

Chapitre 6

Routage

6.1. Introduction

Nous avons vu au chapitre 2 qu'il n'y a en général pas de voie directe entre deux équipements ou abonnés du réseau. Les réseaux sont construits à partir d'un maillage de voies interconnectées. En général, les interconnexions (carrefours) relient plus de deux voies. On appelle nœud de commutation ou routeur un composant qui interconnecte deux voies ou plus (cf. figure 6.3.).

Ces nœuds de commutation assurent l'aiguillage des messages arrivant sur une voie vers la voie de sortie qui permettra au message reçu d'atteindre sa destination. Les nœuds de commutation assurent le choix des chemins à un carrefour. On appelle :

- routage, la fonction exécutée dans chaque routeur ou nœud de commutation qui permet d'acheminer localement un message vers sa destination. Le routage utilise pour cela des informations d'acheminement qui sont à sa disposition. Ces informations peuvent être des tables, des vecteurs, des listes, etc., de routage ;

- algorithme de routage, les règles qui permettent d'assurer cette fonction d'acheminement des messages dans le réseau. L'algorithme de routage permet de trouver les chemins qui vont d'un point à un autre. Ces informations d'acheminement sont mises à la disposition de la fonction de routage selon divers moyens. L'algorithme de routage a pour but de renseigner les tables, vecteurs, listes, etc., de routage. L'algorithme de routage n'est pas mis en œuvre nécessairement dans chaque nœud de commutation.

Nous traitons dans ce chapitre des problèmes et des mécanismes associés au routage.

Un plan d'adressage permet de désigner de manière unique et non ambiguë chaque abonné du réseau, c'est-à-dire que chaque abonné du réseau susceptible de recevoir des messages doit avoir une adresse unique. Pour chaque lettre postée, une adresse doit être fournie. Cette adresse correspond à une boîte aux lettres d'arrivée unique. De même, le numéro de téléphone correspond à un abonné unique. Néanmoins, il peut y avoir plusieurs utilisateurs pour une même adresse : il y aura alors besoin d'un

mécanisme d'adressage complémentaire (local, privé, applicatif...) pour acheminer (démultiplexer) le message vers le bon utilisateur. Cela ne veut pas dire, dans les deux exemples, qu'un individu ne puisse pas avoir plusieurs adresses, mais implique seulement qu'un message ne peut aller qu'à une seule adresse. La manière de construire un espace d'adresses ne sera pas examinée ici.

Chaque abonné possède une adresse. Un centre de tri des PTT est un nœud de commutation pour les lettres, tandis que le postier ou la machine de tri exécute la fonction de routage. On peut décrire cette fonction de la manière simpliste suivante :

- lire l'adresse,
- selon la destination, mettre la lettre dans la case correspondant à celle-ci. Le choix de la case est fait à partir d'informations d'acheminement connues du postier.

Cela suppose donc que cette information ait été élaborée au préalable par l'algorithme de routage. Par exemple, le postier aura comme information que les lettres à destination des départements 35, 22, 29, 56 sont à déposer dans la case Bretagne. La définition du regroupement de ces quatre destinations différentes est un des résultats de l'algorithme de routage. Le postier n'a pas à connaître le maillage du réseau, il ne connaît que les voies de sorties locales à son centre de tri. A tout instant, pour chaque lettre, sa décision doit être unique.

Prenons un autre exemple pour bien distinguer la fonction de routage de l'algorithme de routage. Un camionneur doit aller de Rennes à Marseille. L'algorithme de routage est exécuté préalablement au départ du camion par le camionneur lui-même ou par le service spécialisé de la compagnie de transport. Le résultat de l'algorithme de routage est un ou plusieurs itinéraires possibles. Le camionneur part avec ces itinéraires décrits sur un document (appelé informations d'acheminement, feuille de route, road book, table de routage...). Le camionneur en faisant la route va, à chaque croisement, consulter ces informations d'acheminement pour décider sur quelle route de sortie du croisement il doit poursuivre. En faisant cela, il exécute la fonction de routage. S'il dispose dans ses informations d'acheminement de plusieurs itinéraires possibles, il pourra éventuellement choisir en fonction d'informations complémentaires obtenues localement à chaque croisement (radioguidage sur les bouchons, accidents, routes barrées, etc.).

Dans un nœud de commutation, la case de dépôt est une voie de sortie du nœud. Il existe une case (ou plusieurs) particulière pour les lettres qui sont destinées aux abonnés relevant de ce centre de tri (nœud de commutation). Le facteur qui distribue les lettres peut être considéré comme le centre de tri final. En fait, il achemine physiquement les lettres dans la boîte aux lettres de chaque destinataire. Dans les architectures réseau on distingue en général le routeur, ou nœud, qui effectue l'opération de livraison au destinataire final des nœuds intermédiaires, qui assurent le routage. La différence se situe essentiellement au niveau du nom de ces composants (concentrateur d'abonné, point d'accès réseau, centre local, cf. paragraphe 6.3.7.4.) et de l'utilité des informations de routage. Le nœud connaît le destinataire final puisqu'il est local.

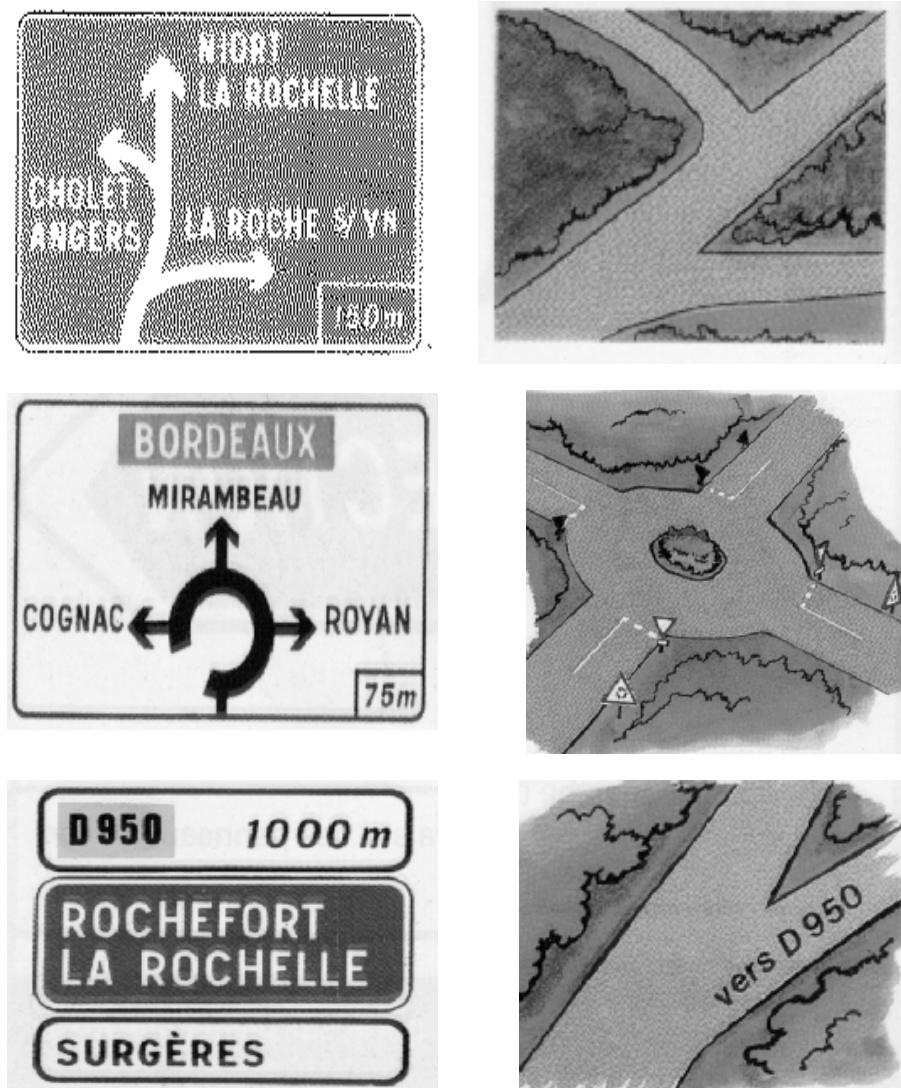


Figure 6.1. Exemples de vecteurs de routage et de leur nœud de commutation

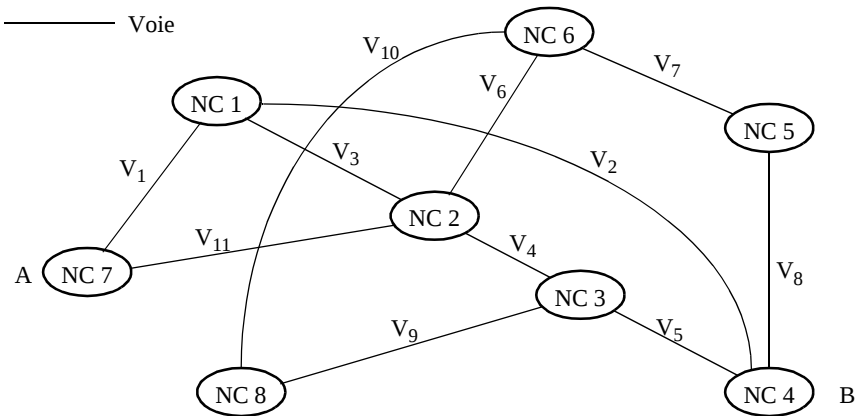


Figure 6.2. Exemple de réseau maillé composé de 8 nœuds et de 11 voies et de diamètre $D = 3$ (en nombre de voies). Le schéma reflète la topologie (géographie) réelle

6.1.1. Modélisation du maillage

Le maillage du réseau peut être assimilé à une carte routière. Les routeurs, ou nœud de commutation, en sont les carrefours. Pour assurer la connectivité, c'est-à-dire la propriété d'interconnecter tous les équipements ou abonnés, il faut construire des réseaux maillés. On appelle réseau maillé un assemblage complexe de voies et de nœuds de commutation. Les nœuds de commutation sont des éléments essentiels des réseaux de transmission de données. Tout réseau construit à partir d'un assemblage de voies point à point est un réseau maillé. La figure 6.2. montre un exemple de réseau maillé composé de huit nœuds de commutation et de onze voies qui sera utilisé tout au long de ce chapitre. Les abonnés, notés A, B..., sont supposés être raccordés directement aux nœuds de commutation. Dans un réseau maillé il existe plusieurs chemins pour aller d'un point à un autre. La construction du maillage permet de tolérer des pannes de voies en créant plusieurs chemins pour aller d'un point à un autre, et donc d'améliorer la fiabilité du service. Sur la figure 6.2. il existe au moins deux chemins pour aller de tout nœud vers tout autre nœud. La perte de la voie 1 permet à A de continuer à communiquer avec le reste du réseau. Par contre, si V_1 et V_{11} sont simultanément en panne, les abonnés du nœud 7 sont isolés du réseau.

