Principe général**
  - **Existence d'un site central** particulier (RCC "Routing Control Center") : par exemple **le site administrateur du réseau** : chargé de la gestion des abonnés, de la facturation....
  - **Émission par les commutateurs** d'informations de charge vers cet administrateur.
    - **Périodiquement**
    - **Sur franchissement de seuils.**
  - **Le central calcule les tables de routage** (algorithme des plus courts chemins exécuté en mode centralisé) et les renvoie aux routeurs.
- **Variante: Serveurs de routes**
  - **Plusieurs sites calculent des tables** pour des routeurs qui ne font qu'appliquer les routes calculées.

Conclusion routages dynamiques centralisés (adaptatifs)

- **Avantages**
  - **Simple à mettre en oeuvre.**
  - **Solution optimale** sur les valeurs utilisées
  - **Solution correcte sans boucles.**
  - **Trafic stable d'informations échangées.**
  - **Pas de calcul** dans les commutateurs.
- **Inconvénients**
  - **Vulnérabilité de l'administrateur** => architecture redondante.
  - **Temps de calcul important** => charge du central
  - **Propagation des informations de charge**
    - Temps de collecte + calcul des tables + transmission des tables
      => Usage de tables anciennes
  - **Trafic élevé au voisinage du central de routage.**
- **Utilisation**
  - **A été très fréquente dans les réseaux commerciaux.**

Routages distribués (adaptatifs) Routages locaux ou isolés

- **Notion de routage local ou isolé.**
  - Les commutateurs utilisent uniquement des informations **locales** (informations qu'ils peuvent connaître sans communiquer).
  - Exemples : longueur des files d'attente, taux d'occupation des voies.
- **Terminologie fréquente :** Routage de type pomme de terre chaude ("Hot potatoe routing")
- **Version de base irréaliste**
  - **On se débarrasse le plus rapidement possible** d'un paquet.
  - **On transmet un paquet dans la direction** qui est actuellement la moins chargée (par exemple la file d'attente la plus courte).
  - **Avantages :** Simplicité , symétrie des comportements.
  - **Inconvénients :** Existence de boucles, l'arrivée n'est pas garantie.
- **Version réaliste**
  - **On transmet un paquet** dans la direction la moins chargée dans un ensemble de choix possibles correspondant à la direction du destinataire (fonctionnement en association avec un autre routage exemple statique)

Routages dynamiques distribués à connaissances globales

- **Principes**
  - **Distribué :** Aucun routeur ne joue un rôle particulier dans l'algorithme.
  - **Global :** Tous les routeurs cherchent à disposer de connaissances globales sur le réseau pour effectuer un routage adaptatif optimal.
- **Solution 1: Apprentissage a posteriori de chemins ("Backward Learning")**
  - **On effectue des expériences** successives de communication : par exemple en inondation.
  - **On apprend des chemins possibles** et leurs coûts pour atteindre un destinataire.
  - **On adopte le meilleur chemin.**
  - **On recommence périodiquement le mode apprentissage** pour prendre en compte des modifications de topologie ou de charge.
  - **Exemple :** Fonctionnement en mode transparent des commutateurs de réseaux locaux (mode transparent).

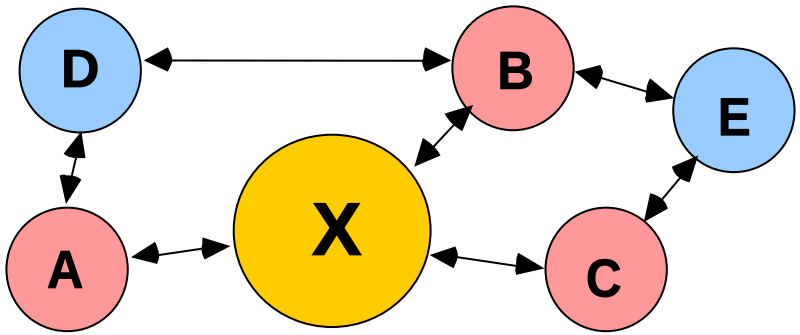
Solution 2 : Arbre des plus courts chemins "Open Shortest Path First”

- **Principe : détermination de l’arbre couvrant des plus courts chemins par chaque routeur.**
  - Pour cela il doit connaître l'état des liaisons de tous les autres routeurs.
  - Il peut alors appliquer un algorithme de plus courts chemins centralisé : pour calculer son arbre de routage et donc ses tables de routage.
- **Fonctionnement par information mutuelle**
  - Chaque routeur envoie à tous les autres l'état de ses liaisons **("link state")** lorsqu'il le juge nécessaire.
  - Chaque routeur répond à des demandes d’état des autres routeurs.
- **Avantages/ Inconvénients**
  - Solution distribuée : bon calcul de routes sur les liaisons connues.
  - Solution plutôt coûteuse en échanges de messages: applicable à un réseau pas trop gros (routage intra-domaine).
- **Exemple: routage OSPF Internet "Open Shortest Path First”, une solution à états de liaisons “link state”.**

Solution 3 : Routage par échange des tables (vecteurs de distance)

- **Principe :** détermination des tables de routages par échange des tables en fait des vecteurs de distances avec les voisins.
- **Nombreuses appellations : "Algorithme de Mac Quillan" ou "Bellman Ford Fulkerson réparti"**
- **Chaque routeur gère deux tables**
  - une table des coûts de transit vers ses voisins immédiats déduites d'infos locales.
  - une table de routage avec les coûts vers tous les autres sites du réseau.
- **Chaque routeur émet périodiquement sa table de routage vers ses voisins et reçoit de ses voisins leurs tables de routage.**
- **Il obtient le coût pour atteindre tous les destinataires en passant par chaque voisin en additionnant:**
  - le coût pour atteindre un voisin immédiat
  - le coût de ce voisin à tous les autres site.
- **Choix des routes :** l'adjacent préféré pour atteindre un destinataire est le voisin de coût minimum (pour atteindre ce destinataire).
- **Exemple : Internet protocole RIP "Routing Internet Protocol".**

Exemple de fonctionnement des vecteurs de distance



Un réseau

Coût Local	A	B	C
X	26	20	18

Coût Distant	D	E
A	64	130
B	56	115
C	45	210

Tables de coûts

Pour aller de X à D ou de X à E

Par A 26 + 64 = 90 26 + 130 = 156

Par B 20 + 56 = 76 20 + 115 = 135

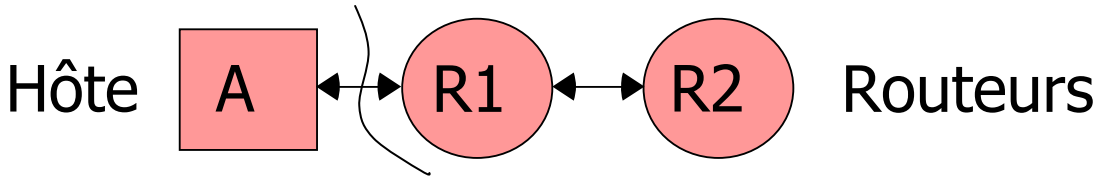
Par C 18 + 45 = 63 18 + 210 = 228

Optimisation

X	A	B	C	D	E
Adjacent	A	B	C	C	B
Coût	26	20	18	63	135

Table de routage

Vecteurs de distances : le problème du comptage vers l'infini



- **Métrique utilisée le nombre de sauts :**
  coût(A-R1) = 1 , coût(R1-R2) = 1 , coût(A-R2) = 2
- **A<->R1** tombe en **panne** : coût(A-R1) = ∞
- **Nouveau calcul des tables en R1 :** R2 indique à R1 qu'il un chemin vers A de longueur 2 (en fait celui passant par R1).
- **R1 considère à tort qu'il a retrouvé un chemin vers A** de longueur coût (R1-R2) + coût(A-R2) soit 1+2=3 par R2
- **Problèmes**
  - **Les paquets de R1 vers A bouclent entre R1 et R2.**
  - **A chaque calcul des tables de routage le coût augmente de 1** (notion de **comptage vers l'infini 'count to infinity').**

Solutions au problème du comptage vers l'infini

- **Solution de base : Introduire une borne dans le coût des chemins** (notion de durée de vie 'time to live').
  - **Si un chemin a un coût plus élevé que la borne on considère que le chemin est coupé** => on ne retransmet plus sur cette route.
  - **La borne** met fin au bouclage des paquets (réglage de 15/16 à 30/35).
- **Autre solution : Horizon partagé** ("split horizon")
  - **A) Limiter le volume des tables échangées** en ne renvoyant pas une information dans la direction d'où elle vient
    - C1 indique à C2 qu'il a une route vers A.
    - Pour éviter les boucles C2 ne retransmet pas cette route vers C1 (puisqu'elle est connue de C1).
  - **B) Solution dite d'empoisonnement des routes de retour** (RIP, IGRP) ('reverse poison'): au lieu de ne pas retransmettre la route on retransmet un coût infini. Le comportement B) est différent de A) lorsqu'on a plusieurs chemins possibles dans la table.

Conclusion: routages à vecteurs de distances

- **Avantages**
  - **Algorithme complètement réparti, simple à développer.**
- **Inconvénients**
  - **Problème de la fréquence d'échange des tables**
    - **Pour limiter le trafic et les traitements** => Peu d'échanges.
    - **Pour que les modifications de topologie soient prises en compte rapidement** => Échanges fréquents.
    - **Apprentissage d'un événement dans tout le réseau** => D étapes d'échanges de tables ou D est le diamètre du réseau.
    - **Exemples de réglage :** Arpanet 0,640 seconde, Internet 30 secondes.
- **Très nombreuses utilisations**
  - **Internet:** Protocoles RIP, EGP "Routing Information Protocol" (dans Internet l'utilisation de RIP diminue depuis 1990 au profit de OSPF).
  - **XNS "Xerox Network System" :** Protocole GWINFO.
  - **Apple talk RTMP :** "Routing Table Maintenance Protocol"
  - **Autres constructeurs** : Novell, 3COM, Ungermann-Bass, Banyan.

Conclusion: Protocoles de routage

- **Problème très important de l'algorithmique des réseaux.**
  - Composant nécessaire dans tous les réseaux.
  - Très nombreuses solutions proposées.
  - Solutions assez souvent retenues : basées sur la construction d'arbres couvrants des plus courts chemins dans chaque routeur.
- **Solutions particulières pour des types de réseaux particuliers.**
  - Routage sur des réseaux à topologie régulière (grille hypercube).
  - Techniques de routage au niveau application pour l'accès aux contenus (réseaux pairs à pairs, tables de hachage distribuées).

Problèmes généraux de réalisation du niveau réseau

Qualité de service et contrôle de congestion

Introduction

- **Spécification d'un contrat de qualité de service**
  - Les obligations temporelles du fournisseur mais aussi du client.
  - Les obligations du fournisseur en terme de pertes de paquets (sûreté).
  - Les outils pour vérifier le respect de ces obligations.
- **Le contrôle de congestion (« Congestion control »)**
  - Le mécanisme global dans un réseau qui permet de respecter en toutes circonstances les objectifs de qualité de service (paramètres temporels, taux de perte).
- **Le contrôle de trafic (« Usage parameter control »)**
  - Le mécanisme à l'entrée du réseau qui permet de détecter les violations du contrat de trafic d'un client.
- **Le contrôle de flux (« Flow control »)**
  - Un mécanisme par rétroaction du destinataire sur l'émetteur pour éviter de perdre des informations par saturation du destinataire.

Phénomènes de congestion

- **Situation de surcharge**: trop de paquets dans le réseau (ou dans une région du réseau, un commutateur donné).
- **Augmentation des délais** de transmission => non conformité à la définition de qualité de service.
- **Pertes de paquets.**
- **Phénomène d'écroulement** : Le réseau ne transporte plus le trafic usager
- **Pourquoi ?**
- **Destruction de paquets** pour désengorger les commutateurs
- **Protocole de traitement de surcharge** (qui implique de plus en plus d'échanges).

Nécessité des mécanismes de QOS et de congestion

- **L'accroissement des ressources ne résout pas seul le problème.**
  - Utilisation à faible charge (relativement aux ressources) => Fonctionnement correct mais sous-réservation des ressources
  - Apparition de surcharges : La congestion peut apparaître lors des surcharges qui sont inévitables sauf contrôle de trafic entrant très strict.
- **Un volume de mémoire important ne résout pas le problème => Pics de trafic de longue durée.**
  - Même si la mémoire est de taille infinie:
  - Temporisateur +retransmission => congestion
- **Des communications très rapide ou des commutateurs rapides ne peuvent solutionner le problème**
  - En fait les tampons peuvent être saturés plus vite.

Classification des techniques de contrôle de congestion

- **Selon la position dans le temps**
  - Traitement préventif de la congestion.
  - Traitement curatif de la congestion.
- **Selon l'endroit ou s'applique le mécanisme**
  - Contrôle du trafic d'entrée d'un usager.
  - Politique de réservation des ressources (gestion des tampons, des capacités des voies)
  - Techniques curatives de traitement de la congestion pour limiter les surcharges (exemple: paquets d'indication de surcharge).

Traitement préventif par limitation du trafic d'entrée

- **Limitation du trafic de chaque hôte**
  - **Selon le contrat** défini au préalable entre le client et le prestataire
  - **Pour éviter une surcharge non connue.**
  - **Également pour découpler le trafic soumis** par chaque usager du débit de sa voie physique de rattachement.
- **Fonctionnement**
  - **Obliger l'usager à respecter** les règles concernant le débit soumis.
  - **Nombreux paramètres possibles**
    - Nombre moyen de paquets par unité de temps.
    - Durée des rafales autorisées au débit maximum.
  - **Le prestataire doit doter chaque accès d'un contrôleur de trafic** d'entrée
    - Exemple pour le débit : technique de seau percé "leaky bucket".

Conclusion : Limitation du trafic d'entrée

- **Avantages**
  - **On évite les comportements inattendus** de certains usagers.
  - **Une technique indispensable** pour limiter les difficultés.
- **Inconvénients**
  - **Si la limitation du volume global entrant est trop importante** (acceptation d'un faible nombre d'usagers)

    => **Sous-réservation** des ressources
  - **Si la limitation est trop légère**

    => **La saturation et la congestion peuvent apparaître.**
  - **N'empêche pas l'installation de la congestion.**
- **Utilisation**
  - **Tous les réseaux à qualité de service : Relais de trames ("Frame Relay"), ATM.**

Traitement préventif de la congestion Allocation des ressources

- **Cas des circuits virtuels**
  - **En fonction du contrat** de service négocié.
  - **Au moment de la construction du circuit.**
- **Réservation dans les commutateurs traversés**
  - **Des ressources** pour l'écoulement correct du trafic (tampons, débit).
  - **Si la réservation est impossible**: le circuit n'est pas accepté.
  - **Si la réservation a pu avoir lieu**: le trafic doit pouvoir s'écouler.
- **Avantage** :
  - **Si la gestion est rigoureuse la congestion est impossible.**
- **Inconvénient** :
  - **Les usagers n'utilisent pas les ressources qu'ils réservent.**
  - **Le fournisseur du service s'il optimise** par la sur-réservation des ressources dont il dispose => implique l'acceptation d'un certain niveau de congestion.

Traitement curatif de la congestion Destruction de paquets

- **Engorgement d'un commutateur**
  - **Insuffisance de mémoire** pour stocker.
  - **Insuffisance de puissance de calcul** et de **débit** des voies.
- **Destruction de paquets**
  - **Incontrôlée** dans les tampons d'entrée.
  - **Selon une politique contrôlée**
    - Après avoir exploité les informations de libération de ressources.
    - **Pour maintenir un trafic "plus prioritaire" au détriment d'un autre** (gestion séparée des files d'attente, des circuits virtuels).
    - **Notion de bit de priorité à la destruction.**
- **Conclusion**
  - **La solution la moins bonne pour des données informatiques** : il faut retransmettre ensuite).
  - **Si la destruction est acceptée ou inévitable**
    - Acceptation du taux d'erreur comparable au taux d'erreurs de transmission.
    - Acceptation d'erreurs récupérables (compensables, qu'on peut corriger).

Traitement curatif de la congestion Paquets de surcharge 'Choke Packets'

- **Principe :** Sur franchissement de **seuil** d'alerte demande aux voisins de limiter ou de suspendre les communications:
  - **Par des paquets spécifiques de surcharge** (trafic en plus)
  - **Par des bits de surcharge** insérés dans les paquets ("piggybacking")
    Exemple: ATM bit EFCN "Explicit Forward Congestion Notification"
  - **L'indication de surcharge :**
    - S'applique à un **CV** ou une **voie** physique
    - Peut **s'arrêter aux voisins** du site surchargé ou être **propagée** j**usqu'aux hôtes générant le trafic** d'entrée.
- **Avantages :**
  - Peut réellement traiter une situation de congestion.
- **Inconvénients :**
  - Ne s'applique qu'à des échanges qui peuvent ralentir
  - En surcharge lenteur de circulation des informations de surcharge.

Traitement curatif de contrôle de congestion basé crédit ou basé débit

- **Sur quel critère traiter la congestion**:
  - Espace mémoire occupée ou débit des paquets sur les voies.
- **Crédits :** Une information qui concerne l'espace mémoire disponible (le nombre de tampons libres).
  - **=> Algorithmes basés crédits** : faire circuler des crédits.
- **Débits :** Une information qui concerne le nombre de paquets ayant circulé par unité de temps dans un passé récent.
  - **=> Algorithmes basés débits** : mesurer le débit effectif et faire fonctionner le CV à ce débit qui est le maximum possible
- **Avantage des solutions basées débit**
  - **Dans le cas des réseaux à haut débit**: l'espace mémoire (très important) reste inoccupé trop longtemps.

Conclusion

Quelques tendances

- **Augmentation des débits disponibles, de la taille des réseaux.**
- **Support des applications multimédia de masse**:
  - Intégration de service : données classiques, téléphone, visio conférence, diffusion télévision, radio.
  - Prise en compte de la qualité de service temporelle.
  - Convergence des réseaux: informatique, téléphonie filaire et mobile.
  - Nouvelles applications : jeux en réseau,
- **Support de la mobilité et des communications radio:**
  - **Routage ad'hoc** : protocoles de routage pour des communautés d'usagers dynamiques auto organisées.
  - **Itinérance ('roaming') :** localisation d'un usager dans l'une des cellules du réseau permettant de l'atteindre.
  - **Continuité ('handover') :** de service lors d'un changement de cellule

Bibliographie : Cours généralités routage/commutation

- A. S. Tannenbaum 'Computer Networks' Prentice Hall.
- Documents en ligne et RFC.