

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

*Bureau de développement des télécommunications*



**R a p p o r t   f i n a l**

**Réseaux IP:**

**Tarification des services de télécommunication**

Activité 4335 du programme 4.1 du Plan opérationnel VAP 2002

Unité de marché, économie et finances

**Janvier 2003**

## TABLE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
1	Introduction..... 6
2	Aperçu de l'Internet et des réseaux IP..... 8
2.1	Couches de réseau ..... 8
2.2	Structure de la connectivité de l'Internet ..... 9
2.3	Adressage sur l'Internet ..... 11
3	Qualité de service: aspects techniques..... 12
3.1	La qualité de service sur les réseaux IP ..... 12
3.2	Catégories de qualité de service ..... 14
3.2.1	Qualité de service (QoS) ..... 15
3.2.2	Type de service et classe de service ..... 15
3.2.3	Niveau de service ..... 16
3.3	Catégories de qualité de service ..... 16
3.3.1	<i>IntServ</i> ..... 16
3.3.2	<i>DiffServ</i> ..... 18
3.3.3	Qualité de service et mode ATM..... 19
3.4	Contraintes techniques entravant le développement de services QoS et Cos ..... 21
3.4.1	Problèmes de qualité de service aux limites de l'Internet et à l'intérieur des réseaux..... 21
3.4.2	Problèmes de qualité de service intervenant aux limites de réseau..... 22
4	Qualité de service: tarification et encombrement ..... 23
4.1	L'Internet n'est pas un "bien" économique "public" ..... 23
4.2	Structure des prix et structure des coûts ..... 24
4.3	Tarification en fonction de la classe de service ..... 30
4.4	Tarification et qualité de service entre un fournisseur ISP et son fournisseur de transit ..... 32
4.4.1	Structure des prix de règlement ..... 32
4.4.2	Garanties de qualité de service associées au trafic de transit ..... 34
4.5	La qualité de service et l'Internet nouvelle génération..... 35
4.6	Conclusions relatives à la qualité de service et aux classes de service ..... 38
5	Les services IP "temps réel", aujourd'hui et demain..... 39
5.1	Service VoIP existant ..... 39
5.1.1	Téléphonie IP publique sur réseaux IP propriétaires..... 40
5.1.2	Contournement de la taxe de répartition internationale ..... 42
5.1.3	Téléphonie IP privée sur réseaux IP d'entreprise ..... 45

	<b>Page</b>
5.1.4 Technique d'acheminement IP propriétaire .....	45
5.2 Futurs réseaux IP "temps réel" .....	45
5.2.1 Considérations techniques .....	45
5.2.2 Tarification et règlements .....	47
6 Analyse des travaux de recherche sur la tarification des services Internet.....	47
7 Questions réglementaires relatives au protocole IP .....	50
7.1 Réglementation et fournisseurs ISP.....	50
7.2 Réglementation et opérateurs RTPC historiques.....	52
7.3 Réglementation et opérateurs mobiles de la nouvelle génération.....	54
Annexe I – Qualité de service et limites associées à l'accroissement d'une largeur de bande peu coûteuse .....	59
Annexe II – Etudes théoriques sur la tarification et les classes de service .....	62
Annexe III – Attributs de qualité de service des réseaux ATM.....	67

## LISTE DES FIGURES

	<b>Page</b>
Figure 2-1 – Modèle OSI et pile de protocoles Internet .....	8
Figure 2-2 – Interconnexions horizontales et verticales sur l'Internet .....	10
Figure 2-3 – Adresse Ipv4 exprimée en notation décimale pointée.....	12
Figure 3-1 – Spécifications de qualité de service (taux de perte de paquets et de variation de temps de retard) pour différentes applications .....	14
Figure 3-2 – Bits de priorité IP du champ ToS d'un en-tête de paquet IPv4 .....	15
Figure 3-3 – Les trois niveaux de qualité de service de bout en bout (service assuré au mieux, service différencié et service garanti) .....	18
Figure 3-4 – Coordination et qualité de service supérieure de bout en bout .....	23
Figure 4-1 – Structure de la demande de services Internet.....	31
Figure 4-2 – Mise en correspondance des classes de service et des spécifications de qualité de service.....	37
Figure 5-1 – Service VoIP international utilisant un réseau Ethernet étendu.....	41
Figure 5-2 – Contournement international VoIP .....	43
Figure 6-1 – Illustration d'un échange fructueux d'idées économiques relatives à la conception de réseaux informatiques.....	49

## LISTE DES TABLEAUX

	<b>Page</b>
Tableau 4-1 – Hiérarchies de trafic des réseaux de l'Internet nouvelle génération .....	37
Tableau 0-1 – Caractéristiques de la correspondance entre certaines applications et les catégories de service du forum ATM .....	67

## Résumé analytique

La présente étude porte sur la tarification et les différentes catégories de qualité de service disponibles sur réseaux IP, en vue de fournir des services IP temps réel. Plusieurs études théoriques (fournies par l'UIT) y sont analysées du point de vue de leur contribution à ces questions, une analyse de rentabilité du contournement international offerts par les réseaux IP étant également proposée.

Il faut tout particulièrement souligner que les techniques associées aux classes de service ne sont pas très développées, qu'elles ne sont pas applicables à grande échelle à l'Internet public et que leur mise en oeuvre concerne essentiellement un petit nombre limité de réseaux universitaires. De plus, aucun système de tarification liée à la catégorie de service (ou à la classe de service) sélectionnée n'existe actuellement, aucun logiciel de comptabilité et de facturation ni aucune interface utilisateur n'ayant été développé à cet effet. L'examen des options de classe de service reste donc cantonnée aux seules études théoriques.

Les **travaux de recherche** analysés dans le présent rapport n'ont pour l'heure pas d'application pratique pour ce qui est des réseaux IP, mais visent à permettre l'élaboration d'un modèle mathématique. Ils risquent de dérouter les lecteurs qui ne sont pas de grands spécialistes de l'Internet, d'autant qu'on trouve un grand nombre de publications sur les classes et niveaux de service des réseaux IP, y compris l'Internet. Cependant, la plupart de ces publications sont techniques ou émanent de sociétés souhaitant vendre des solutions "clé en main" adaptées aux besoins de communication des entreprises. Dans ce dernier cas, la gestion de la qualité de service (QoS) est plus aisée, l'Intranet permettant à présent le transport de la voix, des données et de la vidéo. Aucune tarification au niveau de l'utilisateur final n'est cependant appliquée pour de tels réseaux.

En dehors des réseaux Intranet d'entreprise, le service voix sur IP s'apparente essentiellement, lorsqu'il existe, à un service international de **contournement des taxes de répartition** de faible qualité, limité pour une large part aux réseaux ISP montransit. En règle générale, les appels entre postes téléphoniques transitent par des passerelles qui conditionnent les données issues de lignes téléphoniques RTPC et les transmettent à un réseau IP. Le processus inverse est réalisé à l'extrémité distante. Ce type de service en est à un stade précoce de développement.

Contrairement à ce qui se passe sur le réseau RTPC, aucun circuit particulier d'un réseau IP ne reste ouvert pendant toute la durée d'une communication. Les données à transmettre sont numérisées et conditionnées en paquets, qui sont transmis aléatoirement avec d'autres paquets issus de différentes sources pour atteindre leur destination finale. Ce traitement aléatoire des paquets signifie qu'ils sont tous traités avec le même niveau de priorité, qu'ils proviennent d'une conversation téléphonique ou d'un courrier électronique. En cas d'encombrement, les paquets parvenant les premiers dans la file d'attente seront les premiers à être retransmis (les paquets contenant des données vocales devront attendre que les paquets non sensibles au facteur temps placés avant eux dans la file aient été transmis). En règle générale, la fiabilité et la qualité des connexions "virtuelles" sur l'Internet sont bien moindres que celles offertes par le réseau RTPC.

La gestion de réseau orientée vers la maîtrise des encombrements est donc l'élément déterminant pour fournir une qualité de service temps réel sur réseaux IP, y compris l'Internet. Même si l'on a enregistré un grand nombre de progrès techniques en vue de résoudre les problèmes d'encombrement, ceux-ci ne pourront être en grande part surmontés que si la question de la gestion de la demande est enfin abordée.

La gestion de la demande dépend essentiellement de la tarification, dont la **structure** importe davantage que les niveaux de prix. Pour être rentable, la structure de prix proposée aux utilisateurs devrait correspondre à la structure des coûts générés par ces derniers, ce qui signifie que le mode de facturation au client devrait refléter le mode de génération des coûts. La tarification actuelle appliquée pour l'utilisation du réseau Internet ne répond pas à cette logique. Les utilisateurs de l'Internet paient à l'heure actuelle un abonnement et ne doivent pas, à l'exception des utilisateurs du réseau commuté dont les communications sont facturées au temps, s'acquitter de sommes supplémentaires pour l'envoi de paquets additionnels, même aux heures de pointe.

Le principal outil de tarification requis pour mettre en oeuvre un service IP temps réel fiable repose sans doute sur l'application d'un **prix en fonction de l'encombrement**, c'est-à-dire un prix variant de telle sorte que tous ceux qui exigent un service temps réel au prix convenu au cours d'une période de forte demande en bénéficient. Un tel système de tarification permettrait également d'optimiser les investissements en capacité de réseau. Outre la possibilité donnée aux utilisateurs de sélectionner la qualité de service (par exemple la classe de service {CoS}) exigée, ce système paraît être de nature à favoriser la convergence entre les réseaux IP (dont l'Internet) et d'autres plates-formes telles que les réseaux RTPC et CATV (télévision par câble).

Il semble que de nombreuses années doivent encore s'écouler avant que les utilisateurs de l'Internet ne puissent bénéficier à grande échelle des niveaux de qualité de service spécifiés et d'une structure de tarification plus élaborée que celle actuellement appliquée pour le service Internet. Les raisons principales expliquant l'absence d'une structure de tarification élaborée et d'options de qualité de service sont d'ordre technique et tiennent pour l'essentiel à des problèmes logiciels et matériels entre fournisseurs ISP, d'où un niveau d'interopérabilité qui n'est pas "transparent".

Outre des problèmes de qualité de service aux limites du réseau, d'autres difficultés devront être surmontées avant de pouvoir spécifier une structure de tarification élaborée et des options de qualité de service: problèmes liés à la gestion de l'encombrement *sur* les réseaux IP - en particulier la question de la tarification des services (comme on l'a souligné plus haut); absence de systèmes informatiques de comptabilité à même de fournir les données nécessaires de mesure de trafic et de facturation entre réseaux, tels que ceux permettant de fournir plusieurs niveaux de qualité de service sélectionnables par les abonnés suivant le type de service de communications utilisé; et absence d'une interface au niveau de l'utilisateur final permettant à celui-ci de faire un choix pertinent entre les différents niveaux de qualité de service proposés.

## 1 Introduction

Comme l'indique son titre, la présente étude traite de l'incidence de la tarification sur la fourniture de différentes catégories de qualité de service sur réseaux IP, aux fins d'examen de la viabilité commerciale des services IP temps réel. Plusieurs études théoriques (fournies par l'UIT) y sont analysées du point de vue de leur contribution à ces questions, une analyse de rentabilité du contournement international offert par l'Internet et éventuellement d'autres réseaux IP transfrontaliers étant également proposée.

L'étude des services temps réel sur réseaux IP doit inclure celle des questions liées à la qualité de service. La fourniture de tels services exige le respect de certaines caractéristiques de qualité de service, ce qui pose problème sur les réseaux IP - en particulier sur un réseau public tel que l'Internet. Le présent rapport est particulièrement ambitieux dans son approche, puisqu'il vise à identifier les raisons structurelles et techniques expliquant pourquoi la qualité de service pose problème sur les réseaux IP et qu'il présente ce faisant les différentes catégories, niveaux et classes de qualité de service utilisables sur ces réseaux en environnements contrôlés.

En pratique, on ne dispose actuellement pas à grande échelle sur l'Internet d'options de qualité de service, bien que certaines d'entre elles fassent leur apparition sur des réseaux IP privés et des réseaux universitaires. Il n'existe toutefois pas de système de comptabilité ou de paiement permettant aux utilisateurs de payer pour obtenir un niveau de qualité de service plus élevé sur la base de l'utilisation du service considéré ou du débit de paquets transmis. Il reste donc beaucoup à faire pour associer les développements futurs en matière de niveaux de qualité de service (côté fournisseurs) à la mise en oeuvre d'options de tarification (côté gestion de la demande).

Le principal problème à résoudre en termes de qualité de service pour assurer un fonctionnement viable des services temps réel est l'encombrement. Les problèmes liés à l'encombrement sont traités dans le présent rapport, dans lequel on indique que lorsque des paquets, pour lesquels on exige un niveau de qualité de service temps réel, sont transmis aléatoirement avec d'autres paquets (cas de l'Internet par exemple), il faut soit que tous ces paquets bénéficient d'un niveau de qualité de service temps réel, soit que les paquets pour lesquels un traitement prioritaire est exigé soient "marqués" à cet effet.

Outre un système d'admission prioritaire sur le réseau, il existe à présent essentiellement deux méthodes permettant d'améliorer la qualité de service sur l'Internet:

- 1) la réservation de capacité pour les connexions entre lesquelles le niveau de qualité de service le plus élevé est exigé;
- 2) l'inclusion d'un dispositif permettant le traitement prioritaire des paquets "marqués" (étiquetés) à cet effet.

Aucune de ces deux méthodes n'est pour l'instant appliquée sur l'Internet à une échelle suffisante pour que la voix sur IP ou tout autre service temps réel puisse sérieusement concurrencer le service RTPC. Les raisons en sont techniquement complexes mais paraissent suffisamment importantes pour écarter l'hypothèse d'un large essor de la fourniture sur l'Internet de services temps réel ces prochaines années. Les services internationaux voix sur IP connaissent cependant une croissance rapide dans de nombreux pays qui perçoivent des taxes de répartition pour l'acheminement d'appels internationaux RTPC. L'architecture de ces services se fera vraisemblablement autour de réseaux de fournisseurs ISP montransit et d'aucun pourrait prétendre que la qualité de ces services est légèrement inférieure à celle du service voix sur le réseau public Internet. Leur qualité de ces services sera relativement faible. Compte tenu du développement continu des techniques de réseau étendu, dont le champ d'application est international, l'utilisation de ce type de service continuera vraisemblablement à croître, en particulier dans les régions du monde qui tentent de conserver l'ancien système de taxes de répartition.

Pour que le concept de connexion entre deux entités quelconques puisse être appliqué sur l'Internet, des options de tarification liée aux caractéristiques de qualité de service devront être offertes afin de récompenser les fournisseurs qui proposent ce qui constitue sans conteste un service à coût plus élevé. La disponibilité de logiciels et d'équipements informatiques permettant cette avancée semble toutefois encore assez éloignée, d'autant que la perspective d'une solution aux problèmes techniques posés par la fourniture de niveaux de qualité de service différenciés (tarification en fonction de la classe et du niveau de service) semble également assez lointaine. Aucune technique commercialement viable ne permettant encore la mise en oeuvre de ces options de qualité de service, il n'est pas surprenant que des modèles de tarification plus sophistiqués offrant aux utilisateurs la possibilité de payer pour obtenir un niveau donné de qualité de service n'aient pas encore été élaborés.

Le présent rapport est structuré comme suit:

- Chapitre 2: description succincte des réseaux IP et en particulier de l'Internet. Présentation des couches logicielles assurant le fonctionnement de l'Internet et description de la façon dont la connectivité entre fournisseurs ISP détermine une structure de l'Internet.
- Chapitre 3: catégories de qualité de service et problèmes techniques entravant le développement de plusieurs catégories de qualité de service sur l'Internet.
- Chapitre 4: aspects économiques de la gestion des encombrements - en particulier, utilisation de la tarification afin de gérer efficacement en termes de coûts les pics de demande d'une manière qui renforce le développement économique.
- Chapitre 5: services IP temps réel et contournement des taxes de répartition pour le service voix sur IP (VoIP).
- Chapitre 6: examen des études théoriques fournies par l'UIT.
- Chapitre 7: questions réglementaires liées aux réseaux IP, en particulier pour les services temps réel.

## 2 Aperçu de l'Internet et des réseaux IP<sup>1</sup>

### 2.1 Couches de réseau

L'Internet comprend bien plus de 100 000 réseaux faisant intervenir différents types de logiciels et de matériels informatiques qui communiquent via des protocoles TCP/IP. Cette diversité est à la fois une force et une faiblesse: elle permet certes aux réseaux utilisant des équipements non normalisés et divers logiciels non normalisés d'être connectés et de communiquer entre eux via l'Internet, mais il devient aussi plus difficile de s'affranchir des obstacles techniques (logiciels et matériels) entravant l'obtention d'une interopérabilité "transparente" entre réseaux.

Applications et Services	Couche 7 - Application Couche 6 - Présentation Couche 5 - Session
TCP ou UDP	Couche 4 - Transport
IP	Couche 3 - Réseau
Couche 2 - Liaison de données	Couche 2 - Liaison de données
Couche 1 - Physique	Couche 1 - Physique

Source: Smith et Collins (2002)

**Figure 2-1 – Modèle OSI et pile de protocoles Internet**

<sup>1</sup> J'ai mentionné explicitement à plusieurs reprises dans la présente étude le rapport que M. D. Elixmann et moi-même avons soumis à la Commission Européenne, qui figure en référence sous le titre WIK (2002). Les conseils techniques formulés par MM. Alberto E. Garcia et Klaus Hackbarth se sont avérés utiles pour la rédaction du présent rapport, même si bien évidemment toute erreur technique ou de quelque autre nature m'incomberait le cas échéant.



L'une des raisons principales du manque de "transparence" de ce type de communication apparaît à l'examen de la Figure 2-1, qui présente la pile de protocoles à sept couches constituant l'Internet et connue sous le terme d'interconnexion de systèmes ouverts (OSI, *open systems interconnection*)<sup>2</sup>. Le protocole IP est rattaché à la couche 3, les protocoles applications et services fonctionnant aux niveaux des couches supérieures 5 à 7<sup>3, 4</sup>.

Les obstacles techniques entravant l'obtention d'un niveau d'interopérabilité "transparent" devront être levés pour que l'Internet puisse converger avec d'autres plates-formes telles que les réseaux RTPC et CATV. Pour que cette convergence se réalise et que l'Internet nouvelle génération devienne une réalité, des solutions, qui améliorent la qualité et la fiabilité des liaisons de connexion et accroissent la largeur de bande et la qualité de service (QoS) offertes aux utilisateurs finals, devront être trouvées. A l'heure actuelle, des réseaux différents fondés sur le protocole IP sont interopérables, mais la "transparence" n'est pas totale et toutes les fonctionnalités ne sont pas disponibles entre réseaux.

## 2.2 Structure de la connectivité de l'Internet

L'Internet est structuré en une hiérarchie "souple" d'entités, comprenant des dispositifs de communication tels que des ordinateurs personnels, des stations de travail et des serveurs (également appelés hôtes) aux limites extérieures, connectés à des réseaux locaux (LAN)<sup>5</sup>, eux-mêmes connectés à un ou plusieurs fournisseurs ISP régionaux (appelés fournisseurs ISP locaux). Ces derniers sont généralement reliés à des fournisseurs ISP nationaux, eux-mêmes connectés à des fournisseurs ISP internationaux. Au sommet de cette hiérarchie "souple" se trouvent les fournisseurs ISP principaux, également appelés fournisseurs IBP (fournisseurs de dorsales Internet, *internet backbone provider*), ou fournisseurs ISP de niveau 1. Un fournisseur peut dans certains cas opérer à plusieurs niveaux de cette structure hiérarchique modulable, représentée sur la Figure 2-2.

Bien qu'avant le milieu des années 90, seuls les fournisseurs ISP de "grande taille" étaient responsables de la connexion avec plusieurs autres fournisseurs ISP, il existe à présent un grand nombre de fournisseurs ISP régionaux qui sont connectés à plusieurs autres fournisseurs régionaux (connectivité horizontale). De plus, de nombreux fournisseurs ISP sont reliés à plusieurs fournisseurs de transition.

Le processus d'interconnexion horizontale est connu sous le terme d'*échange de flux homologues*, bien que l'on parle généralement d'*échange de flux homologues secondaires* lorsqu'il se produit entre des fournisseurs qui ne sont pas des fournisseurs principaux de dorsales. Une entité n'accepte de données en provenance d'une entité homologue que si celles-ci sont destinées à un point de terminaison situé sur son réseau. Lorsqu'un accord a été conclu entre entités homologues, les paquets transmis avec des adresses non reconnues au niveau du réseau ISP de réception sont

---

<sup>2</sup> Le modèle OSI décrit la façon dont les données d'une application logicielle d'un ordinateur sont transmises via un réseau à une application logicielle d'un autre réseau. Il s'agit du principal modèle d'architecture de réseaux pour les communications entre ordinateurs.

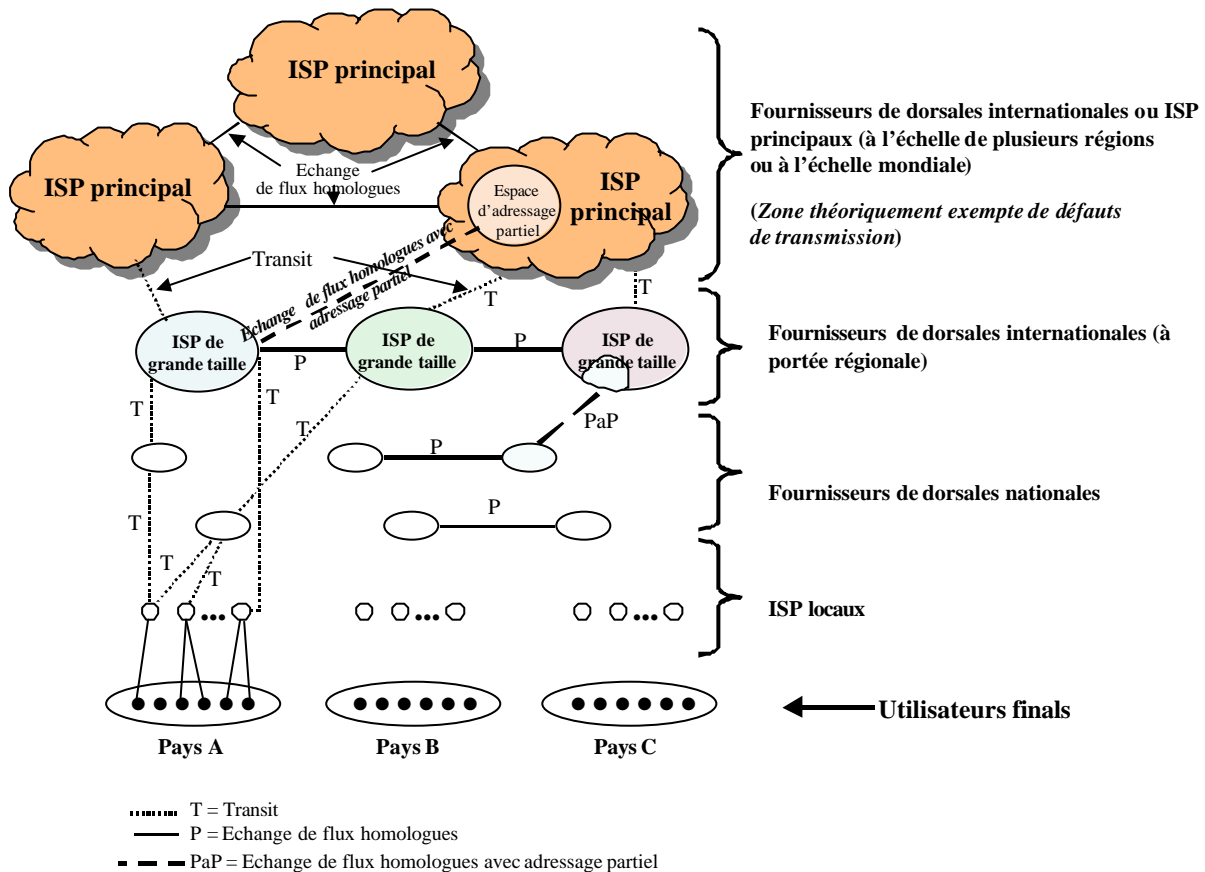
<sup>3</sup> L'association de sigles TCP/IP représente une série de 100 protocoles effectuant des fonctions de niveau bas. Les protocoles IP (protocole Internet) et TCP (protocole de commande de transmission) s'acquittent cependant de l'essentiel des tâches dévolues à la couche 3.

<sup>4</sup> Il existe au niveau des couches 1 et 2 une multitude de réseaux à liaisons fixes (réseaux RNIS, LAN, ATM, SDH et (D)WDM par exemple) capables d'acheminer un trafic des données IP. Le protocole IP de la couche 3 est complètement indépendant des couches inférieures.

<sup>5</sup> Un réseau LAN est un ensemble de plusieurs dispositifs de communication IP reliés entre eux.

éliminés. A de rares exceptions près, les relations entre entités homologues n'impliquent aucun paiement entre ces dernières. Le prix à payer à une entité donnée pour qu'elle accepte la terminaison de trafic sur son réseau correspond simplement à celui du coût induit par l'accord de réciprocité; il s'agit d'un accord d'interconnexion au bénéfice entier de l'émetteur (*sender-keeps-all*).

Bien que cela soit rare, deux fournisseurs ISP de "taille" différente (en km de réseau ou en espace d'adresses client) peuvent décider de conclure un accord d'échange de flux homologues. Dans un tel cas cependant, l'entité "dominante" n'acceptera de fournir à son partenaire qu'une partie de son espace d'adresses, qui comprendra en général un nombre d'adresses à peu près égal à celui que ce dernier est en mesure de mettre à disposition du premier. Nous parlons alors d'*échange de flux homologues avec adressage partiel*.