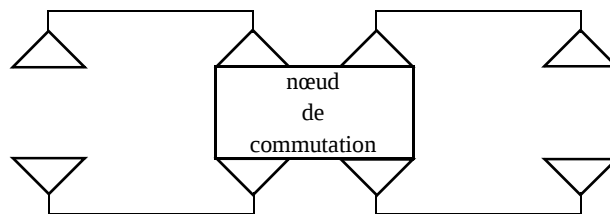


Figure 6.3. Equipement d'interconnexion de quatre voies

On appelle maille une voie reliant deux nœuds directement. Ce sont donc des nœuds adjacents. Deux nœuds ayant une voie directe sont dits voisins ou adjacents. On peut exprimer la distance d_{ij} entre deux nœuds i et j par le nombre de mailles (voies) ou nœuds qui les sépare sur un chemin donné. Pour deux nœuds adjacents, il existe un chemin de distance 1. On appelle diamètre, D , du réseau le nombre minimum de nœuds ou mailles qui séparent les deux nœuds les plus éloignés. Sur la figure 6.2., D vaut 3. En effet, le chemin le plus court pour aller d'un nœud quelconque à un autre nœud en nombre de voie est de 3. Bien sûr, il existe des chemins plus long. Si l'on coupe la voie V_4 , alors le diamètre devient 4. Le diamètre est une mesure de la connexité du réseau.

Sur la figure 6.2. il existe de nombreux chemins entre A et B. En voici quelques-uns que nous avons déjà décrits dans le paragraphe 2.3.4. et que nous reproduisons volontairement dans un souci de cohérence :

- NC 7 - V_1 - NC1 - V_2 - NC4 $d = 2$
- NC 7 - V_1 - NC1 - V_3 - NC2 - V_4 - NC3- V_5 - NC4 $d = 4$
- NC 7 - V_{11} - NC2 - V_4 - NC3- V_5 - NC4 $d = 3$

En voici un autre plus bucolique :

- NC 7 - V_1 - NC1 - V_3 - NC2 - V_6 - NC6 - V_{10} - NC8 - V_9 - NC3- V_5 - NC4 $d = 6$

Deux chemins ou routes sont différents s'ils utilisent au moins une voie différente ou un nœud de commutation différent. On dit que deux routes sont :

- disjointes, si elles n'utilisent aucune voie commune ;
- distinctes, si elles diffèrent par au moins une voie.

Les deux modes de service, datagramme et sur connexion, se retrouvent au niveau réseau. La fonction de routage doit s'adapter à ces deux modes. On appelle aussi Circuit Virtuel, ou CV, le service sur connexion offert au niveau réseau. L'algorithme de routage peut être indépendant de ces deux modes.

6.1.2. Commutation de lettres, paquets, messages (mode datagramme ou lettregramme)

Chaque nœud de commutation (centre de tri) utilise une partie de l'information d'adresse pour router la lettre vers le destinataire final en utilisant les voies de sortie dont il dispose. Il n'y a aucun chemin préétabli entre la source et la destination. Chaque lettre doit contenir les informations relatives à l'adresse de destination. Les centres de tri traitent chaque lettre indépendamment les unes des autres. Ils ne réservent aucune ressource pour les différents flux de courrier entre sources et destinations. Ainsi, les figures 6.4. et 6.5. montrent deux lettres issues de A, à destination de B, qui suivent des chemins différents.

Chaque nœud de commutation, ayant plusieurs choix possibles, décide en fonction de critères qui lui sont propres. Les critères sont nombreux : voie la moins chère, la plus rapide, la moins chargée, la plus sûre, celle qui traverse le moins de voies... Pour la Poste, ce peut-être : train, avion, ou bateau. NC 1, NC 2 ont diverses possibilités de

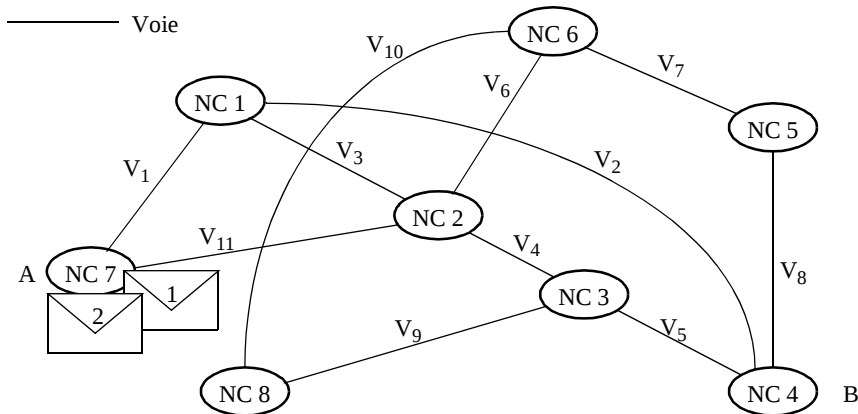


Figure 6.4. Envoi de deux lettres sur notre réseau maillé

choix selon des critères tels que : voie rapide, voie bon marché, voie sécuritaire... Vous effectuez vous-même la fonction de routage lorsque vous circulez en voiture, puisque à un carrefour vous décidez de la route suivante en fonction de critères très variés : beauté du paysage, prix de la voie, importance de la file d'entrée dans la voie (la plus courte toujours par exemple). Bien sûr, ce choix n'est possible que parce que vous connaissez les chemins possibles pour atteindre votre destination.

Pour réaliser la fonction de commutation, le commutateur doit au minimum trouver dans l'enveloppe du message une information d'adresse qui lui indique soit la destination suivante, soit la destination finale. Une solution basée sur le principe du navigateur consiste à mettre dans le corps du message la liste des commutateurs à traverser et la voie de sortie de chacun. Le travail du commutateur est simple : il lui

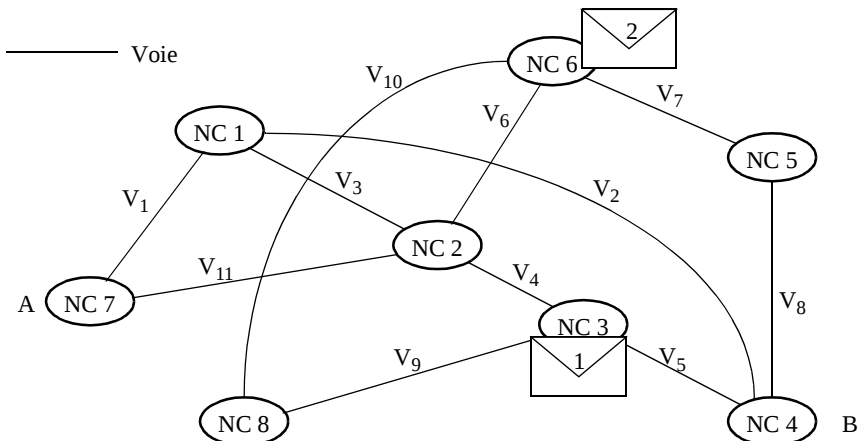


Figure 6.5. Progression des deux lettres sur notre réseau maillé

Routing Table:					
@ Destination	Gateway	Flags	Ref	Use	Interface
127.0.0.1	127.0.0.1	UH	0	11363772	lo0
192.108.119.0	192.108.119.1	U	2	4840	le1
192.44.77.0	192.44.77.77	U	3	16540	le0
192.44.77.128	192.44.77.252	U	2	1776	le2
224.0.0.0	192.44.77.77	U	3	0	le0
default	192.44.77.2	UG	0	18987	

U pour *Up Interface* active

G pour *Gateway* (Routeur) H pour routage vers une machine (*Host*)

Cf. paragraphe 6.2.1. pour comprendre la structure des adresses Internet.

Figure 6.6. Exemple de table de routage dans un routeur (commutateur) d'Internet. Interface correspond à la voie de sortie. Il s'agit du coupleur de sortie

suffit de lire cette liste pour savoir sur quelle voie de sortie locale il doit réémettre le message.

Une seconde solution consiste à disposer dans le corps du message de l'adresse finale à atteindre. Le commutateur doit alors disposer d'une table routage (cf. figures 6.6. et 6.7.) qui lui indique les destinations finales que l'on peut atteindre par ses voies de sortie. La table de routage n'est autre qu'un ensemble de panneaux indicateurs. Cette solution est adoptée entre autres dans le réseau Internet (protocole IP). La figure 6.6. montre une table de routage dans un routeur IP, appelé *gateway*. L'interface correspond à la voie de sortie du message. La destination indique l'espace d'adresses (0 signifie que le champ prend n'importe quelle valeur entre 1 et 255) qui est atteint en envoyant le message au gateway dont l'adresse est indiquée dans la colonne suivante.

Dans les deux cas, le commutateur, appelé aussi routeur, peut être considéré comme un réseau de files d'attente (cf. figure 6.7.). A chaque fois qu'il reçoit un message, il examine l'information d'adresse et le dépose dans la file de sortie de la voie qui va permettre d'acheminer ce message vers sa destination finale. La figure 6.7. montre des valeurs de commutations possibles pour la table du nœud 3. Lorsqu'un message destiné à 1 arrive au nœud 3, la table de commutation indique qu'il faut mettre ce message dans la file de sortie de la voie 4. La mémoire du nœud sert à réaliser les files d'attente. Un message est donc reçu entièrement avant d'être retransmis : cette technique est appelée *store and forward*. A chaque voie est associée une file d'attente dans laquelle sont rangés les messages que la voie doit émettre. Dans l'exemple, nous avons supposé qu'il n'y a qu'une seule file d'attente par voie de sortie. Lorsque l'on veut attribuer des priorités aux messages, on est amené à créer une file d'attente par priorité pour chaque voie de sortie.

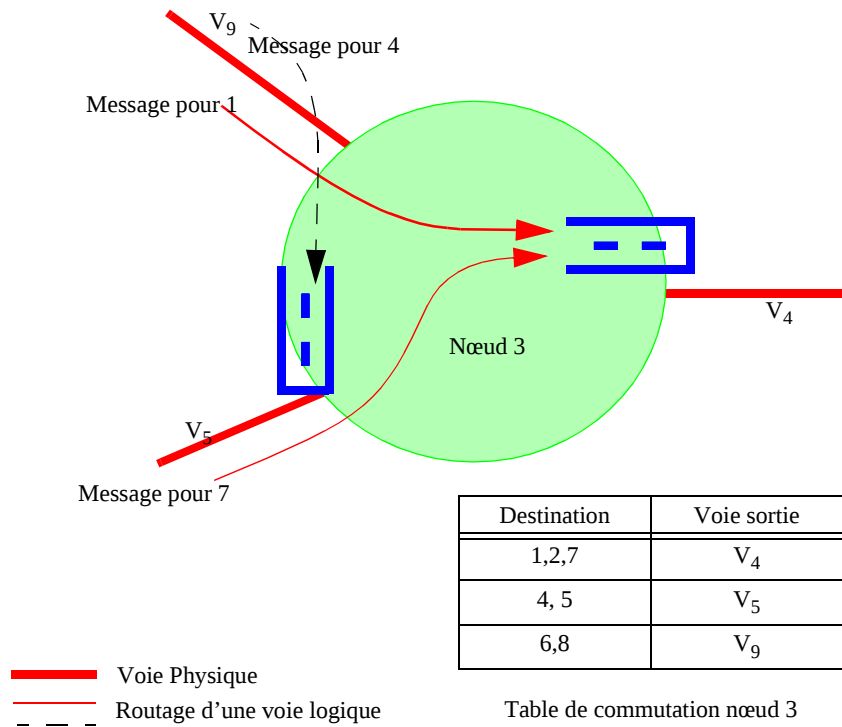


Figure 6.7. Exemple de table de routage

Chaque message a une durée d'émission proportionnelle à sa longueur et au débit de la voie. Si L_{mi} est la longueur du message et D_{vj} le débit de la voie j , le message m_i occupe donc la voie v_j pendant sa durée d'émission :

Si pendant un intervalle de temps T la quantité N de messages m_i ($i \in [1, N]$) qui arrivent pour une voie est supérieure à sa capacité de transmission, alors on aura :

La file d'attente de la voie va se remplir. Si une telle situation persiste, la file d'attente va occuper toute la mémoire disponible, et les nouveaux messages seront jetés, créant ainsi des pertes de messages dans le service réseau. Une telle situation est appelée congestion. La figure 6.9. montre un tel exemple de congestion.

6.1.2.1. Délai de traversée d'un commutateur

Le délai de transit dans un commutateur correspond au temps de traitement du message par la fonction de commutation plus le temps d'émission. Un commutateur tel que celui décrit sur la figure 6.7. peut potentiellement exécuter en parallèle la réception d'un message sur chaque voie (V_4 , V_5 et V_9), l'émission d'un message sur chaque voie (V_4 , V_5 et V_9 en considérant des voies bidirectionnelles-full duplex) et commuter (traiter un message). Il exhibe donc un parallélisme potentiel d'ordre 7. En général, dans un commutateur la durée de traitement, d_c , de la fonction de commutation est peu sensible à la taille du message. On la considère souvent comme une constante. Donc, si le message est seul à être présent en entrée et avec la file d'attente vide sur la voie de sortie j , le délai de transit d'un message m_i dans un commutateur est égal à :

$$d_{tmi} = d_c + \frac{L_{mi}}{D_{vj}}$$

6.1.2.2. Modèle à files d'attente d'un commutateur

Ces conditions idéales ne sont pas en général vraies. On peut alors modéliser le commutateur (routeur...) selon le schéma à files d'attente de la figure 6.8. Ce schéma fait apparaître les processus qui sont mis en œuvre dans la traversée du commutateur.

— Le processus d'arrivée des messages qui sont rangés dans ce modèle dans une seule file d'attente¹. Toutes les voies d'entrées dans ce modèle mettent leur message dans la même file.

— Le processus de commutation proprement dit traite lui un message à la fois selon leur ordre d'arrivée dans la file d'attente — traitement premier arrivé premier servi (FIFO, *First In First Out*). Le temps de traitement d'un message (on dit aussi en théorie des files d'attente temps de service) est en général très peu dépendant de la taille des messages. On le considérera souvent dans les exercices comme une constante.

— Les processus d'émission. Le message commuté est déposé dans la file de la voie de sortie vers lequel il doit être dirigé (résultat de la fonction de routage). Chaque voie de sortie traite les messages qui sont dans sa file d'attente les uns après les autres. Le temps de traitement (on dit aussi temps de service) d'un message est égal à sa durée d'émission sur la voie.

Le lecteur remarquera que le délai de transit, le temps passé dans un commutateur par un message, est fonction de la taille de la file d'entrée et de sortie par lesquelles il doit passer. Si les files sont vides, le délai de transit est égal au temps de commutation plus la durée d'émission sur la voie de sortie. Sinon, le délai de transit (ou durée de traversée) doit être calculé en prenant en considération les délais suivants :

1. On peut attribuer des priorités différentes aux voies d'entrée en créant plusieurs files d'attente. Dans ce cas, les messages de chaque file d'attente seront traités par la fonction de commutation selon la priorité de la file où ils sont arrivés.

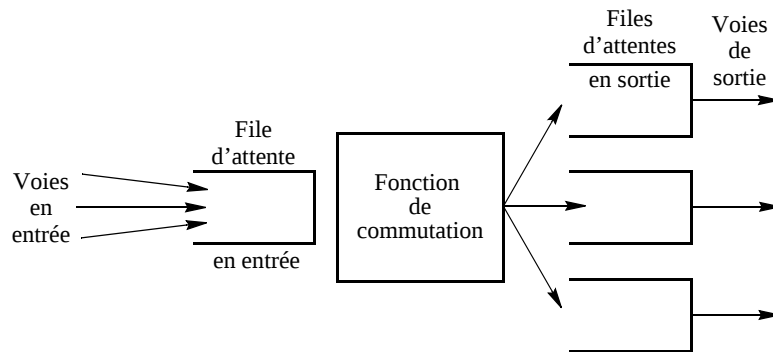


Figure 6.8. Modélisation d'un routeur sous la forme d'un réseau de files d'attente

— le délai d'attente en entrée, qui est une fonction de la taille de la file d'attente d'entrée à l'instant d'arrivée du message. C'est-à-dire que le message sera traité après tous les messages qui le précède dans la file d'attente ;

— le temps de traitement par la fonction de commutation, d_c ;

— le délai d'attente en sortie, qui est une fonction de la taille de la file d'attente en sortie à l'instant de sortie de la fonction de commutation. C'est-à-dire que le message sera émis après tous les messages qui le précède dans la file d'attente. Le délai d'attente est donc égal à la somme des durées d'émission des messages qui le précède ;

— la durée d'émission du message sur la voie de sortie.

Bien évidemment, l'accroissement du délai de transit dans chaque commutateur accroît d'autant le délai d'acheminement d'un message.

L'étude de ces phénomènes fait l'objet d'une théorie complète, appelée théorie des files d'attente. Les travaux dans ce domaines ont une importance majeure pour la conception des architectures de réseau. Nous renvoyons le lecteur aux travaux théoriques des files d'attente et chaînes de Markov [8] pour approfondir ce sujet.

6.1.2.3. Congestion

Une congestion est un phénomène identique aux bouchons dans un réseau routier. Un phénomène de congestion se produit lorsque un commutateur reçoit plus de trafic qu'il ne peut en traiter, soit parce que :

— la somme des débits destinés à une voie de sortie est supérieure à la capacité de cette voie. Dans ce cas, la file d'attente de la voie de sortie se remplit. Sur la figure 6.9. une rafale de messages arrive simultanément sur les voies V_1 et V_2 à destination de la voie V_3 . La file de sortie de la voie V_3 va devoir contenir 2 Mb/s d'information à la fin des deux rafales. Sinon des messages seront perdus ;

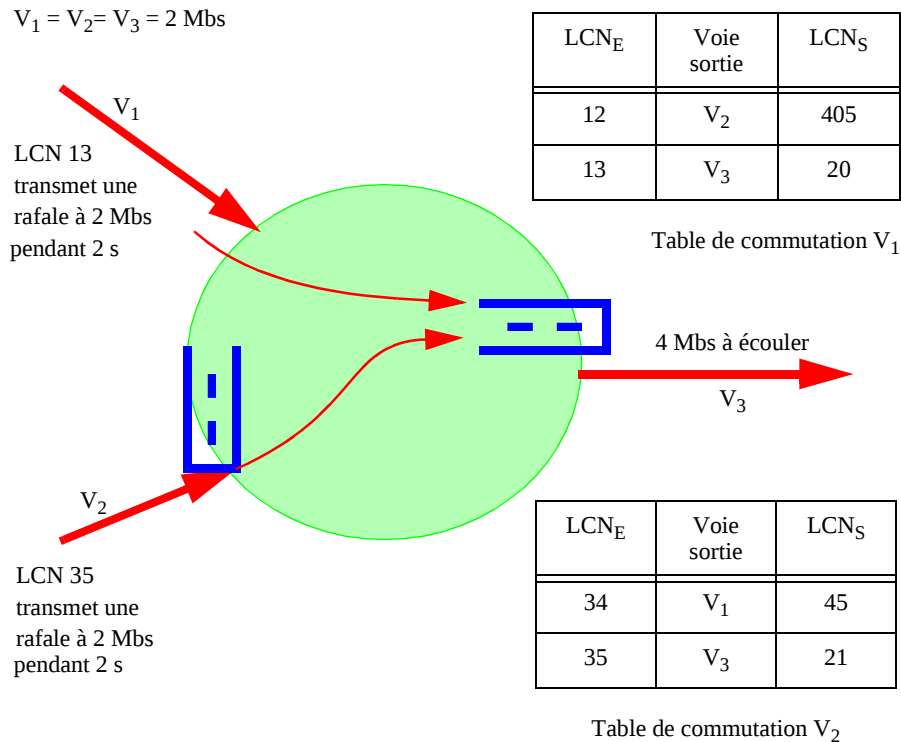


Figure 6.9. Exemple de congestion due à un excès de trafic sur les voies entrantes à destination de la même voie de sortie

— le rythme d'arrivée des messages sur les voies entrantes est supérieure à la capacité de commutation de la fonction de commutation. Dans ce cas, la file d'attente en entrée de la fonction de commutation se remplit (cf. figure 6.8.).

Dans les deux cas, la mémoire d'un commutateur est limitée. Lorsque les files sont pleines, les messages sont jetés (perdus). L'étude des congestions est faite à partir de la théorie des files d'attente. Un réseau congestionné, outre qu'il perd des messages, fournit à ses utilisateurs un débit faible voire nul : il suffit de vous rappeler le dernier bouchon routier que vous avez connu.

Le délai de transit dans un commutateur congestionné devient grand du fait que les derniers messages arrivés doivent attendre de passer en tête de file pour être transmis. En conséquence, le délai d'acheminement du message s'accroît.

Cela montre aussi que le délai d'acheminement dans un réseau de files d'attente ne peut pas facilement être maîtrisé, car il dépend du trafic soumis par l'ensemble des utilisateurs à tout instant.

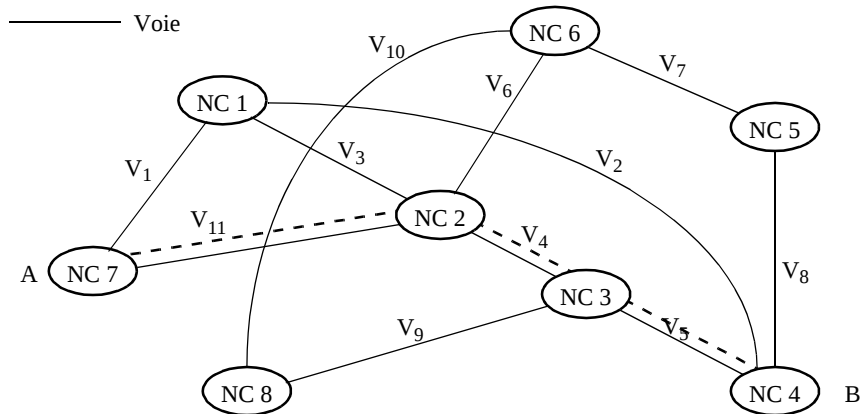


Figure 6.10. Exemple de circuit virtuel sur notre réseau maillé. Ce circuit virtuel passe par les nœuds 7, 2, 3 et 4 et par les voies V₁₁, V₄ et V₅

Si un mécanisme de contrôle de flux est mis en œuvre sur les voies de communication, la congestion d'un commutateur se propage rapidement aux commutateurs voisins.

6.1.3. Commutation de circuit

L'ensemble des voies à utiliser pour transmettre les données sont réservées à l'ouverture de la communication. Les tâches de routage sont donc différentes pendant les phases d'une connexion.

— Etablissement du chemin avant toute communication de données¹. Si un chemin, circuit physique ou circuit virtuel, est défini et réservé (cf. figure 6.10.), en chaque nœud du réseau les ressources nécessaires à la fonction de routage (commutation) sont réservées. Cette phase utilise un mécanisme de routage qui lui est propre, souvent basé sur un routage à datagramme. Elle produit des informations de routage qui seront utilisées pendant la phase de transfert de données.

1. Plusieurs techniques sont utilisées pour acheminer les messages d'établissement et déterminer le chemin utilisé par les données pendant la connexion : l'algorithme de routage peut être exécuté (architecture centralisée, cf. paragraphe 7.2, ou routage par la source, cf. paragraphe 7.3.2.), ou bien des vecteurs de routage sont utilisés (comme par exemple dans le réseau téléphonique, cf. paragraphe 6.3.8. : le paquet d'appel est alors un datagramme), ou encore des voies logiques sont réservées à cet usage (c'est le cas pour ATM ou Frame Relay). Donc une technique de routage différente de celle utilisée pour les paquets de données peut être utilisée pour acheminer les messages d'établissement de connexion.

— Transfert des informations : toutes les informations passeront par ce chemin ou circuit virtuel. La fonction de routage qui est exécutée est caractéristique du service réseau. Cette fonction de routage, que nous allons étudier dans ce paragraphe, est basée sur les informations produites pendant la phase d'établissement. Cette fonction de routage est, en général, plus simple et surtout plus rapide que celle utilisée pendant la phase d'établissement.

— Libération des ressources réservées.

On parle de circuit physique lorsque les voies physiques sont associées deux à deux par un commutateur. Le circuit physique construit une voie matérielle entre la source et le destinataire. Cette technique a longtemps prédominé dans les commutateurs (nœud) téléphoniques. Elle continue à être utilisée en commutation optique. L'inconvénient de la commutation physique est que la voie ne peut être utilisée que par les deux utilisateurs d'extrémité. Elle ne permet donc pas le multiplexage au niveau des commutateurs. Elle est aisée à réaliser au niveau physique. Pour les supports métalliques, une fois la connexion établie, le temps de traitement de fonction de commutation est court : il se résume à une fonction de répéteur de signal.

On parle de circuit virtuel lorsque la voie physique n'est allouée que partiellement aux utilisateurs. Les circuits virtuels permettent aux commutateurs de multiplexer plusieurs circuits virtuels sur une même voie physique. Dans chaque nœud de commutation, la mémoire du circuit virtuel est conservée, et des ressources lui sont affectées. Une fraction de voie est aussi réservée pour chaque circuit virtuel. En pratique, les voies sont multiplexées (cf. paragraphe 2.3.3.) entre les différents circuits virtuels. Qu'il y ait ou non transfert d'information, les fractions de ressources (voies et mémoires dans les nœuds) sont monopolisées entre la phase 1 et la phase 3.

Par exemple, sur la figure 6.10., le circuit virtuel réserve des ressources dans les nœuds 7, 2, 3 et 4 qu'il traverse et consommera une fraction de la bande passante des voies V_{11} , V_4 et V_5 . Les ressources réservées peuvent être des tampons mémoire dans chaque nœud, un numéro d'entrée dans une table, une fraction de la bande passante des voies utilisées, une fraction du temps disponible dans un multiplexage temporel.

On appelle multiplex, M , l'ensemble des flots de données, F , qui peuvent circuler sur une voie. Notons cet ensemble $M_v = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$. Un nœud de commutation crée un circuit virtuel en associant un flot d'un multiplex entrant, M_e , avec un flot d'un multiplex sortant, M_s . Un circuit virtuel, CV , allant de M_e vers M_s est identifié par le couple de flot : $(F_{i,e}, F_{j,s})$. Ce couple sera mémorisé par le nœud pendant toute la durée de vie du circuit virtuel. Toute donnée arrivant sur $F_{i,e}$ sera retransmise sur $F_{j,s}$. Le nœud de commutation possède une table de routage qui contient l'ensemble des couples décrivant le chemin suivi par chaque circuit virtuel passant par ce nœud. De très nombreux réseaux fonctionnent en utilisant ce principe (téléphonique, Transpac, Frame Relay, ATM,...).

6.1.3.1. Commutation d'un multiplex téléphonique

Le réseau téléphonique actuel fonctionne typiquement sur ce principe. Un multiplex, aussi appelé MIC, divise 125 μs en 32 intervalles de temps, appelés IT,

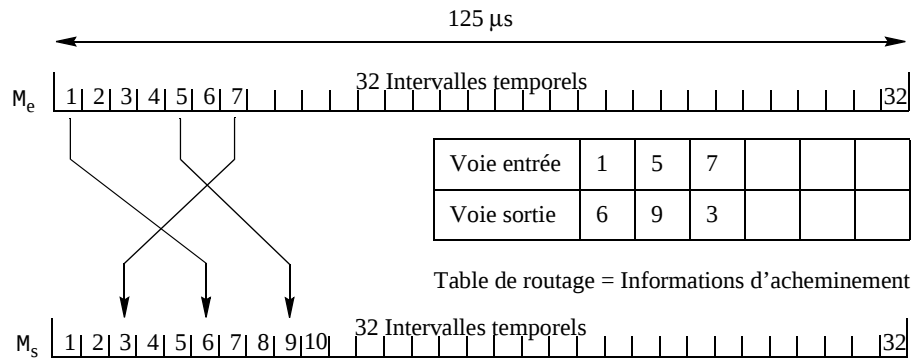


Figure 6.11. Structure d'une table de commutation temporelle (MIC 32) utilisée dans un commutateur

intervalle temporel. Un intervalle dure donc $125/32 \mu s$. Chaque intervalle transmet 8 bits¹. Un circuit téléphonique dans un commutateur est composé de l'association d'un intervalle dans un multiplex entrant avec un intervalle dans un multiplex sortant. Les intervalles de temps sont réservés pour chaque communication téléphonique. Ainsi, sur la figure 6.11., l'intervalle 1 de M_e sera réémis sur l'intervalle 6 de M_s . La table de routage contient les associations entre le numéro du multiplex d'entrée et le numéro du multiplex de sortie. Ils ne peuvent pas être utilisés par une autre communication, même si l'utilisateur ne transmet rien. En contrepartie, on est certain qu'un octet (8 bits) arrivant sur un MIC entrant partira sur le MIC sortant au plus tard $125 \mu s$ après, puisque le chemin est réservé. Le nœud de commutation n'a pas besoin de disposer d'une mémoire importante (dans cet exemple 32 octets par MIC sortant).

Ce réseau est synchrone, c'est-à-dire que la voie d'entrée travaille au même rythme que la voie de sortie. Le délai de transit dépend de l'instant d'arrivée et de l'instant de sortie. Ainsi, un échantillon vocal² (un octet) entré pendant un intervalle i peut soit sortir pendant ce même intervalle de $125 \mu s$, i , soit pendant l'intervalle de $125 \mu s$ suivant, $i+1$, selon sa position de commutation. Sur la figure 6.11, les échantillons 1 et 5 sortiront pendant le même intervalle de $125 \mu s$. Par contre, l'échantillon 7 sortira pendant l'intervalle de $125 \mu s$, suivant contrairement à ce que montre la figure. En effet quand il arrive dans le commutateur, son numéro de multiplex de sortie, ici 3, est déjà parti. Il devra donc attendre le prochain intervalle de temps pour pouvoir sortir. L'avantage de cette technique est que la mémoire d'un commutateur peut être limitée à la taille des multiplex de sortie.

Un échantillon attendra au plus un intervalle de temps pour être retransmis, ce qui borne le délai de transit dans chaque nœud et le délai d'acheminement. Cela est important pour la qualité de service du réseau téléphonique puisque une conversation

1. 7 bits en Amérique du Nord.

2. La voix est bien évidemment numérisée avant transmission.

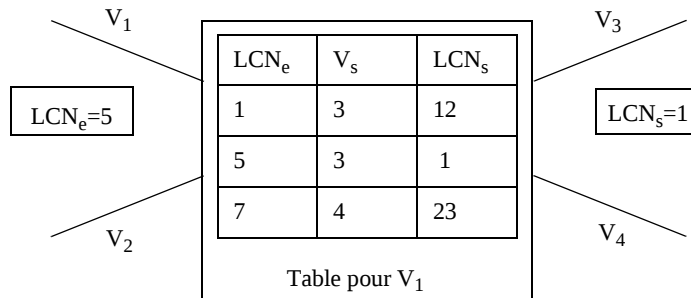


Figure 6.12. Exemple de table de commutation pour des circuits X25 dans un nœud de commutation

téléphonique est par essence interactive. Un délai d'acheminement long ou instable rendrait le service inconfortable pour l'utilisateur.

6.1.3.2. Commutation de voies logiques

Dans l'exercice 5.3, on a vu que chaque paquet X25 possédait un champ appelé, lcn, Logical Circuit Number. Ce numéro est un identificateur de circuit virtuel. Chaque nœud du réseau X25 possède une table de commutation qui associe pour chaque valeur de lcn sur une voie en entrée, donc un couple (V_e, lcn_e), une voie de sortie et une nouvelle valeur de lcn, donc un autre couple (V_s, lcn_s). On n'utilise pas la même valeur de lcn tout au long du circuit virtuel, car, au moment de la construction du circuit, la valeur utilisée sur la voie d'entrée peut être déjà utilisée sur la voie de sortie. Ainsi, sur la figure 6.12, les trames arrivant sur la voie V_1 avec le numéro de circuit logique 5 sont retransmises sur la voie V_3 avec le numéro de circuit logique 1.

Cette technique implique que le nœud de commutation doit recevoir le message pour décider de la voie de sortie puisque celle-ci est indiquée (indirectement par l'intermédiaire du numéro de voie logique) dans l'en-tête¹. Il devra mémoriser ce message jusqu'à ce qu'il ait pu être retransmis sur la voie de sortie. On peut donc modéliser un tel commutateur comme un système de files d'attente. Une file d'attente est associée à chaque voie de sortie. Les messages arrivants sont rangés dans la file de la voie de sortie. Or il est possible que le rythme d'arrivée des messages dirigés vers une même voie de sortie soit supérieur au débit de sortie de la voie. Dans ce cas, la file va se remplir. Comme les ressources mémoire sont limitées, il arrivera des situations, appelées congestion, où le nœud n'aura plus de place pour ranger les nouveaux messages et devra donc les jeter. La figure 6.9. montre un tel exemple de congestion.

Transpac se prémunit contre ces congestions en attribuant à chaque circuit virtuel une quantité de mémoire limitée associée à la fenêtre d'anticipation de LAP-B. Le contrôle de flux de LAP-B sur chaque voie évite que l'utilisateur ne puisse envoyer

1. On peut commencer à effectuer la fonction de commutation dès que l'on a reçu l'en-tête. Cette technique est dite à commutation rapide.

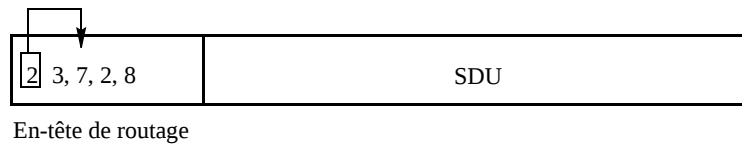


Figure 6.13. Exemple de routage par la source. Le vecteur de routage est dans l'en-tête du message

plus de données qu'il ne peut en sortir. Si cette solution prémunit contre les congestions, elle conduit à gaspiller les ressources mémoire et bandes passante dès qu'un circuit virtuel n'utilise pas la capacité qu'il a réservée.

Les réseaux Frame Relay et ATM utilisent ce même principe de commutation mais ils ne réservent pas nécessairement de mémoire dans les commutateurs. Ils ne mettent pas non plus en œuvre de mécanisme de correction et détection d'erreur ni de contrôle de flux.

6.1.3.3. Routage par la source

Les tables de routage ne sont pas l'unique solution pour construire un circuit virtuel. Ainsi, le navigateur dans un rallye automobile dispose d'un livre de route qui lui indique quelle direction prendre à chaque carrefour. Il ignore la carte globale, il dispose ainsi d'un circuit virtuel. Il utilise séquentiellement les indications de son livre de route pour indiquer la direction à prendre à son pilote. Certains réseaux utilisent ce principe. Chaque message porte dans son en-tête la liste¹ des nœuds à traverser pour aller d'un point à un autre. Il s'agit bien d'une route complète. Chaque nœud regarde dans cette liste le nom du nœud suivant et lui envoie le message.

Il s'agit aussi d'un circuit prédéfini, car l'émetteur doit connaître le chemin à parcourir. C'est-à-dire qu'un algorithme de routage doit, préalablement à l'envoi des messages, lui fournir cette route (cf. paragraphe 7.3.2.), à moins que cette information ne soit mémorisée localement. Ce qui veut dire que les vecteurs de routage ne sont plus mémorisés dans les commutateurs du réseau mais chez les abonnés. La phase d'établissement du circuit consiste en fait à renseigner le nœud émetteur sur le chemin à suivre.

6.1.3.4. Conclusion

On dira qu'une communication se fait en mode connecté s'il y a obligation d'établir la communication avec le correspondant avant toute transmission de données. L'établissement de la connexion doit renseigner chacune des tables de commutation tout au long du circuit.

1. Cette liste est éventuellement partielle. Dans ce cas, une autre fonction de routage est utilisée pour passer d'un nœud de la liste au suivant.

6.2. L'adressage

Nous définirons une adresse comme une « information désignant de manière unique et non ambiguë un abonné¹ du service ». Deux abonnés différents ne peuvent donc pas avoir la même adresse. Chaque service réseau définit son propre espace d'adresses indépendamment des autres services réseau. Réciproquement des abonnés de deux services réseau n'utilisant pas le même espace d'adresses ne peuvent pas se désigner mutuellement. La notion d'adresse est nécessaire dès lors que plusieurs utilisateurs (abonnés) peuvent utiliser un même service. Le concept général de point d'accès (SAP ISO) est une manière de désigner les entités adressables d'un service.

La problématique de l'adressage peut se résumer par le dilemme suivant : simplifier le travail du réseau en demandant à l'utilisateur de connaître une partie de la topologie du réseau, ou simplifier la vie des utilisateurs en les autorisant à construire des noms adaptés à leurs désirs. Il y a de nombreux exemples de ce dilemme. Commençons par un exemple situé en dehors du domaine des réseaux pour illustrer où se situe le problème.

Les plaques minéralogiques des voitures sont, en France, imposées par l'administration, de manière à lui faciliter la recherche du propriétaire de la voiture. Cette adresse comprend un domaine administratif (le numéro du département) et un champs séquentiel (chiffres et lettres) construit selon l'ordre d'arrivée des propriétaires de véhicules au service des immatriculations. Le fichier des plaques est trié naturellement par ordre d'arrivée et par département. Les écritures se font uniquement à la fin du fichier, jamais au milieu. Par contre, le propriétaire de la voiture aura du mal à retenir ce numéro imposé, heureusement il n'a pas vraiment besoin de le transmettre à de nombreuses personnes. Aux Etats-Unis, la philosophie est inverse : l'utilisateur peut choisir sa plaque comme l'on choisit une marque, sous réserve que la chaîne de caractères n'ait pas déjà été réservée. Il lui est ainsi possible de choisir un nom, prénom... facile à retenir. Par contre, l'administration doit gérer un fichier plus complexe. En effet, elle souhaite garder un ordre (alphabétique par exemple) pour faciliter les recherches. Lors d'une nouvelle immatriculation, il peut toujours arriver qu'un nouveau nom (plaque) s'intercale entre deux noms existants.

La Poste vous impose de connaître beaucoup de choses sur votre correspondant : son nom certes, mais aussi le numéro de la rue, le nom de la rue, la ville et le code de la ville. Cette adresse comprend une hiérarchie cartographique très précise. Certes, s'il s'agit de l'adresse d'un ami cher, cela n'est guère gênant. Cela l'est plus quand vous désirez écrire à une société (de téléphone, France Télécom par exemple) pour demander un service à votre domicile. Vous n'avez pas vraiment besoin, sinon envie, de savoir où sont leurs locaux, or cela est nécessaire pour leur écrire. Comme utilisateur, la seule chose qui vous importe est que France Télécom reçoive votre demande d'abonnement et vienne vous installer votre téléphone. C'est une complication dans la vie de l'utilisateur, qui doit chercher la bonne adresse dans un annuaire. Si la société a plusieurs adresses, il faut découvrir la bonne. Si le service des

1. Le concept d'abonné ne doit pas être assimilé à un individu. Une société ayant des milliers de personnes accessibles peut être un seul abonné. Un service télématique est aussi un abonné.

abonnements change, tous les annuaires (et les copies partielles que vous avez dans vos carnets d'adresses) deviennent périmés. Cet exemple fait apparaître deux concepts d'adressage très différents :

— adresse hiérarchique : l'adresse comprend une structure hiérarchique (pays, département, rue, numéro de porte, boîte aux lettres). Cette structure simplifie la vie du service chargé du routage, c'est évident. Par contre chaque utilisateur doit régulièrement vérifier les adresses qu'il utilise ;

— adresse logique : plate ou symbolique, l'adresse est unique et universelle, choisie par l'utilisateur, mais sans information sur la localisation. Ainsi, France Télécom aura une seule adresse : son nom pour les utilisateurs. S'il a plusieurs points d'accès, le service de routage dirigera l'information vers le point d'entrée le plus proche du point de dépôt de la lettre par exemple. Seul le service de routage aura besoin de connaître les changements d'adresses. Les annuaires publics ne se périment que lorsqu'un nom disparaît.

6.2.1. Adressage Internet

L'adresse IP, ou adresse Internet, est un identificateur de longueur fixe, 4 octets (32 bits) associé à une machine. Il se présente comme une suite de 4 nombres décimaux, compris entre 1 et 254, et séparés par des points : a . b . c . d. Les valeurs 0 et 255 sont réservées pour la diffusion. Ce système d'adressage n'est pas hiérarchique ; néanmoins une machine appartient à un sous-réseau, qui fait partie lui-même d'un plus grand réseau. L'espace des adresses est divisé en classes :

— Adresses de classe A (1.x.x.x à 127.x.x.x)

0	net_id (7 bits)	host_id (24 bits)
---	-----------------	-------------------

Elles commencent par un bit à 0¹. Les 7 bits suivants codent le numéro de réseau, et les 24 derniers sont le numéro de machine (host_id²). Il existe donc 127 réseaux de classe A et plus de 16 millions de machines sur chacun de ces réseaux (16 777 214).

— Adresses de classe B (128.0.x.x à 191.255.x.x)

1	0	net_id (14 bits)	host_id (16 bits)
---	---	------------------	-------------------

Elles commencent par deux bits 10 suivis de 14 bits pour l'adresse de réseau, 16 pour celle de la machine². Il y a donc potentiellement 16 383 réseaux de classe B et 65 534 machines sur chacun de ces réseaux.

1. ARPANET, le réseau de la Défense américaine, est un réseau de classe A.

2. lorsque les bits réservés à la désignation de la machine (host_id) ont une valeur toute à 0 ou toute à 1 (0 ou 255 pour un octet) l'adresse a une signification particulière. Ces deux valeurs ne peuvent être attribuées à aucune machine.

— Adresses de classe C (192.0.0.x à 223.255.255.x)

1	1	0	net_id (21 bits)	host_id (8 bits)
---	---	---	------------------	------------------

Elles commencent par trois bits 110 suivis de 21 bits pour l'adresse de réseau, 8 pour celle de la machine (cf. aussi note 2 page 252). Ce qui permet 2 millions de réseaux de classe C (2 097 151) et 254 machines sur chacun de ces réseaux.

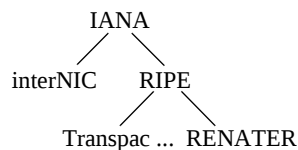
— Adresses de classe D (224.0.0.0 à 239.255.255.255)

1	1	1	0	adresses diffusion (28 bits)
---	---	---	---	------------------------------

Elles ne désignent pas une machine unique, mais un groupe de machines. Elles sont utilisées pour faire de la diffusion limitée de données, appelée *multicast*.

— Adresses de classe E (240.0.0.0 à 255.255.255.255)

1	1	1	1	réservées pour usage futur
---	---	---	---	----------------------------



Avant de pouvoir connecter un réseau à Internet, il est nécessaire de contacter une autorité centrale, l'IANA, *Internet Address Network Authority*, au niveau mondial, qui distribue au NIC, *Network Information Center*, à RIPE, Réseaux IP européens... des espaces de numéros de réseau, afin d'obtenir un numéro de réseau (net_id) inutilisé. En France, l'organisme chargé d'attribuer des adresses Internet

aux utilisateurs est actuellement RENATER.

Il n'y a pas de correspondance directe entre une adresse et une position géographique. Une société internationale peut obtenir une adresse de classe B. Elle utilisera cet espace d'adresses pour attribuer à chacun de ses sites, quelle que soit la position géographique, des adresses pour ses machines. On appelle plan d'adressage cette allocation d'adresses aux différents sites.

Lorsque l'on utilise les services d'Internet, on n'utilise en général pas directement ces adresses mais les adresses décrites aux paragraphes 1.8.1. et 1.8.2. Ces adresses sont structurées de manière hiérarchique : <Nom du destinataire>@ <Nom de sous-domaine>.<Nom de domaine>.<Nom de pays ou Grand domaine>.

Le passage de ces adresses symboliques compréhensibles par des humains aux adresses Internet est fait par un service d'annuaire, appelé *name server*, qui permet la traduction d'une adresse symbolique en une adresse IP. Ce service utilisait initialement des fichiers d'annuaire locaux à votre machine (fichier */etc/hosts*). Actuellement, il est réalisé par un système de serveurs répartis qui dialoguent entre eux pour traduire le nom. Chaque serveur connaît les adresses du domaine qu'il administre.

6.2.2. Adressage hiérarchique : exemple du téléphone

Pour illustrer, prenons le plan d'adressage téléphonique que nous avons introduit dans le paragraphe 1.2.3.7. Votre numéro de téléphone est une adresse. Cette adresse est hiérarchique, numéro de région (98 pour Brest), puis numéro de secteur et enfin numéro de Poste dans le secteur. Votre adresse est diffusée dans un annuaire construit par ordre alphabétique, car évidemment un numéro n'a guère de sens pour un humain. L'annuaire sert à faire la traduction nom symbolique-adresse. Généralement vous avez des copies partielles de l'annuaire dans vos propres répertoires, calepins, agendas, bottins... Vous savez tous ce qui se passe quand un ami déménage : il change en général de secteur et de ce fait change de numéro de téléphone. Du coup, vos répertoires sont périmés et il est très difficile de les mettre à jour, simplement parce que vous ne les avez pas tous sous la main (accessibles en écriture pour un ordinateur) au moment où vous êtes informé du changement d'adresse.

Le même problème que pour le courrier existe quand vous voulez vous adresser à une société : vous devez trouver son numéro. Si cette société a de nombreux points d'entrées c'est à vous de déterminer le bon. Pour résoudre ce problème, pour certains services, France Télécom a développé le concept de numéro national. Lorsque vous faites le 3615, vous n'avez pas à connaître à quel point d'accès Transpac le réseau téléphonique vous a raccordé. Un numéro national est une adresse plate ou adresse logique : c'est le service qui détermine le meilleur point d'accès et non l'utilisateur.

De la discussion précédente il apparaît clairement que le débat porte sur la place de l'annuaire, ou plus exactement sur qui consulte l'annuaire : l'utilisateur ou le service. Il faut de toute façon obtenir la correspondance point d'accès physique ou logique-nom. Nous admettons dans la suite de cet ouvrage que les adresses renseignent la fonction de routage sur la destination finale¹.

Pour conclure sur l'adressage, disons que celui-ci est souvent hiérarchisé dans les réseaux publics. On appelle domaine un niveau dans la hiérarchie qui a l'autorité pour attribuer de nouvelles adresses. Ainsi, chaque compagnie téléphonique possède son propre domaine, dans lequel elle gère son espace d'adresses. La structure de celui-ci peut changer (changement du plan de numérotation France Télécom) sans que les autres domaines aient à en souffrir (les domaines, pas les usagers).

Sur les figures représentant un réseau maillé que nous utilisons dans ce chapitre, nous avons des noms notés 1 à 8. L'adresse d'un abonné A du nœud 7 pourrait s'écrire A.7 (adresse hiérarchique). On admettra que 7 est une adresse connue de tous dans le réseau, car nous supposons le problème de localisation résolu.

1. On notera tout de même qu'il n'existe pas toujours une correspondance permanente entre nom et adresse ou position physique. C'est le cas en particulier des mobiles (téléphonie mobile, informatique nomadique - portables...). Dans ce cas, la correspondance ne peut être faite par un annuaire statique mais doit être construite dynamiquement.

6.3. Routage dans le réseau téléphonique

Ce paragraphe illustre la fonction de routage et d'établissement des chemins dans le réseau téléphonique. L'algorithme utilisé pour la recherche des chemins n'est pas abordé. La commutation est la fonction intelligente du réseau. C'est elle qui va assurer l'aiguillage de la communication et le choix de l'itinéraire. Le terme commutateur est utilisé en téléphonie : il a la même signification que les termes routeur ou nœud utilisés dans ce chapitre.

6.3.1. Concept de commutation

Soit N sources (A, B, C, D, E, F...) pouvant émettre ou recevoir des messages. Nous voulons assurer une liaison entre 2 sources quelconques, et cela au moindre coût et en minimisant les investissements.

Une première solution consiste à relier ces N sources 2 à 2 par des liaisons point à point. Le nombre de liaisons est $(N(N-1))/2$. Au lieu de relier en permanence A, B... entre elles 2 à 2, on peut constituer entre chaque source et un ensemble appelé « commutateur » (ou « autocommutateur ») une liaison unique permanente. A la demande de l'une des sources, l'autocommutateur établit une liaison temporaire pendant toute la durée d'un échange avec une autre source (cf. figure 6.14.), autrement dit des groupes de voies multiplexées (cf. paragraphe 2.3.3.). Le nombre de liaisons permanentes est réduit à N .

6.3.2. Concept de réseau commuté

Il n'est pas toujours réaliste (sur un plan économique) de relier toutes les sources à un seul commutateur dès que la zone géographique couvrant celles-ci s'étend. Les liaisons seraient longues et onéreuses. Dans ces conditions, un commutateur dessert une zone géographique limitée. Le service téléphonique universel est assuré en interconnectant les commutateurs entre eux par des « faisceaux de circuits » (cf. figure 6.15.).

En général, on spécialise les commutateurs en introduisant des « commutateurs de transit » qui ne sont pas directement reliés à des sources, mais qui interconnectent les commutateurs eux-mêmes.

6.3.3. Concept de réseau commuté hiérarchisé

Un calcul économique montre que le rendement d'un faisceau de circuits (groupement de voies physiques) est d'autant plus élevé que ce faisceau est plus important¹, ce qui conduit à hiérarchiser tous les réseaux téléphoniques. Les abonnés sont raccordés à des commutateurs locaux qui sont eux-mêmes raccordés à des

1. Il s'agit d'une application du principe de non-linéarité de la loi du trafic, dite d'ERLANG.

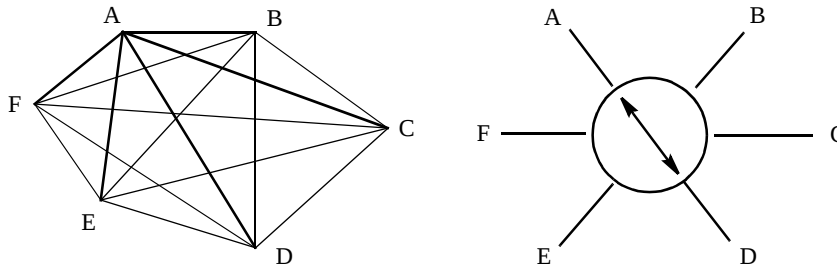


Figure 6.14. Concept de commutation

commutateurs de transit jusqu'aux commutateurs pouvant accéder au réseau international (cf. figure 6.15.).

6.3.4. Acheminement de la communication

Dans le vocabulaire très spécifique de la téléphonie, l'acheminement est la description de la suite des commutateurs par lesquels doit passer la communication ou de manière équivalente de la suite des faisceaux de circuits empruntés. Cet acheminement suppose la connaissance de l'adresse de l'abonné demandé (numéro). Celle-ci répond à un plan d'adressage dit en téléphonie « plan de numérotage » tel que chaque abonné possède une adresse unique universelle.

En outre, au moment de l'établissement de la communication, chaque commutateur traversé doit choisir un itinéraire en sortie. Cette opération est prise en compte par la fonction de routage. En téléphonie elle est déterministe, ce qui signifie que le choix est prédéterminé par une table de routage. Celle-ci fixe pour chaque adresse de destination (numéro de l'abonné demandé) l'itinéraire à emprunter en sortie (c'est-à-dire l'adresse du faisceau de circuits qui permettra de joindre le commutateur suivant). Ce faisceau porte le nom de « faisceau de premier choix ». S'il est complètement occupé (ou saturé)¹, la table fournit l'adresse d'un second faisceau de sortie dit « faisceau de second choix ». S'il est également occupé, le routage mis en œuvre en France prévoit l'échec de l'acheminement de la communication. Les tables de routage, qui portent aussi le nom de « tables de traduction » en téléphonie, sont mises à jour par les exploitants du réseau (à partir d'un site central). La stratégie de routage relève d'une planification nationale du réseau.

1. Un faisceau dispose d'un nombre fini de voies temporelles en sortie. Par exemple, un faisceau de 32 multiplex MIC peut écouler 960 communications téléphoniques. Un MIC correspond à 32 canaux (IT) dont 30 sont utilisés pour les circuits téléphoniques. Lorsque ces 960 canaux sont pris, il n'est plus possible d'accepter une nouvelle communication sur ce faisceau. Un canal (intervalle temporel d'un MIC) est réservé pour une communication téléphonique unique et ne peut en aucun cas être réutilisé par une autre.

Une fois la communication établie, l'itinéraire emprunté par celle-ci reste le même pendant toute sa durée. On peut donc considérer qu'un circuit est mis à la disposition de deux abonnés à travers le réseau. D'où le nom de «commutation de circuits».

Cette notion de commutation de circuits est illustrée sur la figure 6.15. Deux abonnés A et B sont en communication. Le réseau téléphonique commuté est un graphe avec des nœuds (commutateurs) et des arcs (faisceaux de circuits) dans lequel on peut identifier le chemin logique emprunté par le « circuit » entre A et B et qui va demeurer fixe pendant toute la durée de la communication. Les autocommutateurs traversés et les faisceaux utilisés sont repérés.

6.3.5. Transmission

C'est la partie du réseau qui permet de relier les autocommutateurs entre eux : il correspond pour l'essentiel à la couche physique. De nombreuses techniques sont utilisées pour assurer le transfert des signaux électriques avec une qualité suffisante :

- transmission basse fréquence, ou BF (transmission simple du signal sur une paire de fils et utilisable seulement sur de courtes distances) ;
- transmission MIC (modulation par impulsions et codage). Elle utilise le groupe d'ordre 1 (30 voies cf. 6.11.) ;
- transmission haute fréquence (HF).

Dès que les voies à transmettre sont nombreuses et les distances longues, il n'est pas économique de les transmettre une par une : on les multiplexe (multiplexage en fréquence ou multiplexage temporel).

La transmission est soumise aux mêmes règles d'économie d'échelle que le reste du réseau téléphonique (multiplexage des voies de transmission...).

6.3.6. Bilan : la chaîne de communication

On se reportera à la figure 6.17. qui reprend les 3 fonctions du réseau d'interconnexion des abonnés : distribution, commutation, transmission.

6.3.7. Plans directeurs de l'architecture

Cette brève introduction de l'architecture du réseau téléphonique illustre la complexité de celui-ci et l'impérieuse nécessité de plans techniques fondamentaux normalisés à un niveau international : plan de numérotage, plan de transmission, plan d'acheminement, plan de blocage, plan de taxation. Le plan de numérotage est traité au paragraphe 1.2.3.7. Seul le plan d'acheminement est détaillé dans ce paragraphe.

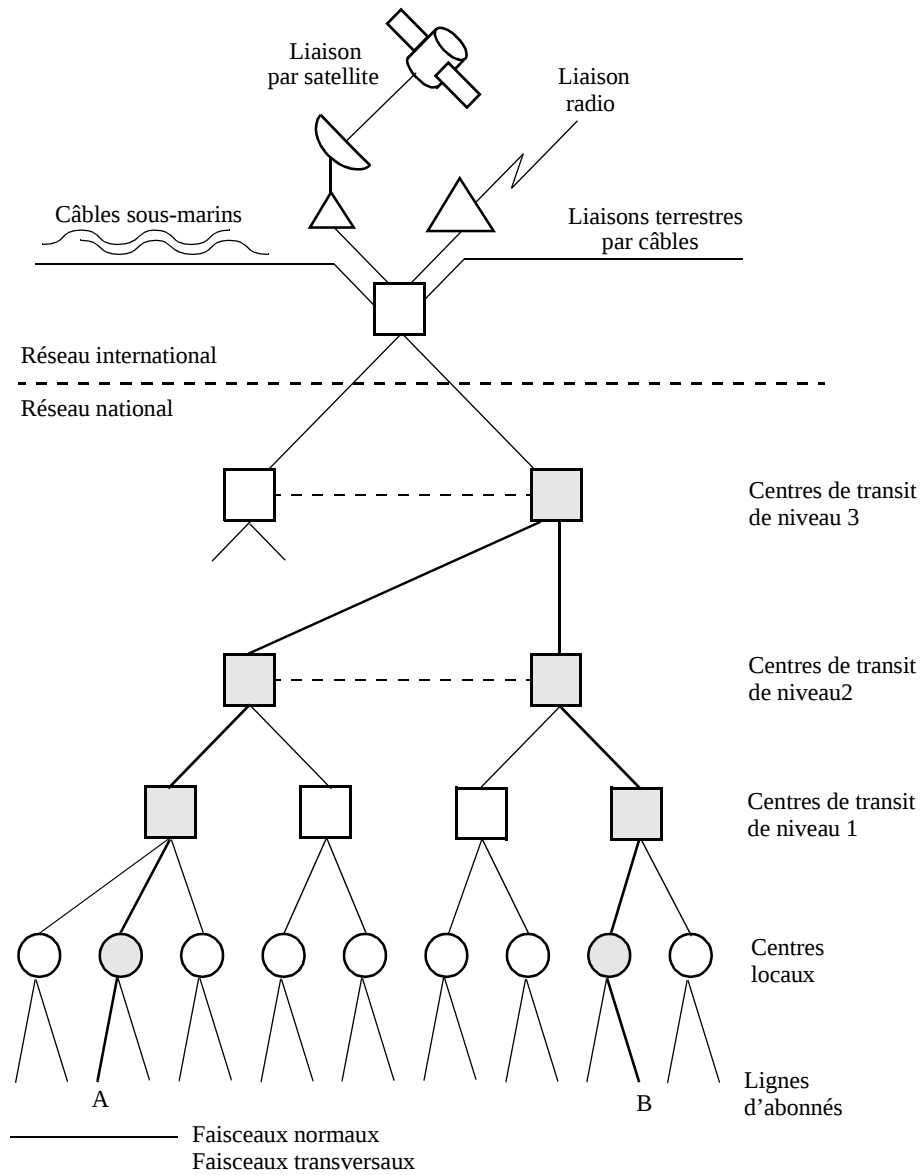


Figure 6.15. Illustration du concept de commutation de circuits

6.3.7.1. *Plan de transmission*

Ce plan impose des contraintes d'affaiblissement et de distorsion maximales sur le signal. Celles-ci sont réparties dans les différents sous-ensembles du réseau de telle manière que leur addition sur toute la chaîne reste inférieure à la contrainte globale. L'objectif est évidemment que deux abonnés quelconques puissent converser avec une qualité suffisante.

6.3.7.2. *Plan de blocage*

Il définit la qualité de service dans le réseau. Celle-ci est mesurée par la probabilité de non-établissement d'une communication. Sa compréhension suppose une connaissance minimale de la théorie du trafic téléphonique.

6.3.7.3. *Plan de taxation*

Il définit la stratégie de paiement des communications en fonction de la distance, de la durée...

6.3.7.4. *Plan d'acheminement*

Nous nous placerons dans le cas particulier du réseau français, mais les principes décrits ci-dessous sont utilisés dans les réseaux téléphoniques du monde entier. Le réseau français comprend 4 niveaux hiérarchiques (cf. figure 6.16.) :

- niveau 1 : 9 centres de transit principaux (CTP),
- niveau 2 : environ 60 centres de transit secondaire (CTS) regroupés en environ 45 zones de transit secondaire (ZTS),
- niveau 3 : environ 1 500 centres à autonomie d'acheminement (CAA),
- niveau 4 : environ 6 000 centres locaux (CL).

Seuls les niveaux 1 à 3, CAA, CTS et CTP, ont la capacité à acheminer la communication à travers le réseau. Les centres locaux ne peuvent qu'établir des communications avec des abonnés qui leur sont directement raccordés. Si une communication est distante, le centre local passe le relais à son supérieur hiérarchique, le centre à autonomie d'acheminement. A noter également que beaucoup d'abonnés sont directement raccordés sur des centres à autonomie d'acheminement.

6.3.8. *Etablissement d'une communication*

Pour répondre à la question « que se passe-t-il quand on téléphone ? », nous allons décrire une communication téléphonique nationale très ordinaire entre deux abonnés. Le demandeur A habite dans le nord de la France, le demandé B réside en Corse-du-Sud.

A dispose d'un poste téléphonique à clavier multifréquences. Son centre de rattachement est un centre local dépendant hiérarchiquement du CAA d'Armentières. Son numéro est ABPQMCDU.

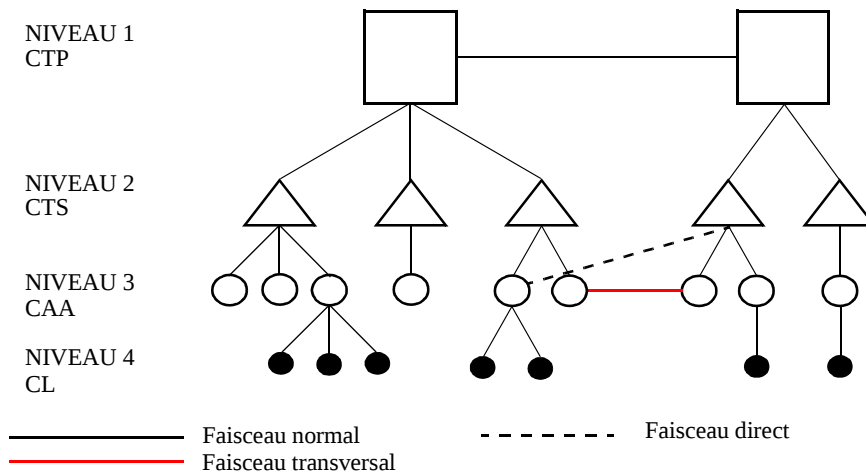


Figure 6.16. Organisation hiérarchique du réseau français

B est relié directement au CAA de Sartène en Corse-du-Sud. Son numéro est A'B'P'Q'M'C'D'U'.

L'exemple choisi est volontairement très simplifié : on suppose en particulier qu'il n'y a pas d'incident au cours de l'établissement. L'exemple n'est pas représentatif de l'établissement d'une communication dans un réseau « moderne » comme le RNIS (Réseau numérique à intégration de services). Le protocole de communication (signalisation) est ancien. Le lecteur se reportera aux ouvrages traitant du protocole CCITT n°7 pour approfondir ses connaissances.

Nous connaissons les principaux sous-ensembles de la chaîne de communication : postes, lignes d'abonnés, autocommutateurs, faisceaux de circuits, et nous allons suivre ce que fait chacun d'eux au cours des principales phases successives de l'établissement de la communication. On pourra se reporter à la figure 6.18. concluant ce paragraphe.

Nous ne détaillerons pas le fonctionnement interne des autocommutateurs traversés et nous nous limiterons à leurs échanges avec les abonnés ou le réseau.

Phase 1 : décrochage de l'abonné demandeur A

La communication commence quand A décroche le combiné qui reposait sur le crochet commutateur de son poste. Le poids du combiné maintenait ouverts les contacts de ce crochet commutateur ; le décrochage provoque la fermeture de ces contacts et l'établissement d'un chemin électrique entre les deux fils de la ligne d'abonné permettant à un courant continu d'y passer (le poste est téléalimenté par le centre local).

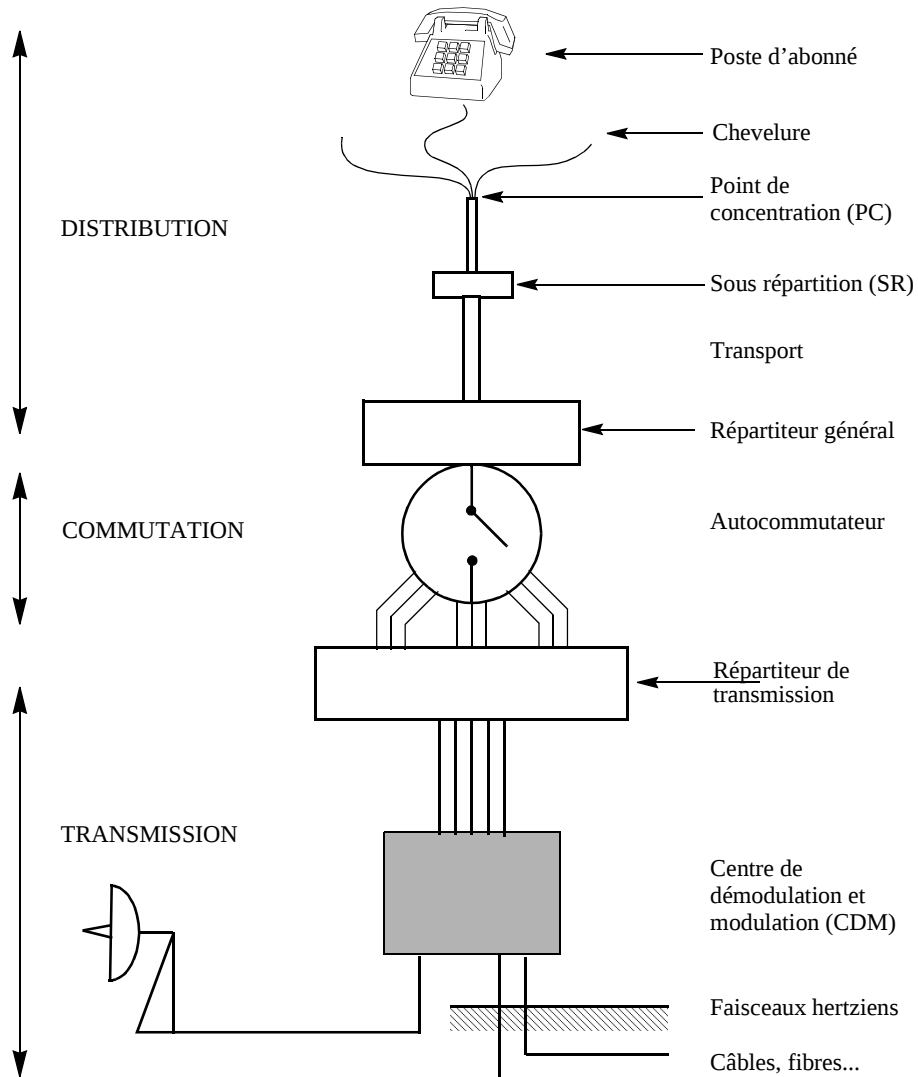


Figure 6.17. Chaîne de communication

Dans le langage imagé des téléphonistes, cet état est appelé « boucle fermée ». Un capteur associé à chaque ligne d'abonné détecte la présence du courant et provoque un changement d'état logique : « boucle ouverte » vers « boucle fermée ».

Phase 2 : détection du décrochage par le centre local

Le centre local scrute cycliquement l'état des lignes d'abonnés au repos (période voisine de 500 ms). Il détecte le changement d'état et se met en position de réception du numéro de l'abonné demandé. En téléphonie, cette fonction est appelée « exploration ».

Phase 3 : émission de la tonalité d'« invitation à numéroté »

Dès que le centre local est en mesure de recevoir la numérotation, il émet une tonalité d'« invitation à numéroté ».

Phase 4 : numérotation par l'abonné demandeur

A dispose d'un poste à « clavier multifréquences ». La frappe d'une touche provoque l'émission d'un couple de deux fréquences qui seront détectées par le centre local (se reporter au tableau suivant). Chaque couple comprend une fréquence « haute » F_i et une fréquence « basse » f_j , comprises dans la bande de fréquences téléphonique 300-3400Hz.

$F1 = 1209 \text{ Hz}$; $F2 = 1336 \text{ Hz}$; $F3 = 1477 \text{ Hz}$; $F4 = 1633 \text{ Hz}$

$f1 = 697 \text{ Hz}$; $f2 = 770 \text{ Hz}$; $f3 = 852 \text{ Hz}$; $f4 = 941 \text{ Hz}$

Correspondance Touche-Fréquences

	F1	F2	F3	F4
f1	1	2	3	A
f2	4	5	6	B
f3	7	8	9	C
f4	*	0	#	D

Phase 5 : « Enregistrement de la numérotation » par le centre local

Après décodage des combinaisons bifréquences (simple filtrage), le centre local peut mémoriser provisoirement le numéro du demandé A'B'P'Q'M'C'D'U'. Le terme « enregistrement » est propre au vocabulaire de la téléphonie. Il peut être remplacé par mémorisation.

Phase 6 : analyse du numéro par le centre local

Une analyse des 2 premiers chiffres suffit. L'appel ne concerne pas le centre local, qui doit passer le relais à son supérieur hiérarchique : le centre à autonomie d'acheminement d'Armentières. Cette analyse fait appel aux informations de routage respectant le plan d'acheminement. En téléphonie, on utilise les termes « traduction » du numéro demandé, les informations de routage étant contenues dans des « mémoires de traduction ». Ici, il s'agit d'une « traduction partielle ».

Phase 7 : transmission du numéro au CAA d'Armentières

Cette transmission est précédée d'une opération dite « prise » d'un circuit vers le CAA.

Phase 8 : « Enregistrement » et « Traduction » par le CAA d'Armentières

Le CAA d'Armentières a la capacité de choisir un faisceau de sortie pour débiter l'acheminement de la communication. Après mémorisation du numéro et grâce aux informations de routage contenues dans les « tables de traduction », il sélectionne un faisceau de sortie de « premier choix » que nous supposerons libre.

On trouve donc dans les tables de routage (« tables de traduction ») du CAA d'Armentières les informations suivantes : Indicatif A'B' = 95 <=====> adresse physique du faisceau de premier choix vers Lille + adresse physique du faisceau de débordement (second choix) défini par l'exploitant du réseau.

Le programme informatique de commande du CAA d'Armentières trouve directement l'adresse du faisceau de sortie correspondant à l'acheminement d'une communication vers un abonné Corse, dont le numéro débute par l'indicatif 95.

Phase 9 : sélection d'un circuit vers Lille

En téléphonie, on dit qu'il y a « prise » du circuit.

Phase 10 : envoi par le CTP de Lille de l'« invitation à transmettre »

Il s'agit d'une information indiquant au CAA d'Armentières qu'il peut transmettre la numérotation.

Selon les protocoles de communication utilisés (« codes de signalisation »), il y a plusieurs stratégies possibles. Nous nous placerons dans un cas particulier dans lequel les centres de transit ne s'échangent que les 4 premiers chiffres A'B'P'Q'.

Phase 11 : émission par le CAA d'Armentières des 4 premiers chiffres

Ces 4 chiffres 95PQ sont bien sûr accompagnés d'informations complémentaires selon le code de signalisation utilisé.

Phase 12 : « Enregistrement » et « traduction » par le CTP de Lille

On retrouve les opérations que nous avons détaillées dans la traversée du CAA d'Armentières : mémorisation des chiffres, consultation des « tables de traduction » et choix du faisceau de sortie. S'agissant d'une communication à grande distance, on supposera que les tables proposent un routage de « premier choix » en direction du CTP de Marseille, qui se trouve deux niveaux hiérarchiques au-dessus du CAA de destination.

Phase 13 : « Prise » d'un circuit vers le CTP de Marseille et établissement d'un itinéraire traversant le CTP de Lille

Ayant sélectionné un circuit vers Marseille, le CTP de Lille devient « transparent ». Un circuit est donc établi entre le CAA d'Armentières et le CTP de Marseille.

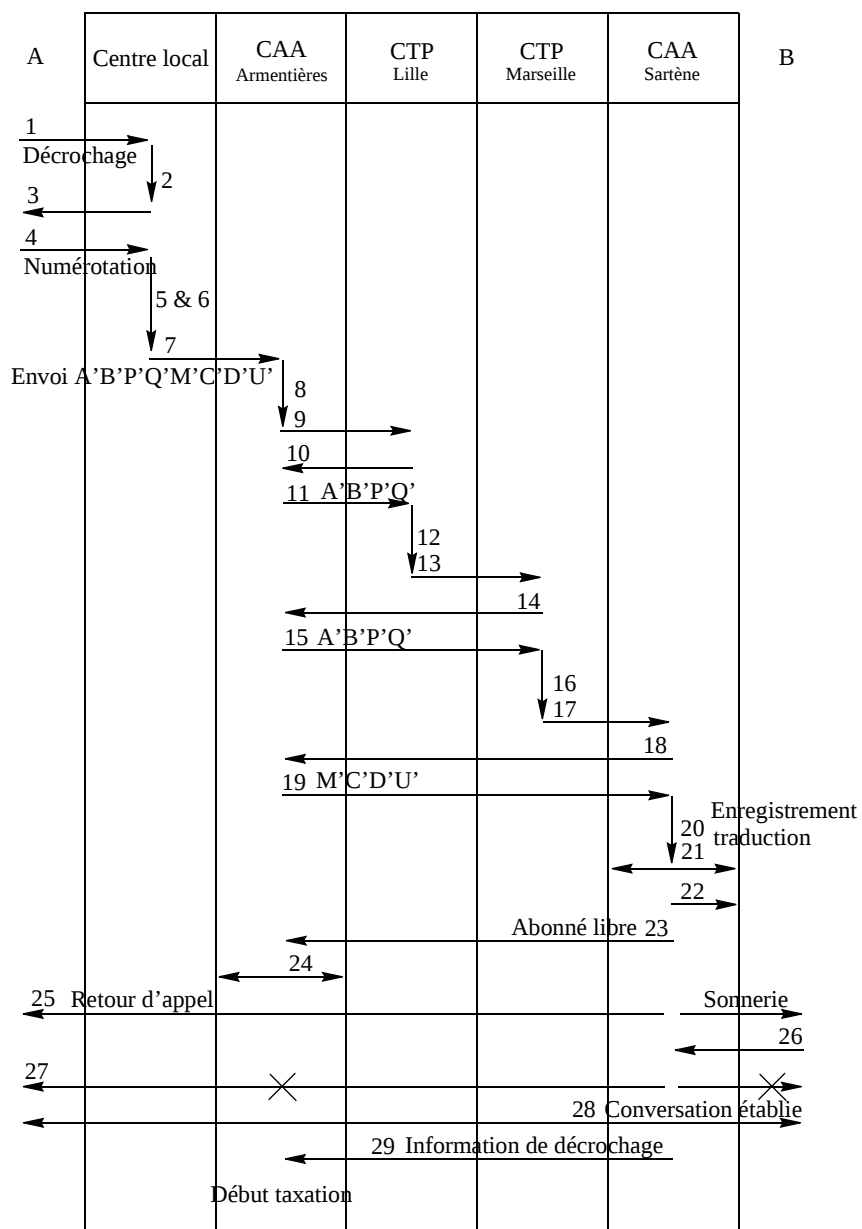


Figure 6.18. Chronogramme résumant les principales phases de l'établissement d'une communication téléphonique

Phase 14 : envoi par le CTP de Marseille de l'« invitation à transmettre » au CAA d'Armentières

Phase 15 : 2^e envoi des 4 premiers chiffres par le CAA d'Armentières

Phase 16 : « Enregistrement » et « traduction » par le CTP de Marseille

Les tables de routage (« traduction ») fournissent l'adresse du faisceau de Sartène.

Phase 17 : « Prise » d'un circuit vers le CAA de Sartène et établissement d'un itinéraire traversant le CTP de Marseille

On retrouve le même principe de fonctionnement : le CTP de Marseille devient transparent et un circuit relie le CAA d'Armentières et le CAA de Sartène. Il manque au CAA de Sartène l'adresse de l'abonné demandé : M'C'D'U'.

Phase 18 : émission par le CAA de Sartène de l'invitation à transmettre les 4 derniers chiffres

Phase 19 : envoi par le CAA d'Armentières des 4 derniers chiffres

Phase 20 : « Enregistrement » et « traduction » par le CAA de Sartène

Les tables de traduction du CAA de Sartène fournissent la correspondance entre l'adresse logique de l'abonné demandé au sein du central (M'C'D'U') et son adresse physique (repérage de la paire de cuivre qui relie le central au domicile de l'abonné).

En général, rendu à cette étape de l'établissement de la communication, on fait une réservation d'itinéraire au sein du CAA de destination avant de vérifier que l'abonné est « libre ». Nous nous placerons donc dans cette hypothèse.

Phase 21 : réservation de l'itinéraire reliant à l'intérieur du CAA de Sartène l'arrivée du circuit de Marseille et la ligne d'abonné du demandé.

Phase 22 : test de l'état de la ligne de l'abonné demandé

On observera ici l'inconvénient de l'acheminement dit « pas à pas » : on peut avoir mis en œuvre une chaîne de communication complexe pour s'apercevoir in fine que l'abonné est en communication. Le réseau n'a aucune vision globale de l'état d'occupation. Il faudra attendre la mise en place d'un réseau de signalisation séparé du réseau de transport de la voix pour éliminer ce grave inconvénient.

Le test se fait de manière simple par observation de l'état logique de la « boucle » de l'abonné demandé. Nous supposerons que l'abonné est libre.

Phase 23 : envoi par le CAA de Sartène vers le CAA d'Armentières de l'information « Fin de sélection, abonné libre »

Phase 24 : établissement à l'intérieur du CAA d'Armentières de l'itinéraire reliant la ligne d'abonné de A et l'arrivée du circuit de Lille

Un circuit relie directement l'abonné A au CAA de Sartène. Il ne manque plus qu'à mettre en place le dernier maillon à l'intérieur de ce CAA.

Phase 25 : émission par le CAA de Sartène du signal «retour d'appel» vers A et envoi du courant de sonnerie sur la ligne de l'abonné B

Pour prévenir B, le CAA d'Armentières émet un courant alternatif qui va actionner la sonnerie du poste de B et se met en attente du décrochage de B. (Entre 2 « trains de sonnerie », il teste l'état de la « boucle » de B.)

Parallèlement, il envoie via le circuit le reliant à A le signal dit « de retour d'appel » qui est une tonalité cadencée dans la bande de fréquences 300-3400 Hz. Pour simplifier, on suppose que B décroche dans un délai raisonnable.

Phase 26 : détection du décrochage de B par le CAA de Sartène

Phase 27 : suppression de l'envoi du courant de sonnerie et de l'envoi du signal de « retour d'appel »

Phase 28 : mise en place de l'itinéraire à l'intérieur du CAA de Sartène

La conversation peut débuter.

Phase 29 : envoi par le CAA de Sartène au CAA d'Armentières de l'information de décrochage

Cela va permettre au CAA d'Armentières de débuter la taxation de la communication.

6.4. Conclusion

Ce chapitre montre les principales techniques de routage. Un réseau peut mettre en œuvre plusieurs de ces techniques pour réaliser son service. Pendant les phases de transmission d'information, il est essentiel que la fonction de routage puisse s'exécuter le plus rapidement possible.