Source: d'après WIK 2002

Figure 2-2 – Interconnexions horizontales et verticales sur l'Internet

L'interconnexion verticale fait l'objet de contrats de **transit**. Le transit de données est payé par les fournisseurs ISP. Contrairement à ce qui se passe entre entités homologues, un fournisseur ISP qui vend des services de transit acceptera un trafic dont le point de terminaison n'est pas sur son réseau (c'est-à-dire des datagrammes dont les adresses ne sont pas reconnues au niveau des tables d'acheminement du fournisseur ISP de niveau supérieur) puis acheminera ce trafic de transition à ses entités homologues ou achètera lui-même des services de transit si l'adresse de transit n'est pas reconnue. Un accord de transit permet donc à tout utilisateur final d'être connecté à l'Internet, ce qui est bien supérieur aux possibilités offertes par la conclusion d'un accord d'échange de flux

homologues. A partir de la fin des années 90, plusieurs fournisseurs ISP de niveau inférieur ont entrepris de conclure des contrats de transit avec plusieurs fournisseurs ISP proposant des services de transit<sup>6</sup>, ce que l'on a appelé le **rattachement multiple**. Les principales raisons motivant le choix d'un rattachement multiple sont les suivantes:

- meilleure tolérance aux pannes de service affectant le flux amont;
- contribution à l'optimisation des flux de trafic<sup>7</sup>.

Il existe d'autres formes de connectivité qui se substituent aux contrats d'échanges de flux homologues et aux contrats de transit. Il peut s'agir *d'accueil de données, de fourniture de données cache, de réplication de trafic ou de réseau de fourniture de contenu (CDN, content delivery network)*. Ces mécanismes sont tous plus ou moins similaires quant à leur objet, qui est de conserver le contenu (pages web par exemple) à proximité des limites de l'Internet, de réduire ce faisant les coûts de transit incombant aux fournisseurs ISP et d'améliorer les temps de réponse aux requêtes de données. Leurs différences sont minimes.

### 2.3 Adressage sur l'Internet

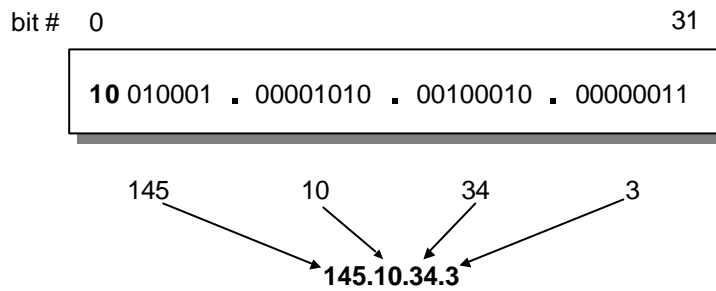
La modularité de sa hiérarchie est une caractéristique essentielle de l'Internet, qui permet d'éviter que chaque fournisseur ISP doive être connecté à tous les autres. Ce type de configuration serait rigoureusement impossible, puisqu'il exigerait entre autres choses que tous les fournisseurs ISP maintiennent à jour des tables d'adressage exhaustives au niveau de leurs routeurs d'extrémité de domaine et que le réseau Internet soit parfaitement maillé, ce qui est évidemment irréalisable au vu du nombre actuel de réseaux ISP et de leur dispersion géographique.

L'Internet utilise donc un système d'adressage et d'acheminement hiérarchique. Les datagrammes IP sont émis aux niveaux des extrémités de domaine. Ils contiennent chacun en en-tête une adresse exprimée par un numéro IP. En règle générale, un fournisseur ISP n'aura enregistré dans sa table d'acheminement que les adresses (numéros IP) de ses clients ou des clients des fournisseurs ISP avec lesquels il échange des **flux homologues**. Si une adresse ne figure pas sur cette table, comme c'est souvent le cas pour un fournisseur de niveau inférieur, le datagramme correspondant est transmis vers le haut de la hiérarchie à un fournisseur ISP de niveau supérieur avec lequel un accord de service de transit a été conclu. La procédure se poursuit jusqu'à identification d'un réseau sur lequel l'adresse est reconnue, le paquet étant alors transmis à son point de terminaison.

---

<sup>6</sup> Les principales raisons de l'accroissement de la connectivité entre fournisseurs ISP sont les suivantes: l'élaboration de protocoles d'acheminement permettant l'utilisation d'équipements à bas coûts et la mise en oeuvre d'options de gestion de réseau ayant permis à des fournisseurs ISP de niveau inférieur de choisir entre différents trajets et fournisseurs de transit lors de l'envoi de trafic vers le haut de la hiérarchie, la baisse du coût des infrastructures louées et la croissance des infrastructures sous-jacentes. La viabilité économique du rattachement multiple pour les fournisseurs IPS de moyenne ou de moindre taille a été rendue possible par le développement de la norme BGP4 et donc par la disponibilité de dispositifs d'acheminement peu onéreux et facilement utilisables (voir par exemple le numéro de juillet 1999 de la revue *BoardWatch Magazine*).

<sup>7</sup> Voir en référence Huston (2001a).



Source: Semeria (1996)

**Figure 2-3 – Adresse Ipv4 exprimée en notation décimale pointée**

Une adresse IP, ou plus exactement un numéro IP, est attachée à chaque paquet IP. Seul l'en-tête est vérifié entre le moment où le champ des données utiles est constitué à partir des données numérisées et le moment où le datagramme est transmis au récepteur. Depuis le début des années 80, IPv4 (*Internet protocol version 4*) est le protocole IP utilisé pour la transmission des paquets. Il repose sur l'utilisation d'une adresse IP de 32 bits comprenant 4 champs d'un octet représentant 4 nombres décimaux séparés par 3 points (voir la Figure 2-3 pour un exemple de cette notation).

Dans la pratique, l'adressage est plus structuré que ne le laissent supposer les paragraphes précédents. Les routeurs des fournisseurs ISP échangent entre eux des informations relatives aux meilleurs trajets de transmission des datagrammes, informations stockées dans des tables d'acheminement mises à jour périodiquement. Le choix des trajets suivis par les datagrammes pour atteindre leur adresse de terminaison dépend également des protocoles d'acheminement, qui peuvent être modifiés par le gestionnaire de réseau<sup>8</sup>.

### 3 Qualité de service: aspects techniques

#### 3.1 La qualité de service sur les réseaux IP

Le fonctionnement des réseaux IP est fondé sur la technique de commutation de paquets. Les données à transmettre sont numérisées et réparties en paquets, qui sont transmis aléatoirement avec d'autres paquets issus de différentes sources vers leur destination finale. Ce traitement aléatoire des paquets signifie qu'ils sont tous traités avec le même niveau de priorité, qu'ils émanent d'une conversation téléphonique ou d'un courrier électronique. En cas d'encombrement, les paquets parvenant les premiers dans la file d'attente seront les premiers à être transmis (les paquets contenant des données vocales seront donc transmis après des paquets non prioritaires placés avant eux dans la file).

Sur un réseau IP, aucun circuit particulier ne reste ouvert pendant toute la durée d'une communication, contrairement à ce qui se passe sur le réseau RTPC<sup>9</sup>. Outre l'interopérabilité avec d'autres systèmes, les réseaux à transmission par paquets (tels que les réseaux IP) ont entre autres

<sup>8</sup> Un ensemble de routeurs sous le contrôle administratif d'une seule organisation constitue un système autonome (AS, *autonomous system*) - ou *domaine d'acheminement*.

<sup>9</sup> Dans le cas des appels longue distance, la convergence des techniques employées a conduit à utiliser les mêmes infrastructures sous-jacentes et les mêmes circuits optiques pour la transmission du trafic, ce qui confère aux circuits RTPC un caractère plus virtuel que réel.

comme avantages, par rapport aux réseaux à circuits commutés, d'être beaucoup plus flexibles en termes de spécifications de la largeur de bande des connexions et de permettre une utilisation plus efficace de la capacité disponible. Ils offrent également la possibilité d'une intégration de service, ce que le RTPC ne permet pas.

En règle générale, la fiabilité et la qualité des connexions "virtuelles" sur l'Internet sont bien moindres que celles offertes par le réseau RTPC. L'écart en termes de qualité entre ces deux types de plate-forme s'est cependant considérablement amenuisé à mesure qu'augmentaient la puissance de traitement des processeurs et la capacité d'acheminement des données. La différence entre niveaux de qualité de service reste toutefois très perceptible: ainsi des services vocaux peuvent certes être fournis sur l'Internet, mais dans le cadre d'accords techniques très spécifiques et avec des disparités de qualité de service très grandes au niveau des utilisateurs finals<sup>10</sup>. En général, ceux qui ont utilisé le service voix sur IP en dehors des réseaux intranet privés les plus modernes le considèrent comme un service de qualité faible et inégale, qui fonctionne principalement sur des liaisons internationales hors des pays dont les prix des appels RTPC sont soumis à une régulation très stricte (il s'agit donc d'un service de contournement international)<sup>11</sup>.

La plupart des notions de qualité de service relatives au trafic sur l'Internet sont incertaines et doivent être définies de façon probabiliste. Si les paquets transitant sur l'Internet ne font pas tous l'objet, *stricto sensu*, d'un traitement identique, il n'en demeure pas moins, que puisque ces paquets sont transmis aléatoirement quelle que soit l'origine des données acheminées (voix, courrier électronique, etc.), aucun d'entre eux ne peut être considéré comme devant bénéficier d'un traitement prioritaire.

Il est clair que de nombreux différents types de service peuvent être fournis sur l'Internet, dont la navigation, la vidéo en continu, le transfert de fichiers, l'acheminement de courrier électronique et les services vocaux temps réel. Tous exigent des niveaux de qualité de service différents. La voix sur IP est censée pouvoir supporter un certain temps de latence (retard), une certaine gigue (variation du retard) et doit pouvoir occuper une certaine largeur de bande. L'acheminement de la vidéo en continu nécessite une largeur de bande plus grande mais peut supporter un temps de latence et une gigue légèrement supérieurs. Lorsque le temps de lecture<sup>12</sup> d'une application "temps réel" peut être modifié, les niveaux de temps de latence et de gigue à respecter sur le réseau pourront être diminués en conséquence. Si le réglage du temps de lecture est possible pour une application vidéo en continu, il ne l'est pas pour le service voix sur IP.

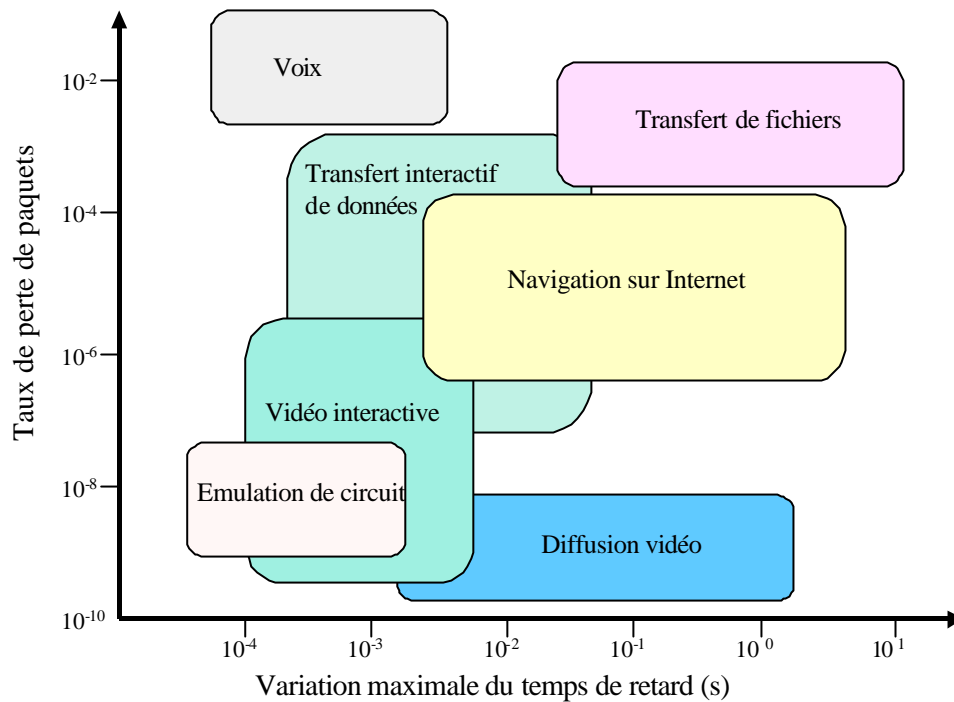
Les valeurs des paramètres taux de perte de paquets et variation du temps de retard sont représentées sur la Figure 3-1 pour différentes applications. Il est bien évident que si l'on veut que chacun de ces services soit fourni sur l'Internet avec un niveau de qualité qui puisse concurrencer celui de la plate-forme acheminant traditionnellement le service considéré (RTPC, CATV, radiodiffusion hertzienne gratuite par exemple), il faudra soit que tous les datagrammes bénéficient d'un niveau de qualité de service optimale et qu'il n'y ait pas beaucoup de pertes de paquets ou d'attente au niveau de noeuds, soit que les paquets soient traités différemment en fonction du niveau de qualité de service requis pour l'application considérée (ainsi, un utilisateur final souhaitant effectuer une conversation téléphonique IP temps réel via l'Internet devra pouvoir accéder à un service présentant des temps de retard particulièrement courts pour la fourniture de datagrammes).

---

<sup>10</sup> Il n'est pas exceptionnel que des temps de mise en mémoire tampon d'une seconde soient requis.

<sup>11</sup> Le modèle de contournement international IP est examiné au Chapitre 6.

<sup>12</sup> Le mécanisme appliqué est celui de la "mise en mémoire tampon": les paquets sont gardés en mémoire pendant très peu de temps jusqu'à ce que tous les paquets puissent être "lus" dans le bon ordre sans retard perceptible.



Source: McDysan (2000)

**Figure 3-1 – Spécifications de qualité de service (taux de perte de paquets et de variation de temps de retard) pour différentes applications**

L'Internet n'a pas été conçu dans le but d'offrir ce type de capacités, mais plutôt dans celui de proposer un service d'acheminement des données à faible coût, dont la qualité de service et le contrôle des files d'attente admissibles (paramètre niveau de service (QoS) décrit ci-après) ne constituent pas des attributs importants. Comme nous l'avons déjà indiqué, les datagrammes issus de sources différentes partagent un même conduit de transport, à savoir un canal (cas d'une transmission monodirectionnelle) ou un circuit (cas d'une transmission bidirectionnelle). Il s'agit là d'une des fonctions de la gestion de trafic sur réseaux IP; connue sous le terme de *multiplexage statistique*, elle nécessite d'associer les données provenant de plusieurs sources différentes en vue d'optimiser l'utilisation des ressources réseau.

### 3.2 Catégories de qualité de service

Dans son acception populaire, le terme *qualité de service* (QoS) revêt une signification plus large que celle induite par sa définition technique. On l'apparente souvent, dans le jargon de l'Internet, au niveau de service dont bénéficient les utilisateurs finals. Aux fins du présent rapport, nous allons identifier les 3 niveaux suivants de qualité de service, tels que les différencient les spécialistes de l'Internet:

- la qualité de service (QoS);
- le type de service (ToS), qui comprend le sous-champ classe de service (CoS);
- le niveau de service (GoS).

### 3.2.1 Qualité de service (QoS)

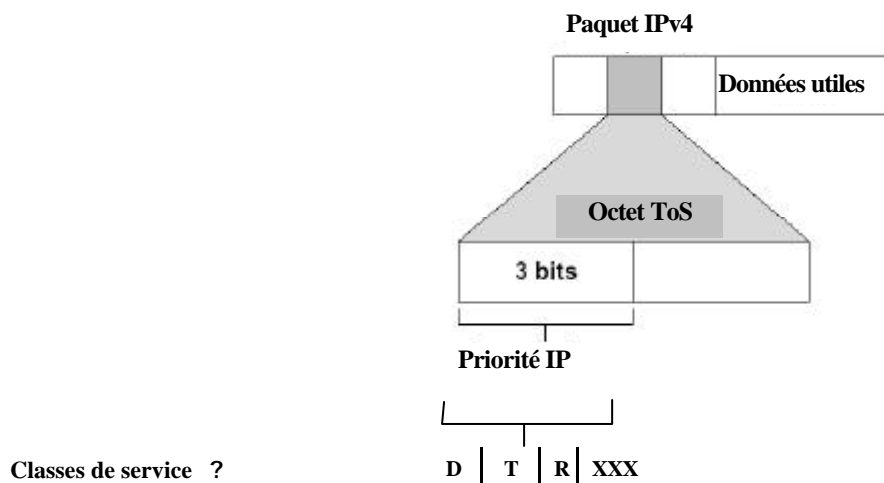
Ce champ est examiné d'une manière relativement plus détaillée que les champs ToS et GoS car il révèle un grand nombre d'informations relatives au mode de fonctionnement du réseau. Il est défini par un ensemble de paramètres décrivant un flux de paquets ou de cellules (appelons les datagrammes) émis au cours d'une session Internet. Il peut concerner une diffusion point à point, point à multipoint, une diffusion sélective ou une radiodiffusion. Les paramètres QoS les plus importants d'un réseau à commutation de paquets/de circuits sont les suivants:

- le temps de latence: temps de transit des paquets ou des cellules entre l'émetteur et le récepteur;
- la gigue: variation du temps de latence;
- le taux de perte de paquets de cellules ou d'arrivée trop tardive pour un traitement utile des données;
- les erreurs d'étiquetage/d'adressage.

L'ensemble de ces éléments décrit la qualité de service d'un flux de datagrammes donné. Il est important de maintenir, du début à la fin de la transmission, ces valeurs dans les limites requises afin que le service VoIP fourni soit de qualité suffisante pour en assurer la viabilité de part le nombre de consommateurs intéressés.

### 3.2.2 Type de service et classe de service

Le type de service (ToS) est indiqué dans le champ type de service d'un datagramme IP, qui comprend un sous-champ classe de service (CoS) à spécifier. L'en-tête d'un paquet Ipv4 contient 3 bits qui à l'heure actuelle permettent en fait d'identifier quatre classes de service lors de l'initialisation du champ ToS. Ces considérations sont illustrées sur la Figure 3-2.



Source: Black (1998) et Cisco Systems

**Figure 3-2 – Bits de priorité IP du champ ToS d'un en-tête de paquet IPv4**

Sur la figure ci-dessus, D indique si la transmission du datagramme peut être retardée, T précise le niveau de priorité du débit et R indique si un sous-réseau fiable est requis, la valeur "XXX" étant réservé pour une utilisation ultérieure.

Ce champ peut être utilisé pour indiquer la classe de service, à condition cependant que les routeurs soient programmés en conséquence, ce qui n'est pas le cas actuellement. Il intervient plutôt dans une architecture appelée architecture de services différenciés (*DiffServ*), sous une forme légèrement

modifiée cependant et sous le nom de champ de services différenciés. Les services *DiffServ* sont examinés au § 3.3.2.

### 3.2.3 Niveau de service

Alors que le paramètre QoS se rapporte aux propriétés statistiques d'un flux donné, le niveau de service (GoS) décrit la probabilité d'admission des paquets aux premières places de la file d'attente. Cette fonctionnalité est décrite sous le terme *blocage* dans un environnement RTPC. Les paramètres GoS et QoS doivent être connus avant de pouvoir décrire la qualité de service entre deux points "virtuellement" connectés par un ou plusieurs réseaux IP. Un paramètre GoS doit donc être ajouté à la liste des paramètres QoS indiquée au § 3.2.1:

- la probabilité que le service (décrit par les paramètres QoS) soit disponible.

## 3.3 Catégories de qualité de service

On a enregistré ces dernières années de nombreux progrès techniques ayant permis une gestion plus efficace de la qualité de service d'un réseau IP, bien que des problèmes de qualité de service persistent entre plusieurs réseaux. Deux techniques (*IntServ* et *DiffServ*), destinées à offrir une catégorie de service de niveau supérieur, ont été largement étudiées au cours de cette période. Elles sont examinées ci-après, ainsi que certaines caractéristiques de l'Internet dont l'incidence sur la qualité de service est significative. Nous abordons au § 3.4 les problèmes de qualité de service qui empêchent la mise à disposition à large échelle de services temps réels sur l'Internet grand public et qui entravent la mise en oeuvre de catégories différentes de qualité de service.

L'Internet offre deux modes principaux de gestion sélective du trafic en vue d'assurer la qualité de service:

- 1) le marquage des paquets pour différencier les niveaux de priorité (étiquetage);
- 2) la réservation périodique de capacités sur les connexions au niveau desquelles un niveau de qualité de service plus élevé est requis.

La première méthode consiste à appliquer un traitement préférentiel aux paquets "marqués" à cet effet. Elle doit être mise en oeuvre au niveau de tous les routeurs par lesquels ces paquets peuvent transiter. Les files d'attente utilisées sont différentes selon qu'il s'agisse d'un paquet prioritaire (étiqueté) ou non prioritaire, la sélection du prochain paquet à expédier étant déterminée par un algorithme pondéré de mise en file d'attente. Cette méthode ne garantit pas des niveaux constants de qualité de service, mais doit plutôt être considérée d'un point de vue probabiliste, c'est-à-dire en termes de données statistiques QoS supérieures en quelque sorte aux données classiques. Elle suppose l'utilisation de circuits virtuels (VC) ou de conduits virtuels (VP), et non de types de services d'utilisateurs finals. Elle est mise en oeuvre à l'aide du protocole de transport en temps réel (RTP), que complète un protocole de commande (le protocole de commande en temps réel RTCP) en charge du contrôle des connexions virtuelles utilisées<sup>13</sup>.

Dans le second cas, une forme de signalisation est mise en oeuvre, qui garantit une valeur minimale de capacité pour les flux de paquets qui requièrent une valeur de qualité de service supérieure à la valeur classique. On trouvera ci-après un bref examen de ces deux types de méthodes.

### 3.3.1 *IntServ*

La technique indiquée au point 1 ci-dessus est celle du protocole *IntServ* (pour "services intégrés"), qui, parallèlement au protocole RSVP (protocole de réservation de ressources), utilise la commande d'admission. Lors des périodes de fort trafic, chaque demande de flux ne sera admise que si elle ne

---

<sup>13</sup> Voir RFC1889 et RFC1890.



conduit pas à l'exclusion d'autres flux précédemment admis. Les paquets qui ne sont pas étiquetés comme étant prioritaires formeront un groupe duquel seront éliminés certains paquets lorsque l'encombrement du réseau commencera à être tel que le respect des paramètres nominaux de qualité de service sera menacé.

En 2000, le modèle *IntServ* permettait de définir deux classes de service, dont les normes avaient été spécifiées par le Groupe de travail des services intégrés de l'IETF:

- i) la classe de service en charge contrôlée;
- ii) la classe de qualité de service garantie.

La qualité de service associée à la classe i) lorsque les demandes d'acheminement sur le réseau sont très importantes est similaire à celle fournie sur un réseau sans surcharge n'appliquant pas le protocole *IntServ*, comme on peut l'observer actuellement sur un réseau dorsal en l'absence d'encombrement. L'utilisation de cette classe suppose que le réseau dispose des estimations de demandes de trafic utilisateurs de telle manière à permettre la mise à disposition des ressources nécessaires.

La mise en oeuvre de la classe de qualité de service garantie vise essentiellement à minimiser les retards de mise en file d'attente et à garantir l'utilisation d'une largeur de bande minimale. Elle ne fait appel à aucun mécanisme d'établissement ou moyen d'identification des flux de trafic et doit donc faire intervenir parallèlement un protocole RSVP<sup>14</sup>. Le récepteur des paquets doit connaître les spécifications du trafic acheminé afin de permettre l'exécution des procédures appropriées de réservation, ce qui implique la connaissance du trajet entre l'émetteur et le récepteur. Lorsque la demande de réservation parvient au premier routeur sur le trajet, la disponibilité de celui-ci est vérifiée et en cas de verdict positif, cette demande est transmise au routeur suivant. Si un routeur quelconque sur le trajet ne dispose pas de la capacité nécessaire, un message d'erreur est renvoyé. Le récepteur réémettra alors la demande de réservation après un bref délai.

Le protocole *IntServ* ne fait pas intervenir le champ ToS des paquets IP mais s'appuie plutôt sur des circuits virtuels émulsés.

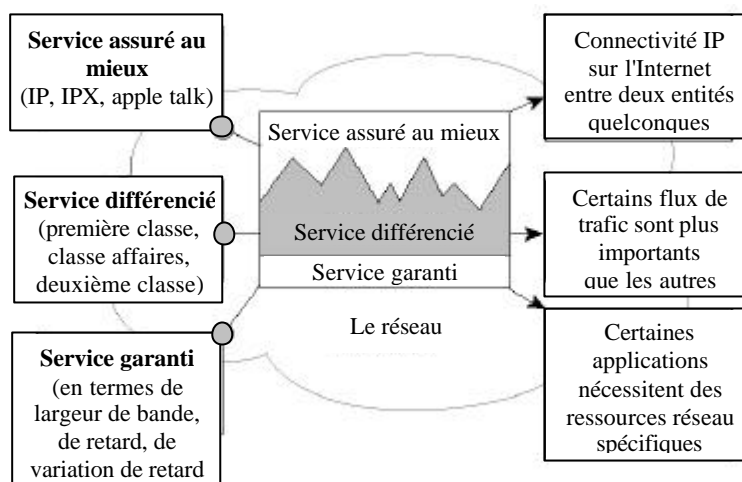
Bien que possible théoriquement, l'application du modèle *IntServ*/RSVP sur l'Internet se heurte dans la pratique à des difficultés très importantes:

- de sérieux problèmes de dimensionnement empêchent l'utilisation de ce modèle sur des réseaux de grande taille;
- le modèle *IntServ* ne constitue qu'une solution technique. La nécessité d'une tarification du service en vue de gérer l'offre et la demande n'a pas du tout été prise en compte lors de la phase de conception du modèle.

L'application du protocole *IntServ* est pour l'heure limitée aux réseaux IP privés.

---

<sup>14</sup> RSVP est un protocole de commande qui ne permet pas l'acheminement des datagrammes, ce dernier se faisant en fait après mise en oeuvre des procédures de réservation au moyen du protocole RTP. Le protocole RSVP nécessite en outre des protocoles de signalisation pour mettre en oeuvre des réservations (étudiées ci-après). L'application des procédures de réservation n'est toutefois possible que si tous les routeurs intervenant dans la transmission acceptent le protocole RSVP. Celui-ci utilise un algorithme de compteur de jetons. Ces derniers sont collectés par un compteur logique, ce qui permet de contrôler le débit de transmission et la durée des salves. Le fonctionnement d'un algorithme simple de comptage de jetons repose sur deux paramètres: le débit moyen de transmission et la "profondeur" du compteur logique. Les paquets arrivant sont vérifiés pour s'assurer que leur longueur est inférieure à celle des jetons du compteur.



Source: Cisco Systems

**Figure 3-3 – Les trois niveaux de qualité de service de bout en bout (service assuré au mieux, service différencié et service garanti)**

### 3.3.2 DiffServ

L'architecture *DiffServ* (services différenciés) est conçue pour être appliquée aux limites des réseaux sur la base de l'*encombrement escompté* plutôt que l'encombrement réel le long des trajets, ce qui signifie qu'aucun flux particulier ne bénéficie d'une garantie de qualité de service. Comme dans le cas de l'Internet classique, la technique *DiffServ* reste fondée sur la fourniture d'une largeur de bande statistique. Elle vise à améliorer les valeurs des paramètres statistiques de qualité de service des paquets "marqués" à cet effet.

Suivant le protocole *DiffServ*, plusieurs normes de qualité de service peuvent figurer dans le champ ToS d'un en-tête de paquet IPv4 légèrement modifiée. Sous sa forme légèrement modifiée, ce champ est connu sous le terme de point de code de services différenciés (DSCP)<sup>15</sup>. Le marquage du point DSCP devra normalement se faire à une seule reprise, au niveau d'une limite de réseau de services différenciés ou dans le réseau utilisateur. Toutes les données de mise en forme, de signalisation et les informations par flux sont échangées aux limites de réseau, ce qui signifie que *DiffServ* présente par rapport à *IntServ*<sup>16</sup>. Des avantages considérables en termes d'échelle d'application.

<sup>15</sup> Dans le cas du protocole Ipv6, la fonctionnalité *DiffServ* ne peut pas être appliquée au travers du champ TOS car celui-ci ne figure pas dans l'en-tête de base. Elle sera toutefois être mise en oeuvre grâce à une extension de l'en-tête de base.

<sup>16</sup> *DiffServ* exige la définition d'un profil de service pour chaque utilisateur, la tarification de cette fonctionnalité étant déterminée entre le fournisseur ISP et l'utilisateur final. Un abonné se voit attribuer un compteur de jetons virtuel. Ce compteur se remplit à un certain rythme et peut accumuler de jetons jusqu'à ce qu'il soit plein. Les jetons sont supprimés à mesure qu'arrivent des paquets destinés à l'utilisateur. Cependant, tous les paquets, qu'ils soient ou non étiquetés, arrivent dans un ordre quelconque (comme c'est le cas à l'heure actuelle pour l'Internet). En conditions d'encombrement, tous les paquets destinés à un utilisateur seront étiquetés "profil de service correct" tant que celui-ci dispose d'un crédit de jetons, les paquets non étiquetés de la sorte formant un groupe d'où seront extraits les paquets à supprimer en cas d'encombrement.

La flexibilité du système permet aux fournisseurs de service de faire correspondre la qualité de service attendue et les niveaux de qualité de fonctionnement escomptés, de telle sorte que les objectifs associés aux différents niveaux de qualité de fonctionnement (et de prix) puissent en principe être atteints. Aucune norme détaillant les profils de capacité escomptés n'a cependant été spécifiée. Cette question n'a pas été tranchée afin de permettre aux fournisseurs ISP de concevoir leur propre offre de service, ce qui a pour inconvénient qu'en l'absence d'accord ou de transparence de fonctionnement entre réseaux, le service ne fonctionnera que sur un réseau ("on-net") et non pas entre réseaux (c'est-à-dire à l'échelle de l'Internet). *DiffServ* n'est donc pas devenu une architecture de l'Internet. Son utilisation semble limitée (principalement aux réseaux IP privés), bien que certains grands fournisseurs ISP régionaux indiquent qu'ils l'utilisent sur certaines parties de leur réseau.

Le développement de systèmes de tarification, de comptabilité et de facturation applicables au protocole *DiffServ* est nécessaire pour que les fournisseurs de service puissent proposer des prestations à valeur ajoutée. Des architectures de comptabilité permettant la gestion des ressources Internet sont actuellement mises au point. Elles permettront aussi de gérer la tarification et la comptabilité de différentes classes de service et niveaux de service<sup>17</sup>. Les questions en suspens sont de nature technique ou stratégique<sup>18</sup>. L'IETF s'est intéressé ces dernières années aux systèmes de comptabilité et de facturation.

Les concepteurs de réseau semblent envisager d'autres solutions à long terme que *DiffServ* pour fournir une qualité de service temps réel sur l'Internet. Les études théoriques semblent s'être orientées vers la recherche d'une meilleure convergence entre les couches réseau optique et données (couches 2 et 3) dans le cadre de l'application du concept de transmission de paquets sur réseau SONET (PoS) (voir la Figure 2.1).

### 3.3.3 Qualité de service et mode ATM

Au début 2002, les fournisseurs de service les plus importants utilisaient le mode ATM pour acheminer les datagrammes IP<sup>19</sup>, ces derniers étant placés dans des cellules ATM aux fins de transport<sup>20</sup>. IP sur ATM est un modèle de surcouche faisant intervenir deux architectures de protocole différentes qui au départ n'étaient pas conçues pour fonctionner ensemble. Comparé au

---

<sup>17</sup> Les techniques intergicielles telles que la multidiffusion IP améliorée facilitent le développement d'une nouvelle gamme d'applications de communication (voir le site du Groupe d'étude sur l'ingénierie Internet à l'adresse <http://www.ietf.org/html.charters/DiffServ-charter.html>). Un modèle de gestion de la largeur de bande fondé sur les demandes des utilisateurs applicable aux réseaux *DiffServ* et faisant intervenir des courtiers en largeur de bande, a récemment été proposé par Hwang et al (2000).

<sup>18</sup> Certaines questions techniques se rapportent par exemple au type d'architecture de comptabilité qui devrait être développé pour l'Internet nouvelle génération ou au type de composantes intergicielles qui seraient nécessaires. Les questions stratégiques portent sur l'évolution du portefeuille de services Internet, l'incidence des techniques et des architectures sur les opportunités dont bénéficient les opérateurs existants et les nouveaux entrants, l'importance stratégique des techniques et le développement des alliances.

<sup>19</sup> Certains fournisseurs ont commencé à utiliser la commutation MPLS ou une technique similaire, mais la plupart d'entre eux continueront vraisemblablement à utiliser le mode ATM comme principale technique de "transport".

<sup>20</sup> Le mode ATM repose sur l'application du concept de routage aux limites de réseau et de la commutation au coeur du réseau, ce qui est conforme à l'approche moderne de la conception de réseaux - "un seul routage et plusieurs commutations".

roulage IP, le roulage ATM sur IP a cependant grandement amélioré le rapport prix/qualité de fonctionnement, bien que cet avantage ne subsistera peut-être pas à court terme en raison des progrès techniques en cours<sup>21, 22</sup>. L'ATM présente en outre d'autres avantages d'utilisation en termes de qualité de service<sup>23</sup>.

La mise en oeuvre de la couche d'adaptation ATM (AAL) est également nécessaire au bon fonctionnement de l'ATM pour établir une liaison avec les couches de protocole supérieures (voir le modèle ISO - Figure 2-1). La couche AAL convertit les paquets en cellules ATM et procède à l'opération inverse à l'extrémité distante. Les données "descendent" dans la pile de protocoles et on leur associe un en-tête AAL qui est inséré dans le segment des données utiles ATM. Ce processus permet la prise en compte par le mode ATM des spécifications de qualité de service indiquées par le système final<sup>24</sup>.

L'une des caractéristiques de l'ATM est que les données statistiques de qualité de service sont prévisibles et mesurables, ce qui permet aux fournisseurs ISP de transit de proposer des accords de niveau de service relatifs aux connexions qui assurent un niveau de qualité de service spécifié. Les classes de service acceptées par l'interface UNI 4.0 sont les suivantes: débit binaire constant (CBR); débit binaire variable avec temps réel (VBR-rt); débit binaire variable sans temps réel (VBR-nrt); débit binaire disponible (ABR) et débit binaire non spécifié (UBR), dont l'utilisation est recommandée sur l'Internet.

Dans la pratique, les fournisseurs ISP n'accèdent pas facilement à de nombreux attributs de qualité de service du mode ATM étant donné que ce dernier doit être utilisé avec d'autres protocoles intégrés et que les protocoles liant le protocole IP aux couches ATM sont complexes et ne permettent pas immédiatement un déploiement utile des attributs de qualité de service ATM via le protocole IP sur ATM. Le développement d'interfaces de programmation d'applications devrait

---

<sup>21</sup> Les en-têtes des paquets IP contiennent les données permettant à ces paquets d'être acheminés sur le réseau. Le roulage IP est fondé sur l'adresse de destination du paquet, l'acheminement réel étant fondé sur la base d'une transmission "bond par bond". Au niveau de chaque routeur, la transmission du paquet dépend de la charge du réseau, de telle sorte que le prochain bond n'est pas connu avec certitude avant la prise de décision du routeur. Des paquets relatifs à une même communication peuvent donc prendre des trajets différents pour aboutir à la même adresse de destination. De par la conception du système de transmission, les paquets arrivent donc dans un ordre différent de l'ordre d'émission, ce qui nécessite une mise en mémoire tampon.

<sup>22</sup> IP est une technique logicielle de niveau paquet (mode sans connexion) intervenant au niveau de la couche 3 du modèle ISO, tandis qu'ATM est une technique du niveau cellule applicable aux matériels informatiques via la couche 2 (mode orienté connexion). Voir la Figure 2-1.

<sup>23</sup> Ce paragraphe s'appuie principalement sur les contributions suivantes: Black (1999), Marcus (1999) et McDysen (2000); Kercheval (1997).

<sup>24</sup> Il existe quatre protocoles AAL: AAL1, AAL2, AAL3/4 et AAL5:

- AAL1: débit binaire constant (convient pour la vidéo et la voix);
- AAL2: longueur variable, faible débit binaire, sensibilité aux retards (convient pour la téléphonie et la partie fixe des réseaux GSM);
- AAL3/4: conçu pour le mode sans connexion et le service d'acheminement assuré de données (et non pour traiter correctement le cas de cellules perdues ou erronées), et
- AAL5: conçu pour les services d'acheminement non assuré de données (d'autres services peuvent être contractés, bien que cela ne soit pas le cas à ma connaissance lorsque le protocole IP est utilisé).

faciliter l'accès des systèmes finals utilisant IP sous ATM aux attributs de qualité de service ATM. On devrait également observer plus souvent la fourniture via IP sur ATM de caractéristiques de qualité de service utiles aux utilisateurs finals, comme dans le cas d'une liaison ATM entre ordinateurs de bureau.

Si beaucoup le considéraient, il y a 4 ou 5 ans, comme le vecteur grâce auquel l'Internet nouvelle génération deviendrait une réalité, le mode ATM semble avoir atteint son point de maturité "commerciale", ce qui laisse présager un déclin de son attrait auprès des grands fournisseurs ISP. Certains d'entre eux sont déjà passés à la commutation MPLS bien qu'ils continuent probablement d'utiliser ATM pour le transport de paquets IP.

### **3.4 Contraintes techniques entravant le développement de services QoS et Cos**

#### **3.4.1 Problèmes de qualité de service aux limites de l'Internet et à l'intérieur des réseaux**

De nombreux problèmes de qualité de service se posent aux points d'encombrements des réseaux ISP de transit et aux limites avec d'autres réseaux. Des difficultés de ce type se rencontrent toutefois également autour des extrémités de l'Internet, les principales étant sans doute les suivantes:

- débit relativement faible offert par la plupart des lignes d'accès résidentiel;
- engorgement dans le réseau d'accès (c'est-à-dire au niveau de l'accès xDSL) ou au niveau de la connexion virtuelle entre le multiplexeur DSLAM et le point d'accès au réseau dorsal;
- engorgements qui se produisent entre les réseaux locaux et les fournisseurs ISP des utilisateurs finals, dans les réseaux WAIN et au niveau des différents points d'interconnexion.

Plus généralement, il existe plusieurs facteurs freinant actuellement le développement de la convergence entre l'Internet et d'autres plates-formes (telles que le RTPC). On peut les regrouper en plusieurs catégories non disjointes:

- la gestion des encombrements *sur* réseaux IP n'est pas encore vraiment au point et conduit souvent à des niveaux de qualité de service inappropriés pour certains types de service (voix sur IP par exemple)<sup>25</sup>;
- il n'est pas possible de fournir le niveau QoS le plus élevé ou plusieurs catégories de service avec différents niveaux de qualité *entre* réseaux ISP pour des raisons techniques, telles que des incompatibilités logicielles ou même matérielles (un logiciel/matériel ISP peut ne pas être en mesure d'accepter les caractéristiques QoS relatives à un autre fournisseur ISP);

---

<sup>25</sup> Les valeurs QoS sont limitées en raison des traitements effectués au niveau de l'ordinateur central, de l'interface d'accès réseau ou à l'intérieur du réseau. Les taux de perte, le taux d'insertion, le retard et la variation du retard ne doivent donc pas dépasser certaines valeurs limites au niveau des connexions de réseau afin d'obtenir les paramètres de qualité de service voulus. Ceci est généralement vérifié, même dans le cas d'un service "assuré au mieux" (même si celui-ci ne fait l'objet d'aucune contrainte de qualité de service particulière), lorsque le dimensionnement du réseau permet d'éviter l'encombrement.

Selon McDysan (2000), un réseau de communication risque d'être engorgé par suite de la défaillance d'un certain nombre de types de ressources réseau, les principales étant: la capacité de liaison de transmission, le taux de transmission des paquets au niveau routeur, la disponibilité de ressources spécialisées (récepteur de tonalité par exemple), le taux de traitement d'appels et la capacité de mise en mémoire tampon.

- on ne dispose pas de systèmes informatiques de comptabilité à même de fournir les données de mesure de trafic et de facturation entre réseaux, tels que ceux permettant de fournir plusieurs niveaux de qualité de service sélectionnables par les abonnés suivant le type de service de communication utilisé;
- il n'existe pas d'interface au niveau de l'utilisateur final permettant à celui-ci de faire un choix pertinent entre les différentes classes de service proposées;
- la qualité des réseaux d'accès est actuellement insuffisante pour que les utilisateurs finals puissent remarquer, dans la plupart des cas, les problèmes de qualité de service intervenant entre réseaux dorsaux.

Pour l'essentiel, ces problèmes n'ont pas été résolus, en dépit des efforts considérables engagés.

### 3.4.2 Problèmes de qualité de service intervenant aux limites de réseau

Un trafic échangé entre réseaux ISP est appelé trafic "hors réseau" ("off-net")<sup>26</sup>. Il peut occasionner un certain nombre de problèmes de qualité de service, dont les principaux peuvent être expliqués comme suit:

- i) Lorsque les réseaux qui s'interconnectent utilisent des équipements différents non conformes à des normes industrielles parfaitement établies, on observe généralement un certain nombre de problèmes ayant une incidence sur la qualité de service. Les mécanismes conçus pour améliorer la qualité de service ne fonctionnent plus et les systèmes de gestion ne sont pas tous conformes à une même norme.
- ii) Les accords de niveau de service (SLA) proposés par les fournisseurs de transit sont tous différents. Les propriétés statistiques des réseaux ISP diffèrent et ne sont en outre pas facilement comparables notamment parce que ces données sont recueillies de diverses manières.
- iii) Les spécifications du service VBR en mode ATM (utilisé pour le trafic Internet) diffèrent parfois entre réseaux, ce qui a pour effet que la qualité de service n'est pas maintenue lorsque le trafic passe d'un réseau à un autre.
- iv) Les équipements datant de deux ou plus risquent de ne pas présenter les mêmes capacités de qualité de service que celles offertes par des équipements plus récents.

Il résulte des considérations susmentionnées que la dégradation de la qualité de service aux limites de réseau est un phénomène très courant.

On peut également craindre que l'obtention d'éventuelles solutions à ces problèmes de QoS puisse être retardée en raison d'un manque de coordination. Tous les réseaux qui gèrent des datagrammes envoyés entre ordinateurs centraux communicants (ou "équipements terminaux" en langage RTPC) doivent être en mesure de conserver les paramètres QoS fournis par le réseau d'origine de ces données si ces paramètres doivent être actualisés entre entités hôtes ou communicants. En d'autres termes, si l'un des fournisseurs ISP impliqué dans le processus de communication assure dans sa partie de réseau un niveau QoS inférieur à ceux des autres fournisseurs, le niveau QoS global du flux en sera diminué d'autant (ce cas est illustré sur la Figure 3-4). Les responsables d'un réseau donné risquent donc de montrer quelques réticences à investir dans une meilleure qualité de service s'il n'est pas possible de coordonner cet effort à celui d'autres acteurs intervenant dans la chaîne de transmission.

---

<sup>26</sup> Un trafic "sur réseau" ("*on-net*") est un trafic échangé entre ordinateurs centraux reliés à un même système autonome et donc transmis via un protocole d'acheminement sur passerelle intérieure (IGP, *interior gateway routing protocol*), alors qu'un trafic "hors réseau" est au contraire acheminé entre différents réseaux asynchrones par un protocole d'acheminement sur passerelle extérieure (EGP, *exterior gateway protocol*).

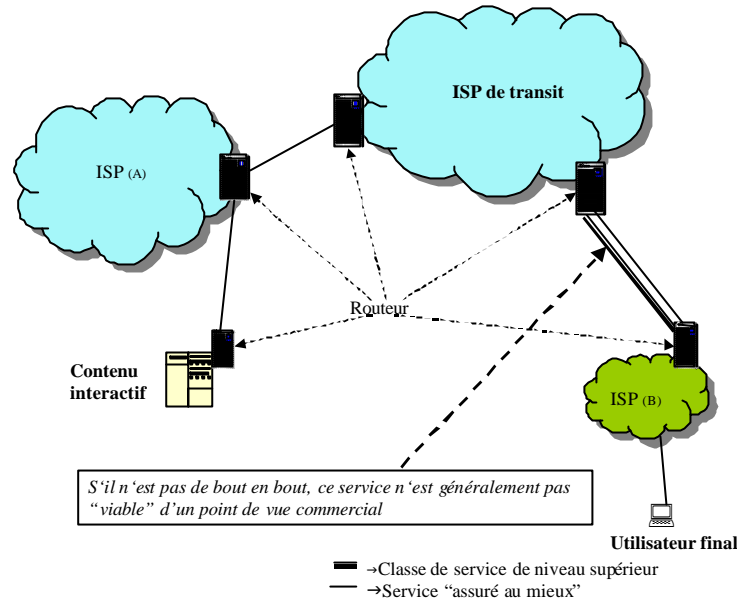


Figure 3-4 – Coordination et qualité de service supérieure de bout en bout

#### 4 Qualité de service: tarification et encombrement

Nous examinons dans le présent paragraphe les facteurs économiques ayant une incidence sur la qualité de service. Nous étudions en particulier les incidences de la tarification et de la gestion de la demande en matière d'amélioration de la qualité de service, ainsi que l'affirmation selon laquelle les progrès techniques rendront inutiles la gestion de la demande, la baisse du coût de la largeur de bande et l'accélération de la puissance de traitement étant censées résoudre le problème posé par l'encombrement (c'est-à-dire par la rareté des ressources disponibles).

Les arguments développés dans le présent paragraphe seront utiles pour comprendre les études théoriques analysées dans l'Annexe II.

##### 4.1 L'Internet n'est pas un "bien" économique "public"

On part ici du principe selon lequel la question de la gestion de l'encombrement ne peut pas être traitée de manière satisfaisante uniquement par le biais de la technique, par exemple en trouvant des moyens plus efficaces pour utiliser la capacité existante ou en recourant systématiquement à un accroissement de la largeur de bande. On trouvera dans l'Annexe I une justification de ce type d'approche, qui consiste notamment à privilégier exagérément le rôle de l'ingénierie dans l'Internet. Un bon nombre des problèmes spécifiques à ce type d'approche sont toutefois examinés ci-après.

Compte tenu de ce qui précède, les avancées techniques concernant l'Internet devraient entre autres viser à offrir des mécanismes permettant de gérer la demande. Pour ce faire, on envisage le plus souvent d'accroître le prix des services aux périodes d'encombrement (par exemple, un prix fonction de débit de bits), ce qui devrait être encore plus avantageux si plusieurs classes de service sont concernées. Les techniques actuelles ne permettent pas de proposer une tarification en fonction de l'encombrement ou de la classe de service. Comme on l'a vu plus haut, la raison principale en est sans doute que souvent le niveau de qualité de service n'est pas maintenu lorsque le trafic passe d'un réseau à un autre, ce qui hypothèque le développement de systèmes de comptabilité et de facturation ainsi que la mise en oeuvre d'un logiciel d'interface utilisateur se rapportant à la tarification en cas d'encombrement ou la mise en place d'un système proposant plusieurs catégories de qualité de service.

Jusqu'à présent, les paquets circulant sur l'Internet sont acceptés par les réseaux connectés sans garantie spécifique (bien que les accords SLA prévoient généralement des compensations en cas de non-respect de paramètres statistiques "garantis"), essentiellement sur la base d'un service "assuré au mieux". Le traitement des paquets acheminant un courrier électronique est donc identique à celui de paquets relatifs à une conversation téléphonique en cours<sup>27</sup>. Du point de vue gestion de la demande, ce traitement identique des paquets dans le cadre d'un service assuré au mieux est problématique pour au moins deux raisons:

- 1) les fournisseurs de service ne sont pas incités à assurer des services temps réel sur les réseaux, car il n'existe aucun modèle à la fois commercial et technique leur permettant d'assumer l'augmentation des coûts que suppose la fourniture d'une qualité de service temps réel;
- 2) les demandes des utilisateurs finals pour différents niveaux de qualité de service ne sont pas prises en compte; même pour un type donné d'application (par exemple la vidéoconférence), les demandes des divers utilisateurs seront très différentes à un instant quelconque.

Ces deux problèmes peuvent être partiellement résolus en appliquant une *tarification en fonction de l'encombrement*. Nous allons à présent étudier plus en détail l'incidence que pourrait avoir l'absence d'une telle tarification sur le développement futur de l'Internet ainsi que les éventuelles conséquences politiques de sa mise en oeuvre. L'étude de catégories optionnelles de qualité de service (CoS) fera l'objet du § 4.3.

## 4.2 Structure des prix et structure des coûts

Pour être rentable, la structure de prix proposée aux utilisateurs devrait correspondre à la structure des coûts générés par ces derniers, ce qui signifie que le mode de facturation au client devrait refléter le mode de génération des coûts.

Les principales classes de coûts induites par la fourniture de services Internet sont les suivantes:

- i) La construction d'un réseau Internet se traduit par des coûts fixes indépendants du mode d'utilisation du réseau. Il existe également des coûts de développement qui ne dépendent pas du nombre de clients (coûts de développement logiciel par exemple). La tarification forfaitaire est l'instrument efficace pour recouvrer ces coûts. Toutefois, puisqu'on ne peut pas considérer que ces coûts sont proportionnels au nombre d'utilisateurs, le mode de tarification forfaitaire le plus efficace consisterait à proposer des facturations propres à chaque abonné, ceux dont la demande est la plus "pressante" devant payer davantage que les utilisateurs plus "conciliants"<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup> Après avoir adopté le mode ATM, les grands réseaux dorsaux IP ont pu proposer des contrats de transit comprenant des données statistiques de qualité de service.

<sup>28</sup> En effet, si la gamme générale de prix du fournisseur de services est limitée de telle sorte que celui-ci ne puisse réaliser qu'un retour sur investissement "raisonnable", il faut, pour offrir un rapport coûts/efficacité optimal, que les prix d'accès soient inversement proportionnels au niveau de "souplesse" auquel l'abonné est prêt pour sa demande de trafic, sous réserve qu'aucun client ne doit s'acquitter d'un abonnement dont le montant est supérieur à son "consentement à payer". Il est évident que les applications sont plutôt théoriques que pratiques pour ce type de tarification, généralement appelée tarification de Ramsey. On en trouvera une étude détaillée dans l'article de Brown et Sibley (1986).



L'idée maîtresse est que personne ne devrait être exclu de l'offre de service proposée en raison des niveaux de prix, censés couvrir les coûts associés à la fourniture des ressources réseau et logicielles de base<sup>29</sup>.

Dans la pratique, ces prix sont généralement "modulés" pour prendre en compte les clients dont les demandes sont "peu pressantes". Ces derniers risquent donc de devoir trouver d'autres biais pour accéder à l'Internet.

- ii) La connexion d'un client à l'Internet représente également un coût initial à la charge du fournisseur ISP. Il s'agit principalement de coûts administratifs, qui, puisqu'ils apparaissent client par client, doivent également être facturés sur cette base si l'on veut que la tarification soit la plus efficace possible.

Compte tenu du coût marginal induit par chaque nouvel abonnement, ce dernier comportera une redevance de connexion/déconnexion par abonné ainsi qu'un retour sur investissement incrémental associé à ces coûts.

- iii) Lorsque l'Internet est encombré, un coût marginal apparaît lorsque des paquets supplémentaires sont envoyés, qui comprend le temps d'attente auquel doivent alors faire face tous les utilisateurs. Destinée à éviter les coûts induits d'externalisation de l'encombrement, la tarification du coût marginal présenterait les avantages suivants:

- a) encourager les utilisateurs présentant des demandes de trafic relativement "peu pressantes" (utilisateurs peu disposés à payer, par exemple) à reporter leur demande à une période sans encombrement;
- b) envoyer un signal aux fournisseurs ISP qui, bénéficiant de recettes marginales additionnelles, seront incités à investir pour augmenter leurs capacités réseau et ainsi faire face aux situations d'encombrement<sup>30</sup>.

Si le prix facturé est supérieur au coût marginal associé au temps de retard, la règle générale appliquée est que cette différence sera consacrée à l'accroissement de la capacité du réseau<sup>31</sup>.

A l'heure actuelle, la structure des prix dont doivent s'acquitter les abonnés de l'Internet correspond peu au mode de génération des coûts. Obtenir un service Internet signifie aujourd'hui s'acquitter d'un ou plusieurs des éléments suivants:

- un abonnement périodique stipulant éventuellement une limite supérieure du nombre de gigabits transmis par mois, avec passage à la catégorie d'abonnement supérieur en cas de franchissement de ce palier;
- frais d'installation de lignes louées/DSL;
- location de lignes louées/DSL;

---

<sup>29</sup> Il faut garder à l'esprit que les coûts de l'accès client (la boucle locale) sont censés être couverts par les frais de connexion et d'abonnement perçus par l'opérateur d'accès. En cas d'utilisation de lignes louées ou xDSL, certains coûts additionnels seront générés par l'abonné.

<sup>30</sup> Ce point dépend très fortement des différences de structure de tarification entre fournisseurs ISP, question dont nous avons supposé jusqu'à présent qu'elle ne posait pas de difficulté.

<sup>31</sup> Les investissements de capacité tendant à être "indivisibles", cette règle doit souvent être précisée par les considérations suivantes: le revenu marginal obtenu doit être supérieur au coût de construction induit par un certain accroissement marginal de capacité.

- taxation à la minute/à la seconde des appels téléphoniques vers le fournisseur ISP, perçue par le fournisseur du réseau d'accès (généralement l'opérateur de télécommunication historique).

Ce dernier point est clairement le seul qui induise des coûts marginaux d'utilisation à la charge des utilisateurs de l'Internet<sup>32</sup>.

Une pression politique croissante dans de nombreux pays vise à permettre l'accès à l'Internet sans acquittement de taxes d'utilisation marginale. Les deux types de service présentant actuellement cette caractéristique sont les services à large bande (ADSL principalement) et FRIACO. Certains gouvernements ont déjà investi des sommes importantes pour étendre la zone de disponibilité des services ADSL. Il semble vraisemblable, en chiffres absolus ou en pourcentage du nombre total d'abonnements à l'Internet, qu'une utilisation illimitée de l'Internet sera plus courante dans l'avenir<sup>33</sup>. Pendant les périodes d'encombrement, il s'agit d'un modèle opposé au modèle nécessaire si l'on veut que l'Internet converge avec les plates-formes traditionnelles telles que les réseaux RTCP, CATV ou la télévision hertzienne gratuite (FTATV)<sup>34</sup>. La migration de petites applications commerciales ou résidentielles vers le mode ADSL, pour lequel aucune tarification en fonction de l'utilisation n'est appliquée<sup>35</sup>, accroîtra le trafic au niveau de la connexion d'accès ATM ainsi que sur l'Internet, et *ceteris paribus* tendra également à accroître l'encombrement sur l'Internet<sup>36, 37</sup>.

Lorsque le nombre d'abonnés n'est pas limité et que les utilisateurs n'ont pas à faire face à des coûts d'utilisation marginale, l'Internet est plus ou moins considéré comme un bien public. Les biens réellement publics ne se déprécient pas du fait de leur utilisation, c'est-à-dire que l'utilisation que je fais d'un tel bien n'a pas d'incidence sur la jouissance que vous pouvez tirer de l'utilisation de ce

---

<sup>32</sup> Un fournisseur ISP facture généralement à l'utilisateur final de l'Internet uniquement une taxe d'abonnement, bien que parfois il ne lui réclame aucune somme forfaitaire mais préfère partager avec le fournisseur d'accès les recettes des appels à la minute issues des sessions de connexion, c'est-à-dire les sommes versées par le client pour "téléphoner" à l'ISP. On parle aussi parfois de modèle commercial de fourniture ISP "gratuite". Ce partage des recettes est possible parce que le prix d'un appel facturé au client est supérieur aux coûts supportés par le fournisseur d'accès, coûts en moyenne inférieurs au coût d'un appel téléphonique classique et pourtant facturés au même prix que ce dernier.

<sup>33</sup> Les entreprises bénéficiant d'un accès par lignes louées à leur fournisseur ISP évitent déjà d'appliquer des tarifs en fonction de la "consommation".

<sup>34</sup> Le modem ADSL opère une séparation entre les données vocales et les autres données, seule la voix étant autorisée à accéder au commutateur du fournisseur d'accès. Les données Internet sont transmises vers le fournisseur ISP en principe via une connexion d'accès ATM entre le groupe de modem ADLS "DSLAM" et le premier point de présence (PoP) de l'Internet. En ce sens, l'ADSL fournit un service d'accès Internet "toujours connecté".

<sup>35</sup> Certains fournisseurs ISP utilisent certes des paliers de tarification séparant au moins deux niveaux d'utilisation (exprimés en nombre de bits par mois par exemple), mais les catégories ainsi définies sont tellement larges qu'aucun coût marginal d'utilisation n'existe pour la grande majorité des utilisateurs.

<sup>36</sup> Le noyau de l'Internet est protégé de la surcharge du fait de la limitation de trafic au niveau de la connexion d'accès ATM où la plupart des opérateurs régionaux ne garantissent pas plus de 10% de la capacité crête de la vitesse ADSL. La capacité réellement disponible diminue donc à mesure qu'augmente le nombre d'utilisateurs de la connexion d'accès ATM.

<sup>37</sup> De tels accords de tarification tendent à regrouper les utilisateurs finals de telle sorte que ceux qui "utilisent" peu de trafic "subventionnent" en quelque sorte les "gros" utilisateurs.

dernier. Il est clair que l'Internet n'appartient pas à la catégorie ainsi définie et qu'il convient de supposer que se poseront des problèmes similaires à ceux touchant les services considérés abusivement comme étant des biens publics. Cette problématique est souvent désignée sous le terme de *tragedy of the commons*, apparu lorsque des fermiers ont eu l'autorisation de faire brouter gratuitement leur bétail sur des pâturages communs. Les paysans ont profité de cette offre sans qu'aucun d'entre eux ne se rende compte des conséquences que cette autorisation à faire brouter leurs animaux (apparemment) gratuitement pouvait avoir sur la capacité des autres troupeaux à faire de même<sup>38</sup>. L'herbe avait fini par quasiment disparaître des pâturages communs, que plus personne ne pouvait alors utiliser<sup>39, 40</sup>.

Dans le cas de l'Internet, l'absence d'un mécanisme économique de gestion de l'encombrement se traduit pour tous par une dégradation de la qualité de service. Les améliorations logicielles et matérielles ainsi que la baisse des coûts de capacité ont cependant permis à chacun d'entre nous de bénéficier de services Internet classiques dont la qualité de service est acceptable dans la plupart des cas. Toutefois, du fait de l'application des mêmes ressources réseau à tous les paquets, l'Internet n'est pas en mesure d'acheminer des services temps réel dont le niveau de qualité serait proche de ce qui serait nécessaire pour l'essor d'un marché de masse.

La tarification en fonction de l'utilisation peut en principe permettre de reporter à des périodes de moindre trafic certaines demandes intervenant à des périodes de fort trafic et peut également permettre d'indiquer à un fournisseur ISP à quel moment il devient rentable pour lui d'accroître sa capacité réseau du fait de l'augmentation du trafic. L'idée sous-jacente est que chaque utilisateur devrait limiter sa propre utilisation des ressources disponibles en période d'encombrement en fonction de l'ampleur relative des demandes de trafic des autres utilisateurs. Le bénéfice obtenu comparé aux coûts induits est faible dans le cas d'un utilisateur présentant une demande très "peu pressante" (par exemple un consentement à payer en périodes d'encombrement égal à zéro, dans l'hypothèse où le service voulu peut être obtenu hors de ces périodes sans coût marginal à la charge de l'utilisateur). En période d'encombrement toutefois, l'envoi de paquets supplémentaires se traduira pour les autres utilisateurs par un retard additionnel, des pertes de paquets et une dégradation de la qualité de service<sup>41</sup>.

---

<sup>38</sup> Ce phénomène est également connu sous le terme de coût d'externalisation. La plupart des échecs du marché s'expliquent par cette "*tragedy of the commons*" (la pollution, le réchauffement du climat et la diminution des ressources naturelles, par exemple).

<sup>39</sup> Un processus similaire explique les problèmes de réchauffement du climat, de perte de la biodiversité et de diminution de ressources naturelles telles que les réserves en poissons. Si l'utilisation d'une ressource reste "gratuite" et que celle-ci risque d'être épuisée ou surexploitée, il faut soit limiter le nombre d'utilisateurs, soit restreindre l'utilisation globale de cette ressource afin d'en éviter l'épuisement.

<sup>40</sup> L'application de quotas est un moyen usuel pour résoudre ce type de problème. Leur mise en oeuvre, lorsqu'elle est autorisée pour les échanges commerciaux, tend à accroître l'efficacité industrielle. Il est malheureusement souvent difficile pour la police d'imposer le respect de ces chiffres, d'où leur dépassement illicite. Les quotas peuvent également être systématiquement fixés à un niveau trop élevé lorsqu'ils ne sont pas strictement accordés sur une base scientifique mais qu'ils font l'objet d'un compromis politique.

<sup>41</sup> De plus, en l'absence d'un système permettant aux utilisateurs finals d'acquérir la qualité de service qu'ils réclament, on peut soutenir que l'absence d'une offre de services temps réel a également un coût, étant donné que ces services se développeraient si des structures de tarification du coût marginal étaient appliquées.

En l'absence d'encombrement, appliquer une tarification en fonction de l'utilisation n'est absolument pas utile et a au contraire des incidences économiques négatives. Le coût associé à l'envoi d'un nombre additionnel de paquets lorsqu'il n'y a pas d'encombrement est pratiquement nul. Nous disons alors que le coût marginal d'utilisation est nul. On démontre (axiome économique) que dans ces circonstances une tarification en fonction de l'utilisation est inefficace - elle freine le développement économique - alors que la tarification forfaitaire est optimale.

Dans le cas de la téléphonie, l'heure de passage de l'appel a été utilisée comme élément de tarification. L'abonnement constitue une taxe forfaitaire, l'utilisation étant facturée à la minute (ou à la seconde) et variant généralement en fonction du moment de la journée considéré. Cette tarification en fonction du moment de la journée vise à dissuader le passage d'appels de faible priorité lorsque l'encombrement est maximal et d'encourager leur report à une période dont la tarification à la minute est bien inférieure. Il s'agit là d'un modèle tarifaire optimal car les investissements de capacité requis pour gérer le trafic des abonnés dont les demandes sont "peu pressantes" au cours d'une période de fort trafic sont supérieurs à leur consentement à payer (WTP, *willingness-to-pay*) pour obtenir la capacité nécessaire à la satisfaction de leur demande.

La tarification en fonction de l'heure de la journée et la tarification à la minute/à la seconde sont deux concepts qui semblent moins adaptés à l'Internet qu'au RTPC, notamment parce que les périodes crête d'utilisation de l'Internet semblent davantage susceptibles de varier dans le temps (en particulier au niveau des fournisseurs ISP des utilisateurs finals), la tarification en fonction de l'heure de la journée ne permettant donc peut-être pas une gestion totalement efficace des encombrements. Ainsi, tenter d'augmenter les prix de session ou d'utilisation à un moment particulier de la journée durant lequel le trafic sur l'Internet est censé être le plus encombré risquerait en fait ne pas permettre de "cibler" les véritables périodes d'encombrement.

D'autres problèmes sont liés à la tarification en fonction du moment de la journée. Ainsi, l'Internet étant composé d'un très grand nombre de réseaux, la période d'utilisation crête, même dans une même zone temporelle, peut très bien ne pas être la même suivant le lieu considéré. De plus, dans le cas d'un fournisseur ISP de transit vers plusieurs autres fournisseurs, dont les réseaux présentent des périodes d'utilisation crête plutôt diverses, il semblerait que des prix différents s'appliquent au même moment à des fournisseurs se faisant concurrence (à la marge) sur un même marché, même si leurs structures de trafic/créneau temporelles sont différentes. Des inquiétudes pourraient donc naître quant au respect des règles de la concurrence.

Autre problème: contrairement à un circuit commuté, loué exclusivement par l'entité payante pour la durée d'un appel, les paquets de données de l'Internet partagent la capacité réseau avec d'autres paquets, de telle sorte que les coûts dépendent davantage du nombre de paquets transmis que de la durée de transmission. On pourrait tenir compte partiellement de ce point en facturant l'utilisation de l'Internet sur la base de la durée de transmission et de la largeur de bande. L'efficacité d'un serveur proxy dont la tarification est fondée sur les prix d'utilisation et la largeur de bande d'accès sera beaucoup moins grande que celle d'un système à tarification marginale fondé sur le nombre de paquets transmis.

Une solution élégante et potentiellement très efficace au problème de la tarification marginale des coûts de l'Internet a été décrite par Mackie-Mason et Varian (1995) sous le nom de "marché intelligent" (*smart market*). De notre point de vue, l'intérêt essentiel de cette contribution réside dans sa valeur pédagogique et dans l'exposé des problèmes économiques qui se posent, en partie via les solutions proposées. Notre étude vise davantage à décrire une solution quasi idéale qu'à proposer

une solution pratique de gestion des encombrements, ce qui ne serait pas possible (au moins au stade actuel d'avancée des techniques)<sup>42</sup>. Cette proposition concerne une classe de service, mais peut s'appliquer à un nombre quelconque de classes.

Le modèle proposé par Mackie-Mason et Varian conduirait à imposer un prix en cas d'encombrement déterminé par un système d'enchères (*enchères de Vickrey*) effectuées en temps réel. Le principe est que les utilisateurs finals communiquent des enchères pour leurs paquets juste avant le début de leur session de communication. On sait qu'un tel système incite fortement tous les utilisateurs finals à faire preuve d'un "consentement à payer" maximum (pour les paquets sortants et, ce qui est plus important, pour les paquets renvoyés), c'est-à-dire qu'il établit "les mesures incitatives propices à une véritable prise de conscience"<sup>43</sup>. En effet, le prix réellement facturé à un utilisateur final quelconque n'est pas égal à l'enchère que ce dernier a proposé, mais correspond à l'enchère de l'utilisateur marginal (dernière personne à qui l'accès à l'Internet est garanti en conditions d'encombrement), c'est-à-dire le prix de rajustement du marché<sup>44</sup>. Tous les utilisateurs dont les demandes de trafic sont acceptées au cours d'une même période paient la même somme. Les utilisateurs dont le consentement à payer est inférieur au prix de rajustement du marché n'ont pas accès à l'Internet et devront réitérer ultérieurement leur demande. Lorsqu'il n'y a pas d'encombrement, les demandes de tous les enchérisseurs sont admises gratuitement.

Un autre attrait de ce "marché intelligent" est qu'il génère, lorsque les conditions de concurrence sont établies, des signaux économiques pertinents à destination des fournisseurs ISP afin de les inciter à accroître leur capacité réseau. Une possibilité d'investissement rentable sera ainsi signalée lorsque les recettes marginales consécutives à l'admission de nouveaux utilisateurs en période de trafic crête sont supérieures au coût marginal d'adjonction de capacité. La capacité de réseau sera donc présentée de telle sorte que les recettes marginales et le coût marginal soient égaux, ce qui correspond à une efficacité économique maximale.

Le concept de marché intelligent peut ne pas être simple à mettre en oeuvre d'un point de vue pratique, mais ses caractéristiques économiques doivent être comprises par l'ensemble des concepteurs de l'Internet pour que des choix économiques éclairés puissent être opérés entre les diverses techniques applicables.

Les travaux de Mackie-Mason et Varian ont été publiés au milieu des années 90. Si ce type de mise aux enchères garde sa pertinence pour la gestion des encombrements sur l'Internet, de nombreux progrès techniques ont diminué l'intérêt que présente ce concept de marché intelligent. Plus important peut-être, les développements techniques permettront un traitement différencié des paquets de telle sorte que puissent coexister plusieurs réseaux Internet virtuels présentant chacun des paramètres QoS différents, les paquets étant étiquetés suivant la classe de service (CoS) qui leur est attribuée.

---

<sup>42</sup> La solution idéale supposerait une détermination dynamique des prix, ceux-ci étant propres à l'abonné considéré et variant continuellement pour refléter l'"état du système". Les questions de tarification optimale et de tarification quasi optimale sont traitées dans l'Annexe II.

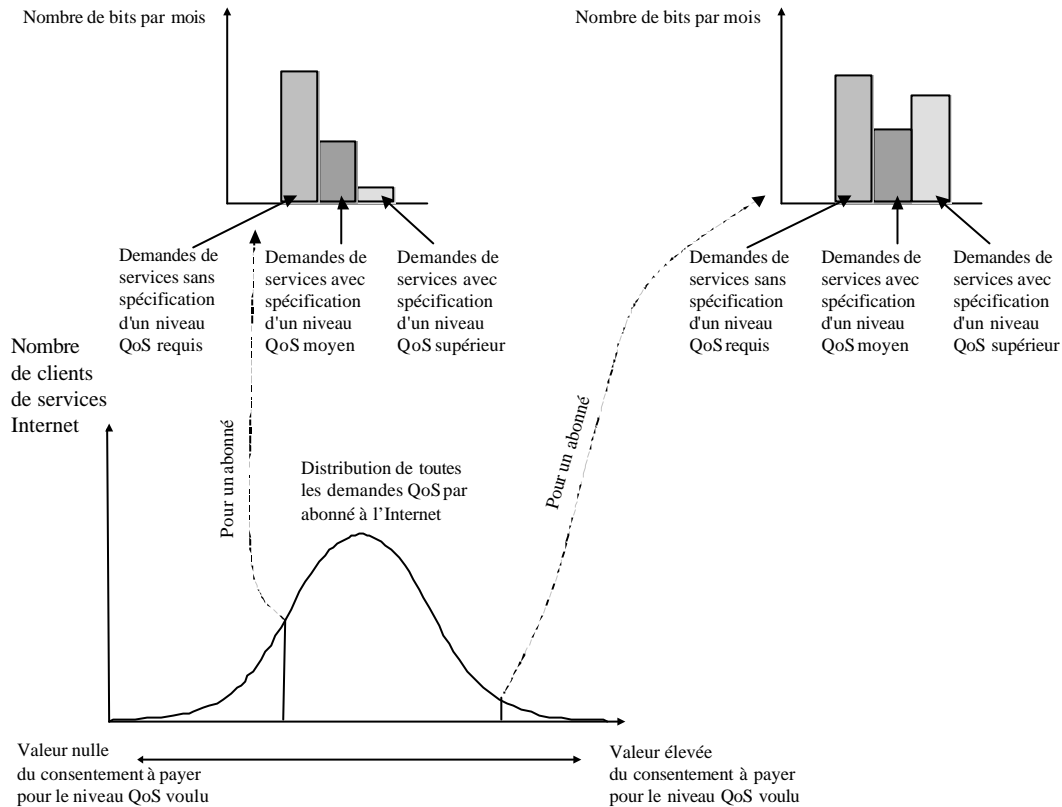
<sup>43</sup> En 1996, William Vickrey a reçu le prix Nobel d'économie pour ses travaux du début des années 60 sur la théorie des incitations dans le cas d'informations économiques réparties de manière asymétrique.

<sup>44</sup> La seule exception à cette règle correspond au cas d'un utilisateur marginal dont le consentement à payer est égal au prix de rajustement du marché.

### 4.3 Tarification en fonction de la classe de service

Même si elle ne traite pas explicitement de cette question, l'analyse de Mackie-Mason et Varian s'applique au cas de plusieurs classes de service, les utilisateurs devant alors simplement accompagner leurs enchères de la spécification d'une classe de service. D'autres conditions indiquant le passage de leur demande à une autre catégorie de service pourraient être précisées par les enchérisseurs s'ils préfèrent bénéficier d'une qualité de service inférieure, dans l'éventualité où l'enchère proposée pour le service ayant les caractéristiques de qualité de service voulues serait inférieure au prix de rajustement du marché. Les utilisateurs pourraient alors être amenés à préciser quelques paramètres supplémentaires s'ils souhaitent que leur demande concerne éventuellement d'autres catégories de service.

Si le concept de classe de service était appliqué au monde de l'Internet, les fournisseurs ISP pourraient étiqueter les paquets conformément à la classe de service indiquée par leurs clients. Dans un système permettant aux utilisateurs finals d'opérer une sélection entre plusieurs classes de service applicables à leurs datagrammes de session de communication, la somme facturée par le fournisseur ISP serait fonction du nombre et du type de paquets étiquetés envoyés. En tant que tel, un système de ce type ne serait pas idéal s'il conduisait les fournisseurs ISP à continuer à ne pas utiliser les prix réels associés au coût marginal. Pour bénéficier de la meilleure classe de service, un abonné peut décider de payer un prix plus élevé, peut-être fondé sur le nombre de bits utilisés, ainsi qu'un abonnement mensuel. Il a alors la possibilité d'envoyer tous ses paquets aux heures de pointe ou à une autre période - le prix restant identique quel que soit le moment choisi. Cela signifie que pour une classe de service donnée, aucun mécanisme n'existe qui permette de mettre en correspondance le volume de demandes en période d'encombrement et les signaux incitant les fournisseurs ISP à investir dans un accroissement de leur capacité réseau; éviter l'occurrence d'encombres devient alors difficile, alors même que les recettes moyennes dégagées par l'exploitation de ces réseaux sont plus que suffisantes pour couvrir les coûts moyens. Un service correspondant à la classe de service la plus élevée étant proposé au prix d'un service temps réel de qualité optimale, le maintien d'un tel niveau de qualité serait stimulé, mais des surcapacités continueraient d'être requises en raison de l'absence de signaux relatifs à l'évolution du coût marginal. La méthode proposée pour résoudre le problème des encombrements ne semble donc pas optimale, bien qu'elle puisse être suffisamment élaborée pour favoriser la diffusion du concept de classe de service et la fourniture à grande échelle de services temps réel sur l'Internet.



Source: WIK-Consult.

**Figure 4-1 – Structure de la demande de services Internet**

L'essentiel des recettes tirées de l'Internet proviennent des utilisateurs finals (organisations et foyers). Pour certaines communications, seule une classe de service est proposée et toutes les demandes sont traitées sur un pied d'égalité. La demande de tout utilisateur final sera toutefois non spécifique et pourra s'appliquer à différentes classes de service, en fonction de critères tels que l'objet de la communication, l'application demandée ou de préférences susceptibles de n'être connues que du seul utilisateur final. Une chose est certaine: l'exigence de plusieurs classes de service *découlera* des demandes des utilisateurs finals. Les fournisseurs ISP garderont cette vérité à l'esprit à mesure que se développeront réellement les classes de service.

La structure de la demande de services Internet est illustrée sur la Figure 4-1. La distribution tracée dans la partie inférieure de cette figure se rapporte à tous les utilisateurs de l'Internet, ceux appartenant à des organismes spécialisés qui doivent d'une part s'acquitter d'importantes missions de service exigeant une probabilité d'admission et des valeurs QoS élevées et qui d'autre part ont besoin d'utiliser des services classiques de courrier électronique ou de navigation, comme ceux qui utilisent l'Internet pour envoyer uniquement des messages non urgents. On peut toutefois supposer que la plupart des clients appartenant à cette distribution se connectent à l'Internet pour des raisons différentes et utilisent plusieurs services, tels que le courrier électronique, le transfert de fichiers, la navigation et la vidéo en continu. Les classes de service demandées par un individu donné différeront en partie en fonction de l'application choisie et de l'objet de la communication, comme on le voit sur les diagrammes à bandes de la Figure 4-1.

Le principal problème qui se pose actuellement concernant la voix sur IP et les services interactifs temps réel n'est pas qu'il n'existe aucun réseau capable de fournir les données statistiques QoS nécessaires, mais plutôt qu'il apparaît que seul un nombre limité de réseaux est en mesure de fournir

ces grandeurs et qu'il s'agit généralement de réseaux IP privés, c'est-à-dire de réseaux Intranet. Les fournisseurs ISP proposant des services Internet publics ne sont pas suffisamment incités à développer des services VoIP, en particulier lorsque des paquets contenant des données de conversation téléphonique transitent vers d'autres réseaux.

#### **4.4 Tarification et qualité de service entre un fournisseur ISP et son fournisseur de transit**

La tarification appliquée au niveau d'un fournisseur de transit d'un fournisseur ISP desservant un fournisseur VoIP local sera déterminante pour établir la tarification entre le fournisseur ISP et le fournisseur VoIP et celle entre ce fournisseur VoIP et ses clients. La structure des prix facturés par un fournisseur ISP de transit ainsi que leur niveau tendront à se refléter dans les prix proposés par les autres fournisseurs. Nous étudions dans le présent paragraphe la structure des prix de transit ainsi que les garanties de qualité de service contractées par les fournisseurs de service.

##### **4.4.1 Structure des prix de règlement**

Comme nous l'avons déjà noté et à de très rares exceptions près, la conclusion entre fournisseurs ISP d'un accord d'interconnexion reposant sur des clauses d'échanges de flux homologues n'implique aucun paiement. Suivant un tel modèle, le trafic se fait au bénéfice entier de l'émetteur. Ces accords d'échanges de flux homologues existent bien au travers de la hiérarchie de l'Internet mais ne concernent en réalité qu'une faible part du trafic transitant entre fournisseurs ISP interconnectés.

Comme dans le cas des échanges de flux homologues, les données relatives aux contrats de transit restent confidentielles. Cependant, des conversations avec un certain nombre de personnes occupant des fonctions relativement importantes auprès de divers fournisseurs ISP ont permis de collecter suffisamment d'informations pour dresser un tableau de la structure des prix de règlement pour le transit, bien qu'évidemment, les informations fournies soient assez générales et ne précisent aucunement les niveaux de prix<sup>45</sup>.

Il existe plusieurs types d'accords de taxation du trafic de transit. Le paiement peut émaner du fournisseur ISP des utilisateurs finals (ou fournisseur de services en ligne - *OSP, online service provider*) qui agit en tant que récepteur du trafic de transit, du fournisseur ISP hébergeant les données Internet (la société qui émet les données requises) ou conjointement de ces deux fournisseurs au bénéfice du fournisseur de transit.

En pratique, le trafic de transit est généralement facturé sur la base du *trafic de retour*, c'est-à-dire sur la base du trafic transmis au fournisseur ISP dont un client sollicite les données. La taxation des fournisseurs ISP de transit (principalement les ISP de grande taille et les fournisseurs IBP) se fait sur la base du trafic sortant vers leurs fournisseurs ISP clients. Les fournisseurs de transit ne paient rien à leurs fournisseurs ISP clients bien qu'ils reçoivent un trafic de données en provenance de ces derniers, encore que ce trafic soit bien moins important que celui qui s'écoule entre un fournisseur de services et ses clients. Bien que ce modèle ne semble pas très équitable à première vue, les accords de taxation de transit actuels présentent certains avantages économiques, dont le moindre n'est pas que les capacités de réseau nécessaires sont généralement déterminées en fonction du flux le plus important, en particulier aux points d'interconnexion. Etant donné que la plupart des paquets transmis s'écoulent d'un fournisseur ISP hébergeur de données Internet via des fournisseurs IPS de transit jusqu'à un fournisseur de services en ligne, il semble que la responsabilité d'éventuels encombrements incombe à ce trafic de transit et que celui-ci conditionne les nécessités d'investissement au niveau des fournisseurs de transit.

---

<sup>45</sup> Les fournisseurs ISP que nous avons contactés étaient les suivants: MCI/WorldCom, Cable & Wireless et Genuity.



Il est utile d'analyser les accords de tarification du trafic de transit en termes de "qualité" des signaux économiques (concernant les investissements notamment) transmis aux entités concernées via les prix de gestion des encombrements, d'utilisation des ressources et de concurrence entre fournisseurs de trafic de transit. Dans la pratique cependant, une telle analyse s'avère difficile et potentiellement erronée puisque les sources d'information ne sont pas publiques et que les informations verbales sont le plus souvent très générales.

Les données disponibles semblent indiquer qu'aucun modèle industriel régissant la structure de ces prix n'a été accepté. Certains fournisseurs ISP de taille importante sont en mesure de négocier avec le fournisseur de transit une structure de prix, alors que d'autres la sélectionnent à partir d'une liste prédéterminée. L'offre de prix de transit semble être structurée autour de trois éléments de base:

- un tarif fixe pour un certain nombre de bits par mois;
- un tarif variable pour les bits supplémentaires;
- un tarif fondé sur le débit crête, auquel se rattachent:
  - la "largeur de canal" (c'est-à-dire le débit crête nominal *choisi*);
  - certaines mesures portant sur le débit crête *réel* ("sporadicité").

La tarification à deux composantes semble être la norme, le tarif fixe par bit pouvant être relativement faible par rapport à celui de la composante variable<sup>46</sup>. Ce type d'accord permet à un fournisseur ISP, dans la mesure où ce dernier est capable d'évaluer précisément son utilisation mensuelle future, de payer pour le trafic de transit une taxe mensuelle prédéterminée, tout bit supplémentaire étant surfacturé. Cette surfacturation peut être importante mais le plus souvent en rapport avec les coûts des fournisseurs de transit qui mettent à disposition les capacités réseau supplémentaires nécessaires en cas de fortes demandes.

Certains clients de trafic de transit peuvent toutefois choisir de ne payer qu'une taxe forfaitaire. Cette possibilité a l'avantage de fixer un cadre à ceux qui disposent d'un budget annuel pour leurs dépenses de communication et qui privilégient la sécurité d'un paiement fixe connu à l'avance pour tous leurs besoins de trafic. On peut penser que les coûts de transit globaux seront alors supérieurs à ceux qui résulteraient de l'application de la tarification à deux composantes, toute composante tarifaire restreignant les demandes en période de trafic crête ayant de facto été exclue.

Il est courant que les clients les plus importants négocient certains détails relatifs à leurs besoins particuliers. Les fournisseurs de contenu importants qui gèrent leur propre routeur, ainsi que de nombreux fournisseurs ISP (qui se chargent tous de la gestion de leur routeur), concluent fréquemment des accords d'interconnexion avec plusieurs fournisseurs de transit.

Dans le cas où les sommes relatives au trafic non utilisé représentent une faible partie de la facture de transit mensuelle d'un fournisseur ISP, la structure de prix peut permettre au client de négocier avec son fournisseur en vue d'obtenir de meilleurs tarifs. Le multihébergement peut donc constituer pour les fournisseurs ISP et les fournisseurs de contenu importants une stratégie plus efficace, puisque ces fournisseurs ne devront s'acquitter, outre un tarif peu élevé fondé sur la "largeur de canal" choisie, que du paiement de la transmission des paquets qu'ils envoient à leur fournisseur de transit IBP. Le fournisseur ISP pourrait ainsi choisir de transmettre l'intégralité de son trafic via le fournisseur de trafic présentant le meilleur rapport prix/qualité de service, tout en conservant la *possibilité* de commuter ce trafic vers un autre fournisseur IBP si celui-ci propose une meilleure

---

<sup>46</sup> Les statistiques de trafic sont enregistrées au niveau des routeurs, qui disposent de compteurs à cet effet (au niveau des ports).

offre prix/qualité de service ou si une interruption de trafic se produit sur le réseau IBP utilisé. Il semble en résumé qu'une telle structure tarifaire offre une solution de commutation intéressante et peut être gratuite entre fournisseurs IBP au bénéfice des fournisseurs de contenu ou des fournisseurs ISP à hébergement multiples<sup>47</sup>.

La structure de tarification forfaitaire est donc un accord de tarification a minima qui limite la capacité d'un fournisseur ISP ou de contenu à faire jouer la concurrence entre les divers fournisseurs ISP avec lesquels il a conclu des accords de vente de trafic de transit sur une certaine période. Elle peut cependant répondre aux besoins de "sécurité" de certaines entreprises qui ne souhaitent pas dépasser un certain plafond de dépenses pendant la durée du contrat auquel elles ont souscrit.

Les fournisseurs ISP vendant des capacités de transit de trafic ont selon nous de bonnes raisons de préférer - ce qui renforce leur rôle - une tarification composée d'une partie fixe (capacité de base) et d'une partie variable (capacité optionnelle), assortie d'un type de paiement associé à une option de capacité crête, telle que la "largeur de canal". Une tarification qui serait également fondée sur la variabilité du débit de trafic permettrait aux clients de trafic de transit émettant un débit binaire à peu près constant de payer une somme moins importante s'ils continuent à utiliser préférentiellement une capacité de charge de base plutôt qu'une capacité de charge crête<sup>48</sup>.

Il n'existe aucune indication relative à la tarification de la classe de service, vraisemblablement parce que ces services ne semblent pas fonctionner sur l'Internet public. Cette question sera examinée plus en détails ci-après.

#### **4.4.2 Garanties de qualité de service associées au trafic de transit**

Les fournisseurs ISP qui vendent des capacités de transit proposent le plus souvent des garanties de qualité de service portant généralement sur les trois points suivants: le temps de latence, les pertes de paquets et la disponibilité de service. Ils conservent les données statistiques nécessaires à la vérification de leurs propres caractéristiques QoS et fournissent des rapports périodiques à leurs clients. Tout manquement éventuel au respect des paramètres QoS doit être confirmé par les données du fournisseur de transit. Les contrats stipulant une disponibilité de 100% sont apparemment la norme aujourd'hui, même si évidemment dans la réalité cette obligation n'est pas toujours respectée et qu'en conséquence les fournisseurs de trafic sont très rarement amenés à devoir verser à titre de compensation une somme convenue en cas de défaillance du réseau.

L'apparition d'accords de niveau de service (SLA) avec engagement de respect des paramètres QoS, proposés par les fournisseurs de transit, a coïncidé avec l'utilisation du mode ATM sur les réseaux de transport des opérateurs. Suivant cette technologie, les paquets IP d'une même origine sont transmis par le biais de différents "tubes virtuels", appelés conduits virtuels (VP) d'après la terminologie ATM. Les garanties de qualité de service ne s'appliquent toutefois que si le flux de cellules reçues est conforme aux paramètres de trafic qui ont été négociés. Il en résulte donc qu'un réseau doit moduler, en ses extrémités, les caractéristiques de son trafic, juste avant de transmettre ce flux au fournisseur de transit<sup>49</sup>.

---

<sup>47</sup> Ces options sont vendues directement sur de nombreux marchés. Il existe en fait certains marchés sur lesquels ces options sont achetées et vendues.

<sup>48</sup> Un fournisseur ISP européen a indiqué que les prix de transit avaient chuté de 90% entre mars 1997 et mars 2000. Selon un autre fournisseur, ces prix auraient diminué de 50% en Europe de l'Est entre mars et octobre 2001.

<sup>49</sup> L'Annexe III contient une description des attributs QoS d'un réseau ATM.

Les services de transit ne proposent pas d'options de classe de services pour les raisons suivantes:

- aucun modèle commercial applicable ne permet actuellement aux utilisateurs finals de faire un choix entre plusieurs niveaux de classe de service suivant l'application souhaitée, ou, plus généralement, en fonction de la qualité de service demandée;
- aucun des systèmes de facturation actuellement exploités ne permet l'application d'une tarification plus élevée lorsqu'une classe de service supérieure est sélectionnée;
- des problèmes de qualité de service se posent en limites de réseau, concernant par exemple les normes, les équipements ou les interfaces de gestion; ils limitent le passage des options QoS d'un réseau à l'autre.

#### **4.5 La qualité de service et l'Internet nouvelle génération**

L'Internet propose à présent aux utilisateurs finals un certain nombre de services, dont l'éventail va probablement encore s'élargir dans l'avenir. On observe actuellement la convergence entre l'Internet et des plates-formes classiques de communication permettant de fournir des services tels que les services de télécommunication point à point, de conférence point à multipoint, de multidiffusion ou de radiodiffusion (vidéo en continu ou télévision, par exemple). Il convient de noter que les réseaux CATV bidirectionnels proposent déjà une offre intégrée comprenant les services classiques d'appel point à point (téléphonie, par exemple), la radiodiffusion télévisuelle, les services vidéo avec paiement à la demande et les services Internet classiques (courrier électronique et navigation, par exemple).

Sur un réseau IP, toutes ces données peuvent être regroupées en paquets ou cellules (datagrammes) et transmises sur l'Internet, bien que la qualité d'au moins certains de ces services soit alors, aux dires des consommateurs, relativement faible en comparaison de celle offerte par les plates-formes de communication habituelles<sup>50</sup>.

Disposer de différents niveaux de classe de service est considéré comme un élément clé pour que l'Internet nouvelle génération devienne une réalité, c'est-à-dire que les caractéristiques de vitesse et de fiabilité associées aux paquets soient suffisantes pour pouvoir fournir des services (voix sur IP ou services interactifs, par exemple) à un niveau de qualité tel qu'il entraînera l'essor d'un marché de masse. On définit en effet l'Internet comme le réseau des réseaux, qui intègre un grand nombre de services et se veut compétitif sur les marchés de la téléphonie, de la radiodiffusion temps réel, des données interactives et de la vidéo, sans compter les services classiquement proposés par les fournisseurs ISP.

Bien que la mise au point de nombre des techniques particulières étudiées dans le présent rapport ne soit pas encore complètement achevée, plusieurs d'entre elles laissent présager qu'à moyen terme des services temps réel de grande qualité pourraient être couramment disponibles sur l'Internet. De

---

<sup>50</sup> Il y a cependant des exceptions, en particulier les réseaux Intranet, dont les concepteurs sont plus à même de maîtriser les questions de qualité de service de bout en bout.

réelles solutions commerciales fondées sur ces techniques restent cependant à finaliser<sup>51</sup>, en partie à cause de la très grande diversité de l'Internet et en raison des problèmes de qualité de service et de manque de "transparence" entre réseaux, déjà évoqués dans le présent rapport<sup>52</sup>.

La convergence sera précédée d'une période de transition durant laquelle les fournisseurs RTPC historiques seront soumis à une véritable pression concurrentielle consécutive à l'offre de services temps réel tels que la voix sur IP. Il sera intéressant à cet égard d'étudier dans quelle mesure les caractéristiques QoS différeront alors de celles qu'on observe à l'heure actuelle.

L'un des principaux problèmes à gérer ces prochaines années au cours de la phase de transition sera moins celui du niveau de qualité des sessions de communication temps réel que celui de la commande d'admission de service, dont le rôle est d'éviter que des paquets en excès ne soient acceptés sur un réseau à datagrammes IP en période d'encombrement. Dans les réseaux classiques tels que le RTPC ou les réseaux à relais de trame commutés pour lesquels l'attribution de capacité se fait au cours de la phase d'admission de connexion, la probabilité d'occurrence d'un blocage est décrite par des valeurs de probabilité connues qui définissent le niveau GoS attribué à un client. Les principaux risques d'engorgement se situant au niveau de la zone d'accès d'un réseau, il est probable que l'application de la commande d'admission de service sera essentiellement limitée à cette région.

Dans les réseaux multiservices tels que l'Internet nouvelle génération, la commande d'admission de service et les valeurs GoS associées ne sont pas décrites de la même façon que dans le cas des réseaux classiques, mais par des modèles et des algorithmes plus sophistiqués<sup>53</sup>. Sans mise en oeuvre d'une gestion efficace de la demande, des surcapacités considérables seront requises si on ne veut pas qu'un grand nombre d'utilisateurs de services temps réel (voix sur IP en particulier) soient confrontés à une fréquence intolérable des indisponibilités réseau. On peut prévoir qu'au cours de cette phase transitoire, les abonnés soucieux de la disponibilité de service continueront à utiliser le RTPC pendant une période plus longue que les abonnés plus sensibles aux niveaux de prix et que ne perturbe pas la probabilité importante d'un refus d'admission en réponse à une tentative d'appel qu'ils devront alors renouveler après une courte période.

Il existe actuellement différentes façons de mettre en oeuvre des caractéristiques de qualité de service sur des réseaux IP, dont la commutation MPLS, les services *DiffServ*, le protocole Ipv6 ou, ce qui est peut-être le plus facilement réalisable, l'utilisation de l'octet ToS de l'en-tête Ipv4 pour la définition et la reconnaissance d'une hiérarchie de trafic. Cinq niveaux de trafic (voir le Tableau 4-1) sont prévus pour l'Internet nouvelle génération.

---

<sup>51</sup> Voir les différents articles du numéro spécial "*Next Generation Now*" de la revue *Alcatel Telecommunication Review* (2001).

<sup>52</sup> Voir l'article de Keagy (2000) pour de plus amples détails. On observe toutefois des réalisations ingénieuses, qui s'appuient sur les caractéristiques de qualité de service actuelles offertes par l'internet. La société ITXC, par exemple, propose un service VoIP qui utilise un logiciel pour identifier le réseau ISP offrant la meilleure qualité de service possible à un instant donné. Quand aucun réseau n'est en mesure de fournir une qualité de service acceptable, les appels sont acheminés sur le RTPC (voir le site <http://www.itxc.com/>).

<sup>53</sup> Voir l'ouvrage de Ross (1995).

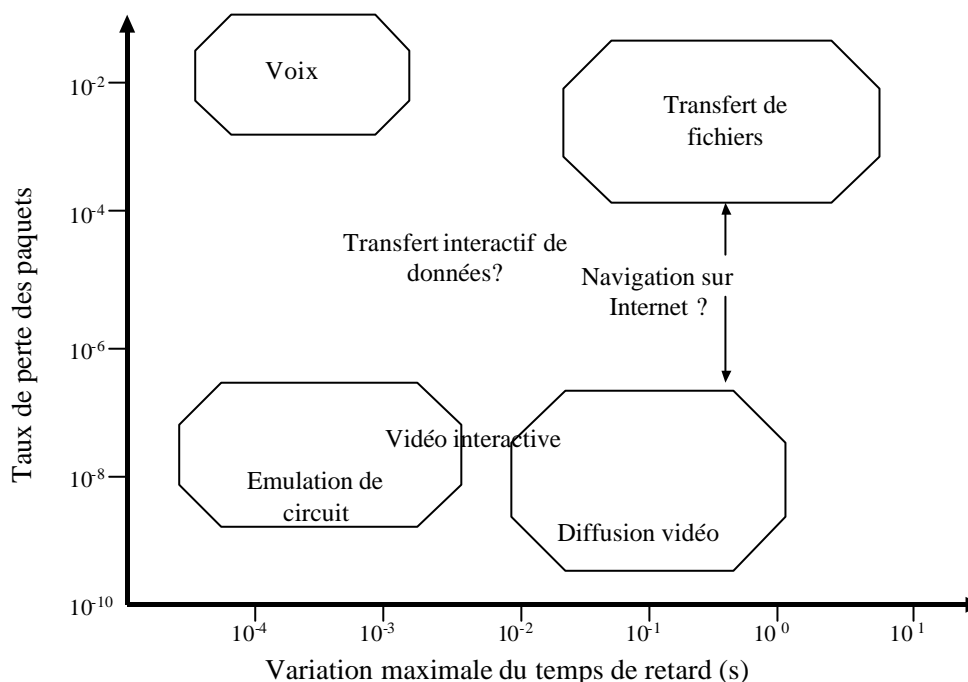
**Tableau 4-1 – Hiérarchies de trafic des réseaux de l'Internet nouvelle génération**

Niveau de trafic	Type de trafic	Exemple de service
NJ4	Trafic OAM et fonctions de signalisation	Surveillance de réseau ou de connexion
NJ3	Trafic bidirectionnel temps réel	Communication audio et vidéo
NJ2	Trafic unidirectionnel temps réel	Flux vidéo audio, distribution télévisuelle
NJ1	Trafic de données garanti	Services de consultation
NJ0	Trafic de données non garanti	Service de données assuré au mieux

Source: Melian et. al. (2002)

A chaque service identifié sur la Figure 3-1 devrait pouvoir être relativement facilement associé l'un au moins des niveaux de qualité de service du Tableau 4-1, à l'exception du niveau NJ4, réservé pour une utilisation interne au réseau. Cette mise en correspondance pourrait être celle de la Figure 4-2.

A l'initialisation d'une session, un utilisateur doit payer un tarif correspondant à la classe de service choisie, conformément aux options identifiées dans le Tableau 4-1. Le prix sera décroissant de NJ3 à NJ0. Si la capacité de réseau requise n'est pas suffisante, l'utilisateur peut choisir par défaut une classe de service inférieure.



**Figure 4-2 – Mise en correspondance des classes de service et des spécifications de qualité de service**

#### 4.6 Conclusions relatives à la qualité de service et aux classes de service

Plusieurs facteurs entravent la transformation de l'Internet en un réseau de services intégrés. On peut les regrouper en plusieurs catégories non disjointes<sup>54</sup>:

- la gestion des encombrements *sur* réseaux IP n'est pas encore vraiment au point et conduit souvent à des niveaux de qualité de service inappropriés pour certains types de service (voix sur IP par exemple)<sup>55</sup>;
- les attributs QoS ne sont souvent pas transmis *entre* fournisseurs ISP pour des raisons techniques, telles que des incompatibilités logicielles ou même matérielles (les caractéristiques QoS transmises par un fournisseur ISP peuvent ne pas être acceptées par les logiciels/équipements informatiques d'un autre fournisseur ISP);
- on ne dispose pas de systèmes informatiques de comptabilité à même de fournir les données de mesure de trafic et de facturation nécessaires entre réseaux;
- il n'existe pas d'interface au niveau de l'utilisateur final permettant à celui-ci de faire un choix pertinent entre les différentes classes de service proposées;
- dans de nombreux cas, la qualité des réseaux d'accès est insuffisante pour permettre la fourniture de services Internet nouvelle génération.

Pour l'essentiel, ces problèmes n'ont pas encore été résolus, en dépit des efforts considérables engagés<sup>56</sup>.

Même entre fournisseurs ISP, la tarification de l'interconnexion n'est pas conçue pour pouvoir servir d'instrument de gestion des encombrements. Les accords d'échanges de flux homologues ne font pas mention explicite d'une tarification et n'indiquent donc pas de niveaux de prix en cas d'encombrement ou de prix associé au coût marginal. La tarification de l'interconnexion de transit permet une meilleure gestion des encombrements car elle comprend généralement les trois volets suivants:

- un tarif fixe pour un certain nombre de bits par mois;
- un tarif variable pour les bits supplémentaires;
- un montant éventuel relatif au débit crête.

---

<sup>54</sup> La présente étude portant sur la dorsale Internet, nous n'étudions pas les questions intrinsèquement liées à l'accès client.

<sup>55</sup> Selon McDysan (2000), un réseau de communication risque d'être engorgé par certain nombre de types de ressources, dont les principales sont les suivantes: la capacité de liaison de transmission, le taux de réexpédition des paquets par un routeur, la disponibilité de ressources spécialisées (récepteur de tonalité par exemple), le taux de traitement d'appel et la capacité de mémoire tampon.

<sup>56</sup> Notons que la gigue est le principal obstacle à la transmission VoIP sur l'Internet. Un appel VoIP type sur l'Internet transite par de nombreux réseaux, dont les temps de latence et les caractéristiques de gestion QoS sont très différents. Le service VoIP sur l'Internet public est donc de qualité médiocre et ses fournisseurs en découragent généralement l'achat. Il existe néanmoins de nombreuses applications logicielles proposant des services téléphoniques gratuits sur l'Internet. Ces systèmes de téléphonie sur l'Internet se caractérisent généralement par des mémoires tampon de réception de très grande dimension, susceptibles de retarder de plus d'une seconde la transmission d'un appel téléphonique. La téléphonie gratuite semble être attractive, mais la qualité médiocre du service rendu rend ces systèmes inutiles aux yeux des utilisateurs professionnels. Certains utilisateurs résidentiels apprécient néanmoins ce type d'offre - surtout parce qu'elle leur permet de contourner les taxes internationales.

Un fournisseur ISP de transit s'appuiera sur cette structure de tarification pour décider du niveau d'investissement à effectuer en capacités réseau afin d'éviter une aggravation chronique des problèmes d'encombrement. Cette structure de prix ne peut pas toutefois devenir un moyen plus actif de gestion des encombrements, car tous les clients ont accès à l'Internet aux périodes d'encombrement maximal sans *tarification supplémentaire*.

## **5 Les services IP "temps réel", aujourd'hui et demain**

### **5.1 Service VoIP existant**

Des sociétés offrent aujourd'hui des services voix sur IP, généralement de médiocre qualité et peu fiables. Un niveau de qualité acceptable est cependant parfois obtenu, lorsque les VoIP associent vraisemblablement certains des éléments suivants:

- l'interopérabilité avec le RTPC grâce à l'utilisation du protocole SIP, de terminaux H.323, de groupes de protocoles et de techniques de compression<sup>57</sup>;
- des méthodes permettant de maintenir les datagrammes à l'intérieur du réseau;
- l'évaluation dynamique de la qualité de service en différentes parties d'un réseau de transit ISP, ou éventuellement l'évaluation de cette qualité sur plusieurs réseaux de transit avec lesquels le fournisseur de services VoIP a établi des liens contractuels, de telle sorte que les appels puissent être acheminés sur les trajets présentant la meilleure qualité de service à l'instant considéré;
- la connexion via le RTPC à des ports UDP d'ordinateurs offrant la téléphonie VoIP, ce qui implique des différences en termes de qualité de service par rapport au protocole TCP (perte de paquets plus importante mais temps de fourniture moyen réduit) favorables à l'acheminement de la voix sur IP.

Notre étude portera dans un premier temps sur les services IP temps réel actuels - et principalement le service VoIP<sup>58</sup>. D'une manière générale, trois catégories d'entreprise semblent adaptées au marché:

- 1) celles qui vendent des solutions IP intégrées répondant aux besoins de communication électronique interne des entreprises;
- 2) celles qui vendent au grand public des services VoIP poste téléphonique à poste téléphonique;
- 3) celles qui vendent au grand public des services VoIP ordinateur à poste téléphonique.

---

<sup>57</sup> Un terminal H.323 est un dispositif de communication de l'utilisateur final qui permet des communications temps réel avec d'autres points d'extrémité H.323. Une passerelle assure l'interconnexion entre un réseau H.323 et d'autres types de réseau tels que le RTPC. Le protocole SIP a été développé par l'IETF en 1999. Il s'agit d'un protocole destiné à l'établissement, à l'acheminement, à la modification et à la terminaison des sessions de communication sur réseaux IP.

<sup>58</sup> Il convient de noter que pour la vidéo en continu, les utilisateurs finals doivent disposer de largeurs de bande d'accès bien supérieures à celles qu'utilisent la majorité des abonnés. De plus, puisque les données vidéo peuvent être stockées en mémoire tampon sans dégradation significative de la qualité de service, les spécifications de QoS à respecter sont moins contraignantes que celles d'un service temps réel.

L'examen du premier point ne semble pas pertinent dans le cadre de notre étude, notamment parce que de tels services ne sont pas facturés à l'utilisateur final<sup>59</sup>. Nous nous consacrerons donc préférentiellement à l'étude des deux derniers points.

Nous étudierons d'abord les mécanismes de fonctionnement d'un service VoIP avant d'analyser les aspects commerciaux, qui portent essentiellement sur le service de contournement de la tarification internationale.

Il convient de noter que la plupart des études et des documents consacrés aux services IP temps réel concernent le service VoIP poste téléphonique à poste téléphonique et relativement peu le service VoIP ordinateur à poste téléphonique.

### 5.1.1 Téléphonie IP publique sur réseaux IP propriétaires

Les activités des fournisseurs ISP assurant des communications IP de transit tendent à s'étendre au-delà des frontières nationales; elles ne sont pas limitées aux frontières d'un pays donné comme c'est généralement le cas pour les opérateurs RTPC historiques. La configuration d'un réseau ISP n'est pas celle d'un réseau RTPC classique, aux termes de laquelle les opérateurs nationaux d'un pays donné sont connectés à un "monde extérieur" vu comme un "no man's land", c'est-à-dire en appliquant les concepts de demi-circuits. Un fournisseur ISP d'un pays A (Sprint par exemple) peut ainsi se connecter directement via une passerelle au réseau RTPC d'un pays B (quelque part en Afrique par exemple). Il peut donc exploiter un réseau étendu (WAN) déployé entre deux pays ou éventuellement un réseau Ethernet étendu si des questions de coûts et de rentabilité entrent en ligne de compte. Grâce à la mise en oeuvre dans les pays A et B d'interfaces et de logiciels<sup>60</sup> transformant les messages émis par le RTPC à destination du réseau IP ou convertissant les messages du réseau IP sous une forme gérable par le RTPC, un fournisseur ISP est théoriquement à même de fournir un service VoIP poste téléphonique à poste téléphonique. Cette situation est illustrée sur le diagramme de la Figure 5-1.

On pourrait avancer qu'il ne s'agit pas là tout à fait de ce qu'on pourrait appeler un service "voix sur l'Internet *public*" puisque très vraisemblablement la conversation entre les deux pays ne transite que sur un seul réseau IP. Certaines parties du réseau peuvent être louées par une société locatrice qui dispose ainsi de son propre réseau virtuel. Comme nous l'avons déjà vu, la qualité de service est généralement insuffisante (en termes de perte de paquets et de retard) pour permettre, lorsque des paquets IP transitent entre réseaux, l'exploitation d'un service VoIP, qui est par conséquent le plus souvent acheminé via un seul réseau ISP de transit.

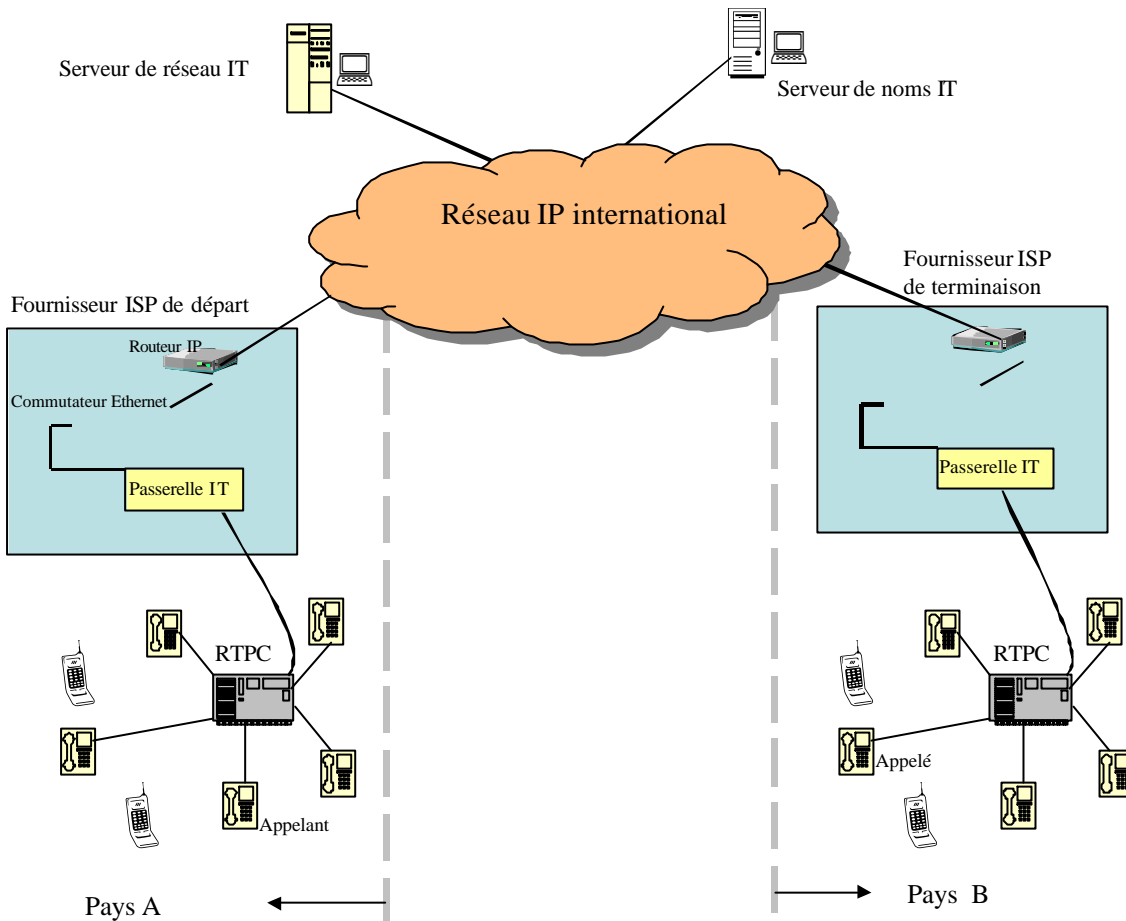
Le type de configuration illustrée sur la Figure 5-1 est connu sous le terme d'Ethernet étendu. Veuillez noter qu'il s'agit là d'une invention très récente. Nous pouvons supposer que lorsqu'il fonctionne, ce modèle IP intéresse un très grand nombre d'individus (en majorité des citoyens), puisque ceux-ci peuvent avoir accès à la passerelle ISP sans devoir effectuer des appels longue distance onéreux.

---

<sup>59</sup> Sur les réseaux Intranet à intégration de services, les équipements terminaux "intelligents" peuvent à tout moment de leur utilisation "réserver" des ressources réseau. Un téléphone IP pourra ainsi réserver des ressources temps réel sans que l'utilisateur final en soit informé.

<sup>60</sup> Une passerelle est un dispositif matériel et logiciel élaboré assurant la connexion bidirectionnelle entre des appels RTPC et le réseau IP. La partie logiciel réalise le codage et la compression des appels issus du RTPC, ce qui permet un transport de la voix plus efficace que sur le réseau RTPC.





**Figure 5-1 – Service VoIP international utilisant un réseau Ethernet étendu**

L'appel pourrait également émaner d'un ordinateur personnel et non d'un poste téléphonique, ce qui constituerait une variante au schéma ci-dessus. La passerelle IT indiquée au niveau du pays A serait alors inutile, bien que la connexion entre l'appelant et le fournisseur ISP se ferait encore vraisemblablement via le RTPC.

### 5.1.2 Contournement de la taxe de répartition internationale

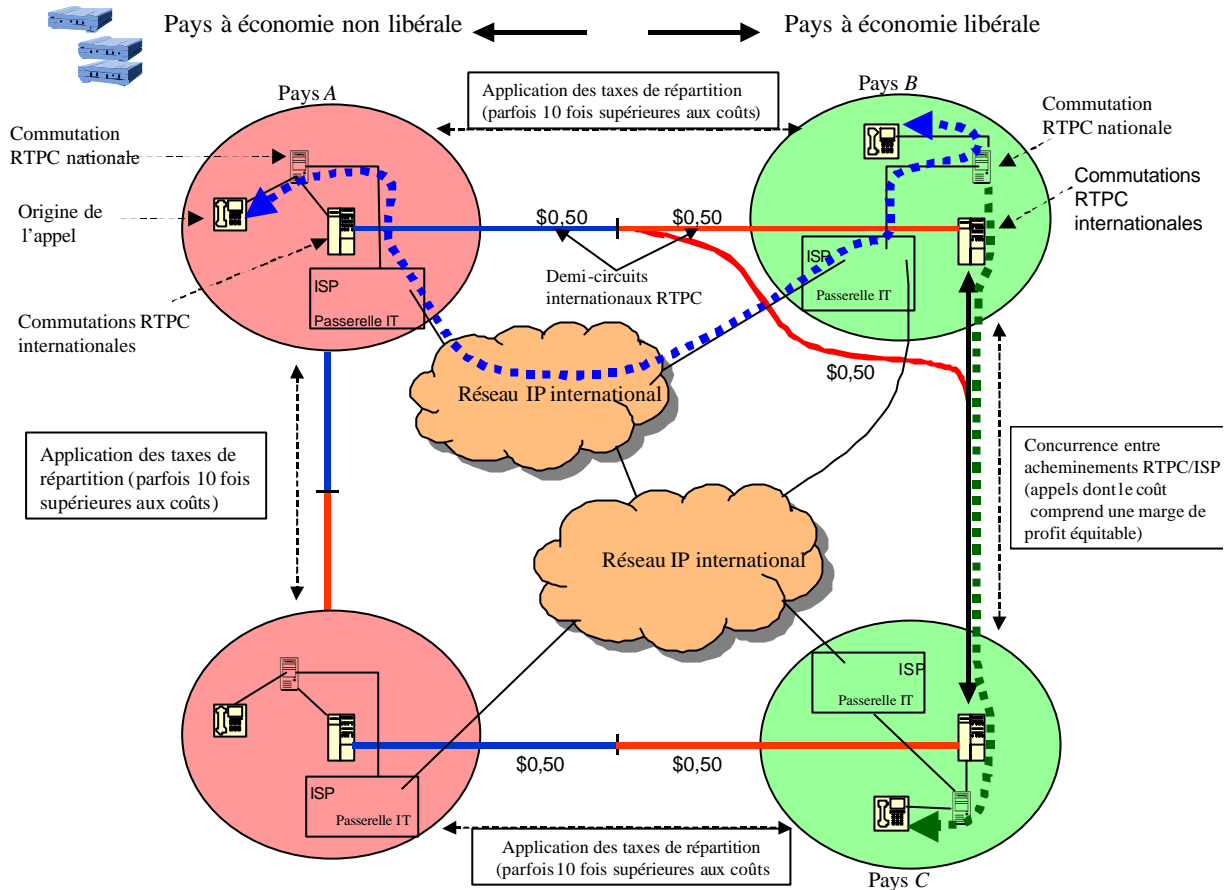
Le recours aux fournisseurs ISP de transit et aux fournisseurs de services mentionnés plus haut permet aux appelants de contourner l'opérateur historique et donc le système de taxe de répartition.<sup>61</sup> Compte tenu de sa médiocre qualité, le service VoIP international est essentiellement un service de contournement de la taxe de répartition, dont l'intérêt est maximal dans les pays qui maintiennent des taxes de répartition élevée (c'est-à-dire, pour l'essentiel, dans les pays à économie non libérale). Après avoir atteint le pays B (les Etats-Unis d'Amérique par exemple), l'appel représenté sur la Figure 5-2 transitera par une passerelle ISP puis par le RTPC. L'appel aboutira alors à son point de terminaison, aux Etats-Unis ou dans un autre pays. Ainsi, des distances relativement grandes peuvent être couvertes sur le RTPC à chaque extrémité de transit d'un appel VoIP, entre serveurs passerelle et postes téléphoniques.

Cette configuration est illustrée sur le diagramme de la Figure 5-2. Un appelant du pays A peut appeler, via le réseau RTPC international, la personne qu'il cherche à joindre dans le pays B, mais le tarif à la minute de cet appel comprendra une taxe de règlement de 0,5 USD par minute (c'est-à-dire la moitié de la taxe de répartition supposée) ainsi qu'un montant supplémentaire facturé par l'opérateur historique du pays A d'où émane l'appel. Ce dernier montant lié au départ d'appel comprendra en principe l'autre moitié de la taxe de règlement ainsi qu'une marge de détail, d'où une tarification totale à la minute bien supérieure à 1 USD.

---

<sup>61</sup> *Le système de taxe de répartition* a été développé il y a de nombreuses années lorsque la plupart des opérateurs de télécommunication étaient en situation de monopole étatique autorégulé. Cette configuration était adaptée à un monde dans lequel les appels internationaux d'origine ou de terminaison n'étaient pas soumis à la concurrence. Au départ, la taxe de répartition était supposée compenser l'intégralité du coût d'un appel international entre son point d'origine et son point de terminaison. La *taxe de règlement* représente presque toujours la moitié de la taxe de répartition et suppose une distribution des "coûts" d'appel entre les deux pays concernés.

L'opérateur du pays dont émane l'appel (pays A par exemple) perçoit une *taxe de recouvrement* (prix annoncé d'un appel vers un pays donné) et paie à l'opérateur du pays recevant et terminant l'appel (pays B par exemple) une somme appelée *taxe de règlement* exprimée par un montant par minute de trafic. Les opérateurs des pays A et B solderont leur compte périodiquement, l'opérateur dont le nombre de minutes d'appels sortant est supérieur au nombre de minutes d'appels entrant devant alors s'acquitter d'une somme proportionnelle à cette différence.



**Figure 5-2 – Contournement international VoIP**

Le trajet suivi par un appel VoIP émanant d'un appelant situé dans le pays A et destiné à un individu se trouvant dans le pays B est indiqué par une épaisse ligne bleue pointillée.

Voyons le cas d'un appel vers un pays C. Puisque celui-ci n'est pas desservi par une connexion du réseau IP international considéré, l'acheminement d'un appel VoIP risque d'être interrompu au niveau du RTPC d'un pays B et d'être redirigé vers l'entité appelée du pays C via le RTPC. Les réglementations des pays B et C étant de type libéral (pas d'application des taxes de répartition, d'où un meilleur alignement des prix et des coûts de service), le surplus tarifaire pour acheminer un appel de B vers C n'est que de quelques cents. Cette méthode permet donc, comparativement à un acheminement RTPC entre A et C, aux appelants du pays A de faire des économies considérables. L'épaisse ligne verte pointillée indique le trajet emprunté pour un appel de ce type.

**Encart 1: Contournement de la taxe de répartition fondé sur l'utilisation de services classiques**

Les entreprises disposant de réseaux privés internationaux classiques peuvent accéder à un certain niveau de contournement. Une dérivation d'appel à une extrémité se produit lorsque le récepteur ou l'émetteur de l'appel se connecte au réseau privé via le RTPC. En pratique, le niveau de contournement résultant de ce type d'appel sera relativement fiable.

On observe des dérivations aux deux extrémités lorsque l'appelé et l'appelant se connectent tous deux au réseau international privé via le RTPC. Ce procédé est généralement connu sous le terme de revente simple internationale (ISR, *international simple resale*); il est généralement illégal sauf dans les pays dont l'économie est totalement libéralisée, et même dans ces derniers son application à certains trajets est parfois illégale<sup>62</sup>.

Le service VoIP international est également un service international de contournement de la taxe de répartition. Comme l'ISR, il permet de contourner les commutations internationales RTPC, ce qui évite le paiement d'une quelconque taxe de répartition. Etant donné que la somme du coût et de la marge concurrentielle associée à ce service ne représente généralement qu'une fraction des montants facturés par les pays à économie non libérale pour des appels RTPC vers des destinations similaires après prise en compte de la taxe de répartition, les fournisseurs de services de contournement peuvent proposer des prix très inférieurs à ceux des opérateurs historiques et continuer à dégager des marges bénéficiaires très importantes.

Il convient de noter que si un opérateur RTPC avisé du pays *A* pouvait acheter une terminaison d'appel dans le pays *B* à un prix compétitif et ne pas être tenu de payer 0,50 USD par minute - mais peut-être 0,1 USD ou moins - il serait en mesure de dégager un bénéfice appréciable en ne facturant qu'une fraction du prix de détail (également désigné sous le terme de taux de recouvrement)<sup>63</sup>. Le pays *B* n'offre cependant pas à l'opérateur RTPC du pays *A* la possibilité d'acheter une terminaison d'appel à un prix compétitif, et ce parce que les opérateurs du pays *B* ne peuvent pas obtenir des tarifs compétitifs pour terminer leurs appels dans le pays *A*. Ce dernier entend en effet que la terminaison des appels en provenance du pays *B* soit facturée 0,5 USD la minute (ce qui correspond à la taxe de règlement). Même si le pays *B* est en général à économie libérale, ses opérateurs internationaux sont soumis à une réglementation leur imposant de facturer à un opérateur d'un pays *A* un prix de terminaison égal à celui dont ils devraient s'acquitter auprès dudit opérateur pour terminer un appel dans le pays *A*.

Bien que les chiffres en dollars susmentionnés ne correspondent pas à la moyenne de coûts ou de prix réels, les ordres de grandeur des différences indiquées sont souvent observés dans la pratique. Ces variations inciteront fortement les appelants à chercher à contourner les taxes de répartition, d'où la motivation commerciale actuelle à fournir des services VoIP internationaux.

---

<sup>62</sup> Le service d'appel en retour n'est pas un service de contournement de la taxe de répartition mais permet simplement d'inverser le sens de l'appel. Voir à cet effet la contribution de M. Scalan (1998): "Using call-back to demonstrate the discriminatory nature of the proportionate return rule", *Telecommunications Policy*, Vol. 22, 11 décembre {réimprimé avec ses corrections dans sa version ultérieure}.

<sup>63</sup> Un opérateur en Europe facture les appels à destination de la Nouvelle-Zélande, distante de 20 000 km, entre 0,05 USD (en période normale) et 0,06 USD (en période de trafic crête) par minute. Il prévoit évidemment que son service dégagera des bénéfices.

### **5.1.3 Téléphonie IP privée sur réseaux IP d'entreprise**

L'une des principales sources de croissance de la téléphonie IP ces prochaines années devrait concerner l'Intranet d'entreprise. Le fonctionnement des réseaux IP d'entreprise n'est pas perturbé par les problèmes de qualité de service réseau à réseau exposés dans le Chapitre 3. En outre, les problèmes d'encombrement qui tendent à entraver le fonctionnement du service VoIP sur les réseaux IP utilisés par le grand public<sup>64</sup> sont plus faciles à gérer sur les réseaux Intranet privés. En effet, dans le cas de réseaux Intranet à services intégrés, il est essentiel que les encombrements soient réduits au maximum puisque les entreprises sont en général bien moins sensibles au niveau de prix qu'au rapport qualité de service/prix.

La plupart des solutions VoIP actuellement étudiées d'un point de vue commercial semblent porter sur l'intégration de la téléphonie IP aux réseaux IP d'entreprise, la fourniture d'un service VoIP au grand public n'étant pour l'heure pas envisagée.

### **5.1.4 Technique d'acheminement IP propriétaire**

Selon un autre modèle d'acheminement de la voix sur Internet, un fournisseur de services peut utiliser un logiciel spécialisé qui achemine les paquets de la session sur les portions de l'Internet qui assurent le meilleur fonctionnement possible à un instant donné. Lorsqu'il n'existe à l'instant considéré aucun trajet satisfaisant aux normes requises de qualité de service, les appels transitent apparemment sur le RTPC. Ce modèle a donc été décrit sous le terme de "solution hybride". L'appelant n'exerce aucun contrôle sur le choix du trajet. Le recours optionnel au RTPC semble nécessaire puisque les clients exigent que le service soit disponible quand ils le demandent. L'acheminement de la voix sur IP étant parfois impossible, même lorsqu'on utilise un logiciel spécialisé destiné à éviter les encombrements, la commutation vers le RTPC peut être nécessaire pour assurer au service sa viabilité commerciale.

Il semble que le fonctionnement d'un service VoIP requiert un environnement réglementaire assez libéral aux deux extrémités d'acheminement d'un appel international, puisqu'un fournisseur de services doit pouvoir assurer l'émission et l'acheminement des appels via le RTPC lorsque aucun réseau IP ne peut le faire à l'instant considéré. Ce modèle VoIP risque de ne pas être applicable dans de nombreux pays en développement car il est fréquent que ces derniers ne satisfassent pas aux critères économiques susmentionnés. Le modèle est très vraisemblablement applicable à un réseau Ethernet étendu, comme on l'a vu au paragraphe 5.1.1.

## **5.2 Futurs réseaux IP "temps réel"**

### **5.2.1 Considérations techniques**

La commutation MPLS semble être un point de départ à l'élaboration de futures solutions aux problèmes de qualité de service hors réseau et de fourniture de plusieurs classes de service sur l'Internet. L'Internet utilise actuellement essentiellement le mode ATM de couche 2 pour le transport de données IP de niveau 3. Ces deux couches fonctionnent indépendamment l'une de

---

<sup>64</sup> Comme nous l'avons déjà noté, la raison de cet encombrement résulte pour une large part de l'absence d'un mécanisme de tarification susceptible d'adapter les demandes individuelles aux différents niveaux de qualité de service.

l'autre. Pour fournir des options de classe de service via IP en mode ATM, des circuits, voies ou connexions virtuels de bout en bout doivent être configurés pour chaque classe de service et chaque réseau privé virtuel (VPN, *virtual private network*). Une telle approche pose des problèmes en termes d'échelle et conduit à une utilisation peu efficace des ressources réseau<sup>65</sup>.

La commutation MPLS permet au contraire une intégration partielle des deux couches, la couche 2 "reconnaissant" la couche 3. A cet égard, la commutation MPLS présente par rapport au mode ATM des avantages tant du point de l'extensibilité que de l'efficacité d'utilisation des ressources réseau; sa mise en oeuvre ne nécessite pas la configuration de circuits, voies ou connexions virtuels de bout en bout pour chaque classe de service. Cet avantage se révèle particulièrement appréciable dans le cas de l'intégration d'une classe de service MPLS et d'un service MPLS VPN, qui se fait par l'utilisation d'un routeur à commutation par étiquettes.

La commutation MPLS fournit deux mécanismes qui se déclenchent lorsque des paquets passent par un routeur ou un commutateur et qui permettent la mise en oeuvre d'attributs QoS. Il s'agit:

- de la classification des paquets en différentes classes de service; et
- du contrôle des caractéristiques QoS (gigue, perte de paquets et largeur de bande) à appliquer aux différents paquets.

Il est donc facile d'identifier les paquets selon leur classe d'appartenance à l'issue de leur classification initiale. Cette dernière fait intervenir des données acheminées dans la couche réseau ou dans les en-têtes de couches supérieures (par exemple dans le champ ToS), ce qui permet d'attribuer au paquet considéré une étiquette correspondant à sa classe d'appartenance. Les routeurs à commutation par étiquettes peuvent assurer le traitement de paquets étiquetés devant être reclassifiés.

La commutation MPLS n'est pas la solution miracle à tous les problèmes de qualité de service, mais elle permet de mieux en gérer un certain nombre, dont les problèmes QoS hors réseau.

Si on élargit la définition de l'étiquetage, elle peut être appliquée au domaine des longueurs d'onde, qui font alors office d'étiquette. On parle alors, pour ces protocoles MPLS à définition élargie, de commutation MPLS généralisée ou de GMPLS<sup>66</sup>.

D'autres progrès devront également être réalisés, pour appliquer par exemple un système de comptabilité et de facturation fondé sur des éléments tels que les prix d'encombrement. Il faudra également disposer d'interfaces d'utilisateur final permettant à ces derniers de choisir la classe de service attribuée aux paquets d'une session donnée. Aucun de ces systèmes n'a encore été développé. Il semble vraisemblable que les évolutions apportées à ces différents domaines devront faire l'objet d'un certain niveau de coordination, sachant que quelques années seront nécessaires à la mise en place de l'Internet nouvelle génération - qui doit permettre la convergence avec d'autres réseaux de communication. Il n'est pas garanti en effet que l'Internet évoluera dans les 10 prochaines années, bien que de nombreux progrès aient été enregistrés ces dernières années.

---

<sup>65</sup> Comme on l'a noté précédemment, le fonctionnement actuel de l'Internet ne met en oeuvre qu'un seul type de voie lorsque le mode ATM est utilisé.

<sup>66</sup> L' Optical Internetworking Forum a élargi le champ d'utilisation de plusieurs composantes GMPLS et a défini explicitement un ensemble de protocoles UNI. Ces protocoles sont connus sous le terme d'interface usager-réseau (O-UNI, *optical user-network interface*).

### 5.2.2 Tarification et règlements

Comme nous l'avons déjà vu, les services réseau induisent trois principaux types de coût, que devrait idéalement refléter la structure des prix de détail et des prix de gros.

Cette structure de prix comprend:

- une taxe unique de connexion à l'Internet;
- un abonnement périodique (mensuel);
- des coûts d'utilisation dont le montant est maximal lorsque la demande de trafic est la plus forte.

Si certains fournisseurs peuvent très bien dans l'avenir proposer une structure de prix différente de celle-ci, leurs clients devront s'attendre à devoir prendre à leur compte les risques et les pénalités de performance induits par une structure de prix qui ne reflète pas la structure des coûts. Les fournisseurs ISP d'utilisateurs finals proposant des structures de prix qui diffèrent fondamentalement des prix de gros dont ils doivent s'acquitter auprès de leur fournisseur de transit prennent un risque supplémentaire qu'ils ne peuvent généralement accepter que pour une part "raisonnable" de leurs coûts globaux de trafic et sous réserve bien sûr d'un accroissement des profits.

Le problème peut devenir beaucoup plus complexe lorsque plusieurs classes de service entrent en jeu, en particulier lorsqu'on cherche à déterminer une tarification réellement *optimale*<sup>67</sup>. Il est vraisemblable cependant qu'une structure de tarification relativement simple et stable sera appliquée et qu'elle sera identique pour toutes les classes de service, bien que les niveaux des prix varieront en fonction des attributs des classes.

De tels changements s'appliqueront vraisemblablement tant aux services de détail qu'aux services de gros, les accords d'échange de flux homologues au bénéfice entier de l'émetteur risquant de ne plus avoir cours à long terme.

Même si l'on ne parviendra jamais à élaborer une tarification réellement optimale pour la gestion des réseaux, des solutions de deuxième choix peuvent s'avérer plutôt efficaces, comme on l'a déjà constaté pour les réseaux de télécommunication RTPC classiques.

## 6 Analyse des travaux de recherche sur la tarification des services Internet

Les travaux de recherche examinés dans le présent paragraphe (et analysés plus en détail dans l'Annexe II) ont pour caractéristique essentielle d'aborder les questions de tarification sous l'angle de la gestion de réseau. Ce type de système de tarification n'existe pas à l'heure actuelle pour les réseaux IP et n'apparaîtra vraisemblablement pas sous une forme opérationnelle avant un certain temps. Les travaux de recherche sont donc essentiellement de nature théorique. Ils s'appuient sur une modélisation mathématique des réseaux faisant intervenir des modules de tarification et de demandes de trafic. Ces modèles sont établis sur la base des points suivants:

- les relations liant les variables, qui, aux yeux des auteurs, sont les plus importantes au vu des questions abordées;
- les hypothèses retenues pour que le modèle soit adapté à l'étude des problèmes à résoudre.

---

<sup>67</sup> L'optimisation de la tarification des services sur un réseau d'ordinateurs fait l'objet des études théoriques examinées dans l'Annexe II.

La démarche suggérée par ces deux points est celle couramment adoptée dans tous les domaines de la recherche scientifique. Les lecteurs chargés de l'examen des articles soumis à un journal scientifique en vue de leur publication doivent vérifier si la logique mathématique sous-jacente est correcte, évaluer si la conception du modèle retenu et le choix des hypothèses sont de nature à éclairer "notre" compréhension du domaine de recherche, si les techniques empiriques éventuellement utilisées (et non évaluées dans l'article considéré) sont appropriées et si les conclusions présentées sont confirmées par les chiffres<sup>68</sup>.

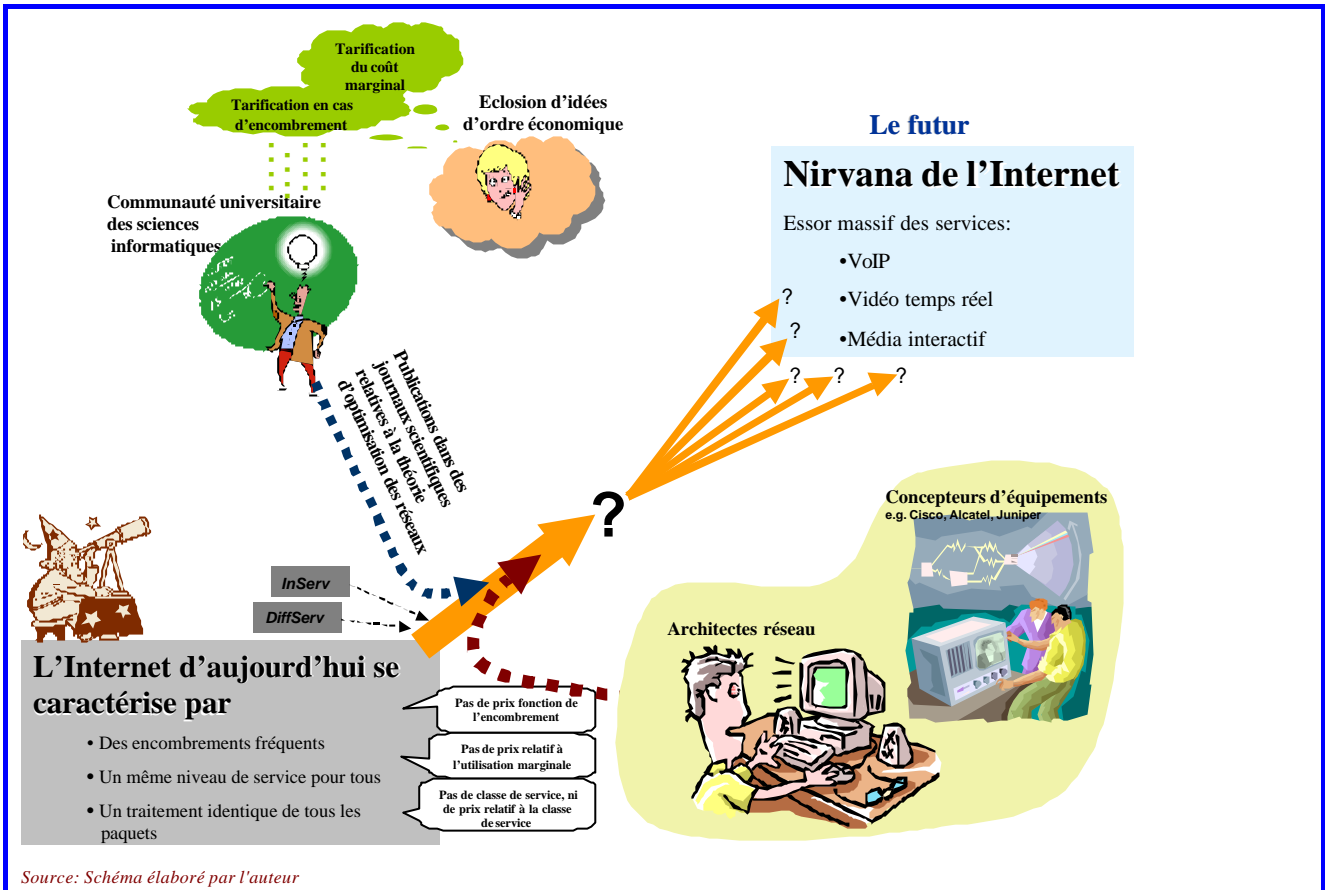
Les problèmes à résoudre grâce à ces modèles sont complexes. Ils sont liés à des questions de conception et d'ingénierie (dont celles qui entraînent une augmentation des coûts), font généralement intervenir plusieurs classes de service et concernent les relations entre prix et demandes de trafic. Certains types de problèmes sont insolubles d'un point de vue informatique (notamment si on se place du point de vue d'une dynamique d'optimisation) et doivent faire l'objet d'hypothèses simplificatrices. Les travaux de recherche examinés dans l'Annexe II portent directement ou indirectement sur ces questions.

En ce qui concerne la question des classes de service multiples, la tarification est considérée dans tous les articles comme un élément de gestion active des réseaux. Il s'agit en particulier d'étudier le lien entre l'établissement d'une tarification optimale et la mise à disposition de plusieurs classes de service. Il n'est pas certain que les articles mentionnés dans le présent rapport aient une incidence pratique directe sur la mise en oeuvre et la conception futures des architectures de classes de service - qui seront peut-être des caractéristiques de l'Internet du futur. Ces travaux seront cependant vraisemblablement utiles à la formation des architectes de réseaux d'ordinateurs soucieux de trouver des solutions pratiques à l'absence d'options de classe de service et de tarification de ces classes sur l'Internet. La Figure 6-1 illustre la façon dont se diffusent les idées d'ordre économique entre ingénieurs Internet qui cherchent à élaborer des solutions permettant de façonner le réseau Internet nouvelle génération.

---

<sup>68</sup> Ces examinateurs ont des qualifications identiques aux auteurs des articles qu'ils relisent (il s'agit également d'experts dans le domaine de recherche considéré). Ils décident si les travaux de recherche doivent être publiés sous la forme proposée, s'ils doivent être modifiés avant publication ou le cas échéant si leur publication doit être refusée.





**Figure 6-1 – Illustration d'un échange fructueux d'idées économiques relatives à la conception de réseaux informatiques**

Il ressort de tous les travaux de recherche que les niveaux de prix peuvent et devraient être utilisés pour aider à gérer les encombrements et améliorer la qualité de service sur l'Internet. Lorsque le modèle prévoit que le bouquet de services disponibles puisse être composé de services temps réel, les problèmes d'optimisation deviennent très complexes et conduisent à établir une structure de tarification dynamique qui reflète en quelque sorte l'état du système, c'est-à-dire une structure dont les prix évoluent continûment pour gérer (optimiser) les demandes de services réseau (par exemple les flux de datagrammes entrant). Pour parvenir à une telle optimisation des ressources réseau, il faudrait que les prix varient à chaque point d'entrée et varient de manière continue au cours de chaque session d'utilisation. Sauf s'ils sont très simples, les modèles qui s'attachent à une optimisation complète du réseau conduisent à des difficultés informatiques insolubles. Les travaux de recherche engagés vont donc dans le sens d'une simplification des solutions proposées, qui permettent une quasi-optimisation du réseau tout en restant gérable d'un point de vue informatique.

D'un point de vue économique, il est encourageant de constater que tous ces travaux indiquent que la gestion de la demande devrait faire partie intégrante de la planification des investissements réseau et de l'optimisation du trafic, approche qui n'a pas toujours été partagée par tous les concepteurs de réseaux informatiques. Certains observateurs du monde de l'Internet continuent en effet de combattre ce point de vue au travers d'articles et de conférences<sup>69</sup>. (Ces questions sont traitées au Chapitre 4 et dans l'Annexe I.)

Au fil du temps, les organismes qui ne sont pas spécialisés en économie sont de plus en plus informés en la matière, les idées économiques se diffusant au plus grand nombre. Il s'agit là d'un processus d'élaboration des connaissances, que connaissent les administrations gouvernementales, d'autres milieux tels que les professions juridiques ou de comptabilité ainsi que diverses disciplines universitaires. Le monde universitaire est d'ailleurs le premier lieu dans lequel se produisent les échanges fructueux d'idées<sup>70</sup>.

Les études théoriques sur ce thème sont examinées en détail dans l'Annexe II.

## **7 Questions réglementaires relatives au protocole IP**

Les futures questions réglementaires relatives aux réseaux IP semblent surtout concerner trois types d'acteurs: les fournisseurs ISP, les entités que nous qualifions aujourd'hui d'opérateurs de télécommunication historiques et les opérateurs de communications mobiles de la nouvelle génération<sup>71</sup>.

Les dispositions réglementaires relatives au contenu (conformité aux bonnes moeurs, sécurité et propriété industrielle par exemple) ne sont pas examinées dans le présent rapport.

### **7.1 Réglementation et fournisseurs ISP**

L'application éventuelle d'une réglementation aux réseaux IP peut se heurter à certaines déficiences du marché, dont les potentialités de ce marché et les coûts externes induits. Même si le modèle ISP tend à être compétitif, deux principaux types de problèmes risquent cependant de se poser:

- 1) Dans certaines régions, il peut y avoir trop peu de concurrence entre fournisseurs ISP de transit, de telle sorte que les fournisseurs ISP d'utilisateurs finals doivent s'acquitter de prix de transit excessifs ou qu'ils bénéficient d'un niveau de qualité de service inférieur à ce qu'il serait dans un environnement plus concurrentiel. Ce manque de concurrence est lié à une ou plusieurs des raisons majeures suivantes:
  - i) faibles niveaux de la demande (capacité à payer), comme cela peut être le cas dans les pays en développement, d'où le risque d'avoir un très petit nombre de fournisseurs ISP de transit proposant des services dans une région donnée;

---

<sup>69</sup> Comme nous l'avons noté précédemment, les architectes de l'*IntServ* n'étaient apparemment pas conscients des problèmes liés aux incitations économiques si cette architecture devenait largement accessible au plus grand nombre.

<sup>70</sup> Les différences de niveau de richesse entre pays peuvent même s'expliquer par la manière dont leurs universités parviennent ou non à avoir connaissance et à comprendre de nouvelles idées.

<sup>71</sup> Les dispositions réglementaires relatives au contenu ou à la confidentialité des données ne sont pas examinées dans le présent rapport.

- ii) régime onéreux d'octroi de licences qui:
  - limite indûment le nombre de concurrents; ou
  - induit des taxes trop élevées ou d'autres obligations coûteuses qui découragent l'entrée de nouveaux acteurs sur le marché;
- iii) d'autres problèmes réglementaires qui rendent les investissements hasardeux, dont le principal est celui posé par l'existence d'organismes réglementaires peu développés, ce qui a des conséquences identiques à celles mentionnées au point i);
- iv) taxes excessives imposées par l'opérateur historique pour garantir aux fournisseurs ISP l'accès à son réseau et/ou interdiction d'accès au réseau de l'opérateur historique.

Il s'agit de problèmes réglementaires propres aux pays concernés. Dans les cas i) et ii), il n'existe pas de solution a priori à ces difficultés. Et de fait, la réglementation, lorsqu'elle existe, peut être davantage la cause que la solution au problème posé. Il est recommandé de mettre en oeuvre un régime économique plus libéral, même si la mise en place d'organismes réglementaires adaptés peut prendre de nombreuses années.

Le cas iv) porte sur la réglementation applicable à l'opérateur historique, thème développé ci-après.

- 2) Les fournisseurs ISP principaux constituent un autre problème potentiel. On en compte peut-être cinq ou six et plusieurs d'entre eux connaissent actuellement des difficultés financières. Les fournisseurs ISP principaux (également appelés fournisseurs ISP de niveau 1) sont les seuls dont les tables d'acheminement sont pratiquement remplies. Ils "trônent" au sommet de la hiérarchie souple qu'est l'Internet. Ils échangent des flux de trafic homologues entre eux et pratiquement entre eux seuls<sup>72</sup>. Les fournisseurs ISP principaux doivent toutefois affronter la concurrence des fournisseurs ISP de niveau 2 ou 3, ainsi que celle des entreprises offrant des alternatives de transit, en particulier celles qui proposent le stockage de contenu aux extrémités de l'Internet (les entreprises les plus connues étant peut-être celles qui proposent des services de fourniture de données *cache*). L'inquiétude quant au respect des règles de concurrence par les fournisseurs ISP principaux est une question de nature internationale qui semble à présent être traitée de manière appropriée par les autorités de réglementation compétentes aux Etats-Unis et en Europe, autorités qui s'attachent plus particulièrement à établir des règles empêchant la domination du marché par certaines entreprises via des fusions ou des acquisitions.
- 3) Le nommage, le numérotage et l'adressage forment un autre pôle d'intérêt potentiel en matière réglementaire. Les numéros peuvent être une ressource rare surtout en raison des coûts consécutifs aux modifications à apporter à un plan de numérotage dont les numéros disponibles se raréfient. C'est ce qui explique le passage du protocole IPv4 au protocole IPv6, qui sera certainement nécessaire dans les 4 à 7 prochaines années. Dans certains pays, les fournisseurs ISP sont apparemment tenus de passer au protocole IPv6 à une certaine date dans l'avenir. D'autres, à l'instar des pays européens par exemple, incitent fortement à un passage rapide à ce protocole en versant beaucoup de fonds publics. La communauté des acteurs et utilisateurs de l'Internet gardent en tout état de cause un oeil très attentif sur ces sujets, la question de savoir si une administration donnée doit sortir à ce stade d'un rôle exclusif d'observateur restant matière à débat. Toutefois, puisqu'elle ne concerne pas spécifiquement un pays donné, la gestion du numérotage IP n'est pas étudiée plus avant dans le présent document.

---

<sup>72</sup> Voir le paragraphe 2.2 (et la Figure 2-2) pour de plus amples détails concernant l'échange de flux homologues.

L'accès aux noms, numéros et adresses constitue un sujet connexe que l'on a souhaité examiner d'un point de vue réglementaire en raison du besoin de coopération entre réseaux fournissant un même service et utilisant des plans d'adressage différents (numéros de téléphone, numéros IP et noms). Citons à titre d'exemple principal celui faisant intervenir des fournisseurs VoIP et des réseaux RTPC, un appel initié sur un type de réseau devant pouvoir être terminé sur un autre type de réseau. Les questions d'ordre politique portent essentiellement sur le protocole **ENUM**<sup>73</sup>, qui fait l'objet d'un débat opposant deux groupes bien distincts: ceux qui souhaitent que l'UIT joue un rôle pour établir certaines règles et ceux qui soutiennent qu'aucune administration centralisée ou régulatrice n'est nécessaire. Ce point n'est pas examiné plus avant dans le présent rapport, puisqu'il ne s'agit pas là d'une question réglementaire propre à un pays donné.

Il est essentiel que les données de numérotage et d'adressage soient disponibles pour tous ceux qui en ont besoin, afin que la concurrence puisse se développer entre plates-formes concurrentes. Les pays concernés devront donc se tenir au courant des derniers développements en la matière et s'assurer que des entreprises souhaitant offrir des services sur l'Internet ne sont pas exclues de ce marché en raison de leur incapacité à avoir accès aux bases de données requises.

- 4) La **normalisation** ou l'absence de normalisation sur l'Internet est un autre champ d'intérêt des autorités réglementaires, étant donné notamment les problèmes QoS hors réseau soulignés dans le présent rapport. Il s'agit là d'une question effroyablement complexe, puisqu'elle est liée à des évolutions techniques et qu'elle induit des coûts et des bénéfices impossibles à chiffrer. Cette question de normalisation n'étant également pas propre à un pays donné, son examen n'est pas poursuivi plus avant dans le présent rapport<sup>74</sup>.

L'Internet n'est pas, à proprement parler, réglementé, son caractère international ainsi que sa structure transfrontalière rendant très difficiles la mise en oeuvre et le respect d'une éventuelle réglementation. En règle générale, lorsque des exploitants de réseaux Internet et d'autres entreprises entrent en concurrence et ne font pas l'objet d'un même traitement réglementaire, il est préconisé que les autorités réglementaires traitent ce problème en cherchant d'abord à supprimer des dispositions réglementaires régissant le RTPC afin d'instaurer une "neutralité concurrentielle", plutôt que de vouloir imposer des nouvelles règles à l'Internet ou aux fournisseurs ISP dans le but de maintenir ou de rétablir cette "neutralité concurrentielle".

## 7.2 Réglementation et opérateurs RTPC historiques

La plupart des questions réglementaires relatives à l'Internet auxquelles ont à faire face les organismes nationaux de réglementation concernent les opérateurs historiques de télécommunication. La réglementation doit être révisée à mesure que s'accroît la concurrence entre RTPC, réseaux CATV et IP - filaires ou hertziens - afin de s'assurer que les entreprises en concurrence bénéficient toutes d'un même traitement au regard de la législation, c'est-à-dire que celle-ci ne favorise pas une technologie ou un type de plate-forme au dépend d'une autre. Le principe essentiel est que tous les acteurs doivent être placés sur un pied d'égalité. Il semble que

---

<sup>73</sup> Le protocole ENUM est un plan d'adressage mondial établissant un lien entre le RTPC et les réseaux IP. Il a été normalisé par l'IETF en septembre 2000.

<sup>74</sup> Pour un examen général des questions d'ordre économique, voir David et Greenstein (1990).

plusieurs domaines d'activités dans lesquels les opérateurs RTPC sont soumis à une certaine réglementation doivent être réformés au cours de ces prochaines années si l'on veut maintenir une "**neutralité concurrentielle**". Les principales victimes d'une absence de solutions à ces problèmes seraient peut-être les opérateurs historiques. Nous allons tenter à présent de traiter brièvement ces thèmes.

- *Plafonnement des prix RPI-X ou CPI-X*

Le mécanisme de plafonnement des prix est déterminé pour une part importante par la prévision de l'évolution du niveau de concurrence au cours de la période de plafonnement pour les services considérés. La **prévision** du taux de convergence entre l'Internet et le RTPC sur la base du rythme actuel risquerait vraisemblablement de conduire à des erreurs très importantes.

- *Structure et unités applicables aux prix de détail*

Les services d'appel RTPC sont facturés au détail à la seconde ou à la minute suivant l'heure de la journée. Le service VoIP peut ne pas être facturé en fonction de la durée de la session, bien que si c'était le cas le paramètre qui interviendrait pour la facturation serait alors certainement le produit durée par largeur de bande. Dans tous les cas, les tarifs appliqués seront certainement différents selon qu'il s'agisse ou non d'heures de trafic crête.

- *Le niveau de prix - le contournement international*

De nombreux opérateurs, en particulier dans les pays dont l'économie n'est pas totalement libéralisée, continuent d'engranger des profits importants grâce aux appels internationaux. Le service VoIP génère déjà pour nombre de ces pays un phénomène de contournement significatif. Une réforme tarifaire est nécessaire, bien que celle-ci puisse s'avérer difficile à mettre en oeuvre du fait de résistances politiques.

- *Prix d'interconnexion et structures des prix*

Les coûts d'interconnexion sont liés à la capacité. L'utilisation de la minute comme unité de tarification des coûts de capacité pour le trafic interconnecté a été importante pour favoriser la concurrence entre prestataires de services du RTPC puisqu'elle a permis d'abaisser les coûts d'entrée à payer par les nouveaux entrants. Ces derniers ont donc pu louer des circuits à la minute plutôt que de devoir acheter la capacité nécessaire à la terminaison de leurs appels sur le réseau de l'opérateur historique. Le prélèvement d'un tarif d'interconnexion à la minute s'explique en partie par le fait que les circuits sont utilisés exclusivement pour l'acheminement d'un seul appel téléphonique pendant toute la durée de cet appel. Ce n'est pas le cas pour l'acheminement d'un appel VoIP, qui fait intervenir un multiplexage statistique, les coûts d'utilisation en période de fort trafic étant alors proportionnels au nombre de bits transmis. Les difficultés potentielles liées à la facturation à la minute de services Internet ont été brièvement examinées ci-dessus<sup>75</sup>. Pour éviter que les

---

<sup>75</sup> Voir le paragraphe 7.2.2.

opérateurs RTPC ne risquent d'être défavorisés par la réglementation, la structure des prix de l'interconnexion RTPC pourrait bien devoir être révisée à court ou moyen terme, avec comme conséquence éventuelle une tarification fondée sur les coûts de capacité en "heures de pointe". La tarification à la minute étant en principe basée sur les coûts de capacité, une partie du travail nécessaire à cette révision a déjà été réalisée<sup>76</sup>.

- *Prélèvement de taxes particulières*

Il s'agit de taxes particulières telles que les contributions de service universel. Lorsqu'elles sont fondées sur une certaine mesure des parts de marché détenus, ces prélèvements tendent à accroître les coûts d'exploitation à la charge de l'entité taxée. Il est clair que lorsque ces taxes sont d'un montant important et qu'elles sont demandées uniquement à certains acteurs (opérateurs RTPC par exemple) et pas à d'autres (opérateurs VoIP par exemple), le concept de "neutralité concurrentielle" risque d'être mis à mal<sup>77</sup>.

### 7.3 Réglementation et opérateurs mobiles de la nouvelle génération

Un réseau mobile de la nouvelle génération utilisant le protocole IP sera développé. Il porte déjà un nom - UTRAN (UMTS, *universal mobile telecommunications system*) *terrestrial radio access network*, c'est-à-dire réseau d'accès radioélectrique de Terre UMTS (système de télécommunications mobiles universelles) - même si cette technique reste pour l'instant confinée aux laboratoires. Alors que la réglementation qui leur est applicable est pratiquement inexistante, ce qui est également le cas des fournisseurs ISP, les exploitants de réseaux mobiles MNO (*mobile network operator*) seront de plus en plus en concurrence avec les exploitants historiques de réseaux RTPC. On peut considérer qu'à l'heure actuelle, les réseaux GSM constituent essentiellement un complément aux réseaux des opérateurs RTPC historiques, c'est-à-dire que leur existence accroît fortement la profitabilité de ces derniers. Cependant, entre ces deux types de réseaux, on observe à la fois un effet de complémentarité et un effet de substitution: si le premier prédomine largement à l'heure actuelle, le second apparaîtra peut-être de plus en plus clairement

---

<sup>76</sup> Une réglementation inadaptée peut rendre le marché "inopérant" dans un certain nombre d'autres domaines, auxquels on pense moins spontanément bien qu'ils puissent être importants. On risque ainsi d'observer un moins grand nombre de nouveaux entrants, un moindre niveau de concurrence ou un moindre niveau d'investissement, les investisseurs potentiels risquant en effet de craindre de s'engager en raison des incertitudes et des risques liés à un certain "flou" réglementaire. Or, il s'agit là de véritables problèmes qui concernent en particulier les industries de biens utilitaires dont les investissements à long terme risquent d'être caducs par suite de décisions politiques ou réglementaires (les tarifs douaniers des Etats-Unis d'Amérique sur les importations d'acier, par exemple, réduisent à néant les actifs de ceux qui ont investi dans des pays producteurs d'acier exportateurs vers les Etats-Unis). Nous ne traitons pas ici ce genre d'anachronisme du marché mais nous invitons le lecteur à se reporter à l'étude que nous avons réalisée avec notre partenaire Cullen International & WIK (2001), intitulée "Universal service in the Accession Countries", et à consulter en particulier les pages 82-96 du rapport principal ("Main report") ainsi que les pages 8-13 du rapport national ("Country report").  
[http://europa.eu.int/information\\_society/topics/telecoms/international/news/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/information_society/topics/telecoms/international/news/index_en.htm)

<sup>77</sup> On trouvera une analyse de ces problèmes de taxes dans la contribution WIK (2000) et dans celle de Scanlan et Neu (2001). Dans certains pays par exemple, les coûts nets d'utilisation ont été couverts grâce aux taxes d'interconnexion. On trouvera au Chapitre 3 de l'ouvrage WIK (2000) une étude détaillée expliquant pourquoi il ne s'agit pas là d'une forme de recouvrement des coûts à conseiller. La contribution de Scanlan et Neu (2002) contient une analyse des difficultés consécutives à une tentative de recouvrement des subventions d'accès.

une fois que les réseaux UMTS commenceront à être exploités<sup>78</sup>. De même que la convergence avec les réseaux de données hertziens fixes justifie le réexamen par les autorités de réglementation de la structure et des unités de mesure des prix réglementaires applicables à ces réseaux (les tarifs d'interconnexion par exemple), ce processus de convergence fera également intervenir les opérateurs de réseaux mobiles. Les arguments en faveur d'une réglementation des réseaux UMTS sont donc très proches de ceux qui figurent dans le paragraphe 7.1 relatif aux réseaux ISP.

## Références

- Alcatel Telecommunication Review (2001), numéro spécial "Next Generation Now", Vol. 2.
- Anania, L., et R. Solomon, (1997), "The Minimalist Price", L. McKnight et J. Bailey (eds.) (1997), *Internet Economics*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Brown, S. et D. Sibley (1986), *The Theory of Public Utility Pricing*. Cambridge University Press.
- David, P. et S. Greenstein (1990), "The economics of compatibility standards: An introduction to recent research", *Econ. Innov. New techn*, (1): 3-41.
- Gupta, A., D. O. Stahl et A.B. Whinston, (1995) "A stochastic equilibrium model of Internet pricing", Mimeo, University of Texas at Austin.
- Hwang, J., Weiss, M. et S.J. Shin (2000), "Dynamic Bandwidth Provisioning Economy of A Marked- Based IP QoS Interconnection: IntServ - DiffServ", article présenté à la "28th Telecommunications Policy Research Conference", 23-25 septembre, Alexandria, Virginia.
- Kercheval, K. (1997), "TCP/IP over ATM", Prentice Hall PTR.
- Korilis, Y.A., T.A. Varvarigou, et S.R. Ahuja, (non daté), "Incentive-compatible pricing strategies in non-cooperative networks", Mimeo, Bell Laboratories.
- Marbach, P., (non daté), "Pricing priority classes in a differentiated services network", Mimeo, University of Cambridge.
- Marcus, J.S. (1999) *Designing wide area networks and Internetworks - A practical guide*, Addison-Wesley, Reading (Mass.)
- McDysan, D. (2000), *QoS and Traffic Management in IP and ATM Networks*, McGraw-Hill.
- McKnight, L.W. et J.P. Bailey (eds.) (1997), *Internet economics*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Odlyzko, A. (1998), "The economics of the Internet: Utility, utilisation, pricing, and quality of service", Mimeo, AT&T Labs – Research.
- Paschalidis, I.Ch., et J.N. Tsitsiklis, (2000), "Congestion dependent pricing of network services", *IEEE/ACM Transactions on Networking*: Vol. 8, 2, p. 171-184
- Ross, (1995), *Multi service loss models for Broadband Telecommunication Networks*, Springer Berlin.
- Scanlan, M. et Neu, W. (parution en 2002), "Universal service policies and institutions in emerging economies", Diskussionsbeitrag Nr. 120, *Wissenschaftliches Institut fuer Kommunikationsdienste*.

---

<sup>78</sup> Les réseaux GSM peuvent être considérés comme étant "complémentaires" des réseaux fixes en ce sens qu'il y a un nombre croissant d'appels initiés sur le réseau hertzien fixe d'un opérateur historique et qu'on observe un accroissement des recettes d'interconnexion tirées d'appels ayant pour origine un réseau GSM et se terminant sur un réseau hertzien fixe de l'opérateur historique.

- Semeria, C. (1996), "Understanding IP addressing: Everything you ever wanted to know", <http://www.3com.com/nsc/501302html>
- Smith, C. et D. Collins (2002), *3G Wireless Networks*, McGraw-Hill Telecom Professional, New York.
- Squire, Sanders & Dempsey LLP et WIK (2002), "Market definitions and regulatory obligations in communications markets" (étude de la Commission européenne).
- Wang, Q., Peha, J.M. et M.A. Sirbu (1997), "Optimal pricing for integrated service networks", dans: McKnight et Bailey (1997), p. 353-376).
- Wang, Q., Peha, J.M. et M.A. Sirbu (1995), "The design of an optimal pricing scheme for ATM Integrated-Service networks", article présenté à l'atelier MIT sur l'économie de l'Internet (MIT Workshop on Internet Economics) (mars).
- WIK (2002), *The economics of IP networks: market, technical and public policy issues relating to internet traffic exchange* (étude pour la Commission européenne).
- WIK (2000), *Study on the re-examination of the scope of universal service in the telecommunications sector of the European Union, in the context of the 1999 Review* (étude pour la Commission européenne).
- Yuen, C. et W. Tjioe, (non Daté), "Modeling and verifying a price model for congestion control in computer networks using PROMELA/SPIN", University of Toronto.

## Glossaire

AAL	couche d'adaptation ATM ( <i>ATM adaptation layer</i> )
ABR	débit binaire disponible ( <i>available bit rate</i> )
AS	système autonome ( <i>autonomous system</i> )
ATM	mode de transfert asynchrone ( <i>asynchronous transfer mode</i> )
CATV	télévision par câble ( <i>cable TV</i> )
CBR	débit binaire constant ( <i>constant bit rate</i> )
CDN	réseau de fourniture de contenu ( <i>content delivery network</i> )
CDV	variation du temps de propagation des cellules ( <i>cell delay variation</i> )
CER	taux d'erreurs de cellules ( <i>cell error ratio</i> )
<i>Ceteris Paribus</i>	toutes choses égales par ailleurs
CLR	taux de perte de cellules ( <i>cell loss ratio</i> )
CMR	taux de mauvaise insertion de cellules ( <i>cell misinsertion ratio</i> )
CoS	classe de service ( <i>class of service</i> )
CTD	temps de transfert de cellules ( <i>cell time delay</i> )
<i>DiffServ</i>	services différenciés ( <i>differentiated services</i> ) (protocoles)
DNS	système de nom de domaine ( <i>domain name system</i> )
DSCP	point de code de services différenciés ( <i>differentiated services code point</i> )
DSL	ligne d'abonné numérique ( <i>digital subscriber line</i> )



DSLAM	multiplexeur d'accès de ligne d'abonné numérique ( <i>digital subscriber line access multiplexer</i> )
DWDM	multiplexage à répartition par longueur d'onde à forte densité ( <i>dense wave division multiplexing</i> )
ECI	indicateur d'encombrement explicite ( <i>explicit congestion indicator</i> )
ENUM	système de nommage étendu pour l'Internet ( <i>extended numbering internet DNS</i> )
FRIACO	offre d'interconnexion forfaitaire ( <i>flat rate internet call origination</i> )
FTP	protocole de transfert de fichiers ( <i>file transfer protocol</i> )
GMPLS	commutation MPLS généralisée ( <i>generalised MPLS</i> )
GoS	niveau de service ( <i>grade of service</i> )
GSM	système mondial de communications mobiles ( <i>global system for mobile communications</i> )
IBP	fournisseur de dorsale Internet ( <i>internet backbone provider</i> )
IETF	groupe de travail sur l'ingénierie de l'Internet ( <i>internet engineering task force</i> )
IntServ	services intégrés ( <i>integrated services</i> ) (protocoles)
IP	protocole Internet ( <i>internet protocol</i> )
ISDN	réseau numérique à intégration de services ( <i>integrated services digital network</i> )
ISO	organisation internationale de normalisation ( <i>international organisation for standardisation</i> )
ISP	fournisseur de service Internet ( <i>internet service provider</i> )
LAN	réseau local ( <i>local area network</i> )
LAIN	réseau IP local ( <i>local area IP network</i> )
LSP	conduit commuté avec étiquette ( <i>label switched path</i> )
MC	coût marginal ( <i>marginal cost</i> )
MinCR	débit cellulaire minimal ( <i>minimum cell rate</i> )
MPLS	commutation multiprotocolaire par étiquetage ( <i>multi protocol label switching</i> )
MPOA	encapsulage multiprotocole sur ATM ( <i>multi protocol over ATM</i> )
NA	non disponible ( <i>not available</i> )
NAP	point d'accès au réseau ( <i>network access point</i> )
NGI	Internet nouvelle génération ( <i>next generation internet</i> )
nrt	temps quasi réel ( <i>near real-time</i> )
OAM	exploitation, administration et maintenance ( <i>operation, administration and maintenance</i> )
OC	porteuse optique ( <i>optical carrier</i> )
OSI	interconnexion des systèmes ouverts ( <i>open systems interconnection</i> )
PCR	débit cellulaire crête ( <i>pick cell rate</i> )
PIR	taux de création de paquets ou de cellules ( <i>packet or cell invention ratio</i> )

PLR	taux de perte de cellules ou de paquets ( <i>packet or cell-loss ratio</i> )
PoP	point de contact ( <i>point of presence</i> )
PoS	paquet sur SONET ( <i>packet over sonet</i> )
RTPC	réseau téléphonique public commuté
QoS	qualité de service ( <i>quality of service</i> )
RFC	demande de commentaires ( <i>request for comments</i> )
RSVP	protocole de réservation de ressources ( <i>reserve reservation protocol</i> )
rt	temps réel ( <i>real time</i> )
RTCP	protocole de commande en temps réel ( <i>real-time control protocol</i> )
RTP	protocole de transport en temps réel ( <i>real-time transport protocol</i> )
SCR	débit cellulaire réel ( <i>substantial cell rate</i> )
SDH	hiérarchie numérique synchrone ( <i>synchronous digital hierarchy</i> )
SECBR	taux de blocs de cellules gravement erronés ( <i>several error cell block ratio</i> )
SIP	protocole d'initiation de session ( <i>session initiation protocol</i> )
SLA	accord de niveau de service ( <i>service level agreement</i> )
SONET	réseau optique synchrone ( <i>synchronous optical network</i> )
TCP	protocole de commande de transmission ( <i>transfer control protocol</i> )
UBR	débit binaire non spécifié ( <i>unspecified bit rate</i> )
UDP	protocole datagramme d'utilisateur ( <i>user datagram protocol</i> )
UMTS	système de télécommunications mobiles universelles ( <i>universal mobile telecommunications system</i> )
VBR	débit binaire variable ( <i>variable bit rate</i> )
VC	circuit, voie ou connexion virtuels ( <i>virtual circuit, channel or connection</i> )
VLSM	masque de sous-réseau à longueur variable ( <i>variable length subnet masking</i> )
VoIP	voix par IP ( <i>voice over ip</i> )
VP	conduit virtuel ( <i>virtual path</i> )
VPIP	réseau IP privé virtuel ( <i>virtual private ip network</i> )
WAN	réseau étendu ( <i>wide area network</i> )
WAIN	réseau IP étendu ( <i>wide area ip network</i> )
WDM	multiplexage par répartition en longueur d'onde ( <i>wave division multiplexing</i> )
WIK	<i>wissenschaftliches institut für kommunikationsdienste</i>
WTP	consentement à payer ( <i>willingness to pay</i> )

## Annexe I

### Qualité de service et limites associées à l'accroissement d'une largeur de bande peu coûteuse<sup>79</sup>

Ces dernières années, plusieurs personnes ont souligné que, compte tenu de la diminution accélérée du coût de la largeur de bande et de l'accroissement rapide de la puissance de calcul, utiliser "toujours plus" de largeur de bande pour faire face aux encombrements peut permettre de régler à moindre frais les problèmes de qualité de service<sup>80</sup>. Certains ont en effet affirmé que cette option rend caduques les propositions de mise en oeuvre de mécanismes de tarification (options de classe de service par exemple) pour contrôler les encombrements et risque également d'annihiler les propositions reposant essentiellement sur des moyens techniques de discrimination entre paquets de priorité élevée ou faible (par exemple les architectures *IntServ* et *DiffServ*, décrites plus haut). Ils estiment que, compte tenu en particulier de la chute des coûts de transmission et de traitement, et de la croissance rapide de la puissance de calcul, l'encombrement de l'Internet est un phénomène temporaire et qu'en conséquence il est inutile de modifier la structure actuelle des prix.

Les partisans de la solution consistant à utiliser "toujours plus" de largeur de bande avancent comme argument des informations indiquant que la largeur de bande disponible s'est accrue à un rythme beaucoup plus élevé que l'augmentation des volumes de trafic<sup>81</sup>. Peu importe donc, d'ici à plusieurs années, si la priorité de traitement des paquets sur l'Internet dépend de l'ordre d'arrivée (et donc que la qualité de service des courriers électroniques de faible priorité soit la même que celle des paquets VoIP), puisque le niveau QoS accordé à tous les paquets sera si élevé que la retenue de messages là où le niveau QoS perçu est très sensible au temps de latente et à la gigue n'aura pas d'incidence matérielle sur le niveau QoS perçu par les utilisateurs finals. D'une manière générale, l'argument avancé est que, en raison de la diminution rapide des coûts de largeur de bande et de traitement, l'octroi d'une largeur de bande "toujours plus grande" est la solution financièrement la plus avantageuse pour traiter les problèmes de qualité de service. En résumé, les tenants de cette option affirment que tous les services bénéficieront d'un niveau de qualité de service optimal.

Même si l'on peut concéder que le recours à une surcapacité réseau apparente puisse souvent être une solution adaptée, nous ne pensons pas qu'accroître "encore et toujours" la largeur de bande en cas d'encombrement soit la meilleure façon de traiter les problèmes de qualité de service entravant le bon fonctionnement du service VoIP ou d'autres applications qui doivent respecter des spécifications QoS strictes. En effet, même à supposer que l'on néglige la question de son opportunité financière, nous ne sommes pas convaincus qu'une telle démarche soit une réponse suffisante au problème d'encombrement pour permettre à l'Internet et à tous ses services d'offrir une alternative réellement concurrentielle face à d'autres plates-formes telles que le RTPC. Nous en voulons notamment pour preuve que la demande de largeur de bande devrait s'accroître très fortement pour les raisons suivantes:

- les vitesses d'accès dont bénéficieront les utilisateurs finals (xDSL par exemple) augmenteront à court et moyen terme (et les vitesses d'accès seront plusieurs fois supérieures aux vitesses xDSL réelles dans les 10 à 20 prochaines années);

---

<sup>79</sup> La présente Annexe est tirée de la contribution WIK (2002).

<sup>80</sup> Voir par exemple les publications de Ferguson et Huston (1998), de Odlyzko (1998) et de Anania et Solomon (1997) (l'objet de cette dernière publication étant moins explicite).

<sup>81</sup> Voir Odlyzko (1998).

- si l'on parvient à fournir un service VoIP de haute qualité, de nombreux clients (et peut-être une majorité des abonnés actuels au RTPC) préféreront sans doute opter pour les services téléphoniques sur l'Internet, qui, dans de nombreux cas, seront certainement bien moins chers;
- lorsque les vitesses d'accès des clients permettront d'obtenir un flux vidéo de qualité HDT, la convergence entre l'Internet, la télévision par câble et la radiodiffusion aura eu lieu et la demande de contenu (en provenance de toutes les régions du monde) générera certainement un accroissement énorme du volume de trafic Internet;
- la disponibilité d'un accès à l'Internet mobile 3G et 4G peut également favoriser un accroissement important de la demande de services Internet (qu'il s'agisse de services vocaux, de navigation, de courrier électronique, de transfert de fichiers ou de flux vidéo).

Nous avons indiqué au paragraphe 3 que, hormis l'application d'un mécanisme de tarification en fonction du coût marginal, il n'existait pas de moyen suffisamment efficace pour inciter les fournisseurs ISP à investir à temps dans la modernisation de leurs capacités. Ce mécanisme est idéal pour établir un lien entre les incitations à investir davantage et la demande; dans un monde de l'Internet fondé sur une tarification forfaitaire et dont les coûts marginaux d'encombrement sont loin d'être nuls, aucun mécanisme de tarification fonction du coût marginal n'est actuellement appliqué.

Toutefois, la question la plus importante n'est peut-être pas de savoir s'il est possible de traiter les problèmes QoS des services temps réel en utilisant "toujours plus" de largeur de bande, mais plutôt de déterminer s'il existe une solution financièrement plus avantageuse associant une tarification forfaitaire et une ingénierie trop complexe de l'Internet. Si cette dernière solution existe, il reste à savoir si celle-ci induira un mécanisme de tarification susceptible de mieux répondre aux objectifs fixés (et qui permette en particulier de mieux faire correspondre les coûts marginaux de modernisation de capacité et les recettes marginales, lorsque la qualité de service est dégradée par les encombrements).

Selon nous, il est très peu probable qu'une offre forfaitaire "un seul service pour tous" soit l'offre retenue par les utilisateurs de l'Internet nouvelle génération après "avènement" de la convergence (c'est-à-dire lorsque les services fournis sur l'Internet - navigation, flux vidéo, transfert de fichiers, courrier électronique et voix - seront de par leur rapport qualité/prix tout à fait concurrentiels vis-à-vis de ceux fournis sur d'autres plates-formes existantes). En résumé, nous sommes résolument opposés à l'idée selon laquelle la diminution rapide des coûts de capacité permette d'éviter que le problème "the tragedy-of-the-commons" ne se pose pour l'Internet,<sup>82</sup> c'est-à-dire l'idée selon laquelle l'offre sera en pratique supérieure à la demande. Cette vision ne correspond pas aux résultats observés lorsque des mesures ont conduit à la fourniture gratuite de biens ne relevant pas stricto sensu du domaine public<sup>83</sup>. L'expérience nous montre qu'en de tels cas des problèmes de surutilisation/d'encombrement surviennent généralement.

---

<sup>82</sup> Il s'agit d'un dysfonctionnement du marché décrit précédemment.

<sup>83</sup> Lorsque les utilisateurs devaient s'acquitter des frais d'abonnement mais pas des coûts d'utilisation marginale, les résultats étaient bien meilleurs. Toutefois, en l'absence d'un accroissement substantiel de l'investissement en capacité, certains problèmes d'encombrement persistent généralement.

Pour disposer de capacités en excès, il faut construire des réseaux capables de fonctionner dans les conditions prévues de demande crête<sup>84</sup>. Il en résulte généralement une moindre utilisation moyenne des ressources réseau et donc un accroissement du coût moyen d'utilisation par bit. On sait bien que le trafic Internet tend à être très "sporadique" (demandes de largeurs de bande élevées pendant de courtes périodes). Dans les réseaux ISP de grande taille, cette "sporadicité" des utilisateurs finals tend à se "lisser" quelque peu en raison du grand nombre d'"impulsions" dispersées autour d'une valeur moyenne<sup>85</sup>. Pour éviter que les encombrements ne dégradent fortement la qualité de service durant les périodes d'utilisation les plus importantes, il conviendrait peut-être d'appliquer des taux d'utilisation crête moyens sur dorsales d'environ 50%, et des taux moyens d'utilisation sur 24 heures beaucoup plus petits.

Ces trois/quatre dernières années, des progrès ont été réalisés en matière de normes de réseaux IP destinées à résoudre les problèmes QoS (via par exemple les protocoles temps réel (RTP), les "protocoles de réservation de ressources" (RSVP et les architectures *DiffServ* et *IntServ*). Les services acheminés via ces protocoles ne sont pas encore couramment disponibles sur l'Internet mais peuvent être mis en oeuvre par les routeurs de certains réseaux d'entreprises, ou réseaux universitaires tels que le TEN 155, ou même par certains réseaux ISP de grande taille (mais pas encore entre ce type de réseaux).

---

<sup>84</sup> Dans la pratique, des données peuvent être "bloquées" en périodes d'encombrement même sur le RTPC. Dans le cas de l'Internet, cette tâche est effectuée par des algorithmes de contrôle d'admission.

<sup>85</sup> Cet effet, connu sous le terme de multiplexage stochastique, doit être considéré avec soin. Selon certaines études sur le trafic Internet, les longueurs des pages web ainsi que les temps de traitement et de transmission correspondant ne suivent pas une courbe de distribution exponentielle mais sont plutôt (avec une meilleure approximation) à une distribution caractérisée par une forte variance (une distribution de Weibull par exemple). Certains auteurs ont affirmé que la distribution à considérer est celle de Pareto, ce qui correspond à une variance quasi infinie et annule tout effet de multiplexage stochastique. Cependant, leurs études sont généralement fondées sur le trafic Internet de réseaux théoriques, ce qui n'est pas représentatif du niveau de trafic commercial sur l'Internet.

## Annexe II

### Etudes théoriques sur la tarification et les classes de service

Il convient de noter que les études examinées dans la présente Annexe ne trouvent pas à l'heure actuelle d'application pratique évidente sur l'Internet ou dans les réseaux IP. Ces travaux sont de nature théorique et traitent principalement des problèmes informatiques et de modélisation associés à l'optimisation de la conception de réseau.

Dans la pratique, les utilisateurs de réseaux IP ne bénéficient pas actuellement d'une tarification en fonction de la classe de service, de nombreux problèmes restant à résoudre avant qu'un tel projet ne puisse effectivement être conçu et mis en oeuvre.

#### **Gupta, Stahl et Whinston (1995)**

Ce travail se place dans l'hypothèse d'un marché au comptant, avec utilisation de files d'attente prioritaires, les paquets de session bénéficiant de priorités différentes en fonction de la classe de priorité payée par le client. Il s'agit d'un modèle fondé sur des prévisions et des valeurs stochastiques (les valeurs ne sont pas connues avec certitude). Il existe  $K$  classes de services ne pouvant être interrompus, les utilisateurs choisissant l'une d'entre elles en fonction de l'urgence de leur demande. La classe  $k = 1$  (classe de priorité la plus élevée) correspond à l'encombrement le plus faible et au prix le plus élevé. Le modèle proposé permet une gestion décentralisée des prix, propre à chaque poste connecté à l'Internet. Les tarifs de location sont ajustés afin de parvenir au meilleur compromis possible entre débit de données et temps d'attente. Les coûts de service escomptés générés par les clients dépendent de la charge de trafic prévue<sup>86</sup>, de la classe de service choisie et du coût des équipements (on peut parler de manière générale des coûts d'investissement associés aux éléments de réseau utilisés en raison de la ou des demandes des utilisateurs). Le prix d'une session est la somme des différents prix de priorité  $k$  donnée facturés pour chaque ordinateur du réseau sur la base du nombre d'unités prévues pour le travail de traitement. Les différences de prix entre classes sont modulées de façon itérative pour que les prévisions de trafic puissent prendre en compte les données de trafic mesurées (temps d'attente par exemple). Les coûts facturés aux utilisateurs dépendent des niveaux de prix et des temps de retard.

Une classe de service est attribuée à un client en fonction du tarif de location dont il s'acquitte, qui dépend du coût de retard et qui peut varier d'un client à un autre. Les clients qui paient le plus peuvent espérer bénéficier d'un service temps réel à quasiment tout instant. L'un des attraits de cette étude réside dans l'utilisation de *prévisions adaptatives*. Le modèle proposé intègre fortement les éléments de la théorie économique.

#### **Marbach** (pas d'indication de date)

Marbach a développé deux modèles dans son étude. Le premier modèle est celui d'un "jeu non coopératif", au terme duquel les prix à payer par les utilisateurs varient en fonction du niveau de priorité choisi. Dans ce cas, tous les paquets acceptés sur le réseau bénéficient d'un traitement identique, de telle sorte que le niveau de priorité choisi détermine les attentes de l'émetteur de trafic en termes de probabilité d'acceptation de ses paquets. Ce modèle est curieux puisque les jeux non coopératifs sont généralement appliqués lorsque les participants sont à même d'exercer une influence sur le résultat final, ce qui n'est pas réaliste pour la plupart des utilisateurs de l'Internet, même la pertinence de cette approche apparaît bien pour des réseaux de plus petite taille. Ce modèle

---

<sup>86</sup> Ce modèle repose en effet sur les coûts de traitement plutôt que sur le nombre de paquets de données transmis.

permet également au fournisseur de bénéficier d'une part plus importante des surplus dégagés par les consommateurs grâce à une discrimination des prix. Les clients choisissent un niveau de priorité pour leurs paquets et maîtrisent ainsi le niveau de qualité de service dont ils disposent, dans la limite du bon fonctionnement des divers mécanismes de classe de service.

Les prix à payer par les utilisateurs sont fondés sur le nombre de paquets transmis. Il s'agit là d'un modèle présentant des mesures incitatives plus fortes que celui fondé sur la charge de travail (et proposé par Gupta et autres), qui est caractérisé par une puissance de travail en augmentation rapide, la charge de travail dépendant en quelque sorte d'une décision "endogène" propre à chaque concepteur de réseau.

Lorsque la capacité disponible est attribuée dans l'ordre des classes de priorité, il existe toujours une classe de priorité pour laquelle tous les paquets ne peuvent pas être envoyés, c'est-à-dire pour laquelle la demande est supérieure à la capacité. Certains paquets de cette classe seront donc perdus. Tous les paquets dont le niveau de priorité est supérieur à celui de cette classe seront envoyés avec succès. Lorsqu'il n'y a qu'un seul niveau de qualité de service pour tous les paquets envoyés, il existe un prix en cas d'encombrement  $u^*$  semblable au prix de réajustement du marché intervenant dans le modèle de mise aux enchères de Machie-Mason et Varian. Les informations aidant les utilisateurs à faire leur choix sont fournies par une liaison de commande (une voie de signalisation contenant des données réseau "intelligentes").

Le second modèle de Marbach élargit cette première approche en un modèle de tarification en cas d'encombrement. Cette tarification repose sur le nombre de paquets envoyés; elle s'applique lorsque plusieurs classes de qualité de service sont disponibles et que la fourniture de ces paquets est certaine. A chaque classe de service est associée une valeur différente de  $u^*$ . Il s'agit d'un prix permettant au réseau de faire face au trafic entrant sans dégradation de la qualité de service, toute baisse de ce prix entraînant une dégradation de la qualité de service (perte de paquets) du fait de l'accroissement de la demande.

#### **Yuen et Tjioe** (pas d'indication de date)

L'étude de Yuen et Tjioe comprend un rapport sur l'utilisation de simulations faites à partir d'un modèle informatique et destinées à vérifier les propriétés du modèle de Marbach. Comme dans le cas de l'étude de Machie-Mason et Varian, le modèle proposé part du principe que les utilisateurs du réseau modifieront leur comportement en fonction des tarifs qui leur sont proposés. Il fait intervenir différentes classes de service, dont une classe de "priorité maximale" et une classe de "service assuré au mieux". La transmission de tous les paquets appartenant à la classe de priorité maximale est garantie. Le premier service fourni est celui d'une voie de signalisation, au travers duquel chaque utilisateur est informé de la probabilité de transmission en fonction du nombre total de demandes émanant des utilisateurs. Si la demande de trafic est supérieure à la capacité disponible, la

probabilité de transmission est inférieure à 1. La probabilité de transmission est déterminée pour toute la durée d'un cycle (jusqu'au cycle suivant) et devient donc moins précise avec le temps. Yuen et Tjioe ont par conséquent adjoint à leur modèle un processus d'administration qui surveille périodiquement l'utilisation du réseau et ajuste les prix afin d'assurer une gestion dynamique des ressources réseau.

### **Korilis, Varvarigou et Ahuja** (pas d'indication de date)

Cette étude porte sur l'optimisation de la gestion d'un réseau d'une certaine taille, qui fait intervenir un nombre limité d'utilisateurs ayant une certaine connaissance du comportement des autres utilisateurs. L'instrument utilisé à cette fin est la tarification, les utilisateurs payant en termes d'unités de flux, dont le prix varie de liaison à liaison afin de gérer l'encombrement du réseau. Le modèle proposé est donc celui d'un jeu non coopératif, chaque utilisateur modifiant sa stratégie en fonction des décisions de routage des autres utilisateurs. L'"optimisation" est obtenue dans un premier temps liaison par liaison, les consommateurs (utilisateurs) agissant au mieux au regard de leurs demandes, des ressources réseau disponibles et des tarifs.

Les auteurs ont ensuite élargi leur modèle pour permettre une détermination "endogène" des prix sur chaque liaison en fonction du débit de données. Ils se sont placés dans le cadre d'un marché de services Internet temps réel dans lequel les utilisateurs cherchent à acquérir des capacités de ressources à un instant donné. Les informations fournies aux utilisateurs portent sur la capacité résiduelle et le prix de chaque ressource. L'idée est de minimiser l'encombrement moyen du système grâce à la mise en oeuvre d'une tarification judicieuse.

Le comportement du fournisseur de réseau en termes de dimensionnement du réseau (c'est-à-dire l'évolution de l'offre) n'est pas traité dans cette étude. Le modèle proposé peut permettre à un fournisseur en situation de monopole d'obtenir un maximum de profits ou peut être utilisé pour parvenir à un maximum de bien-être collectif. L'adaptation de ce modèle faisant intervenir un seul fournisseur pour le transformer en un modèle faisant intervenir un nombre limité de fournisseurs en situation de concurrence (chacun d'eux étant à même de fournir le trafic demandé) pourrait s'avérer utile pour gérer un réseau des réseaux.

### **Paschalidis et Tsitsiklis (2000)**

Le modèle de Paschalidis et Tsitsiklis (P&T) fait intervenir un fournisseur de services dont la capacité est constante (ce qui signifie que la tarification ne tient pas compte de la nécessité d'accroître la capacité d'un réseau en extension rapide). Les auteurs étudient principalement la tarification sous l'angle de la maximisation des recettes, bien qu'ils procèdent parfois également à une brève analyse de la maximisation du bien-être collectif, la facturation proposée par les fournisseurs de services se faisant alors sur la base du volume acheminé par unité de temps.

Paschalidis et Tsitsiklis comparent ce qu'ils appellent une tarification dynamique quasi optimale à une tarification statique. La tarification dynamique correspond à un ajustement continu des prix destinés à refléter l'état du système (c'est-à-dire la charge du réseau). La structure de tarification dynamique optimale doit être fondée sur l'état du réseau, les prix étant déterminés en temps réel au niveau de chacun des noeuds. Les auteurs font intervenir plusieurs classes de service, bien qu'à cet égard leur modèle soit plutôt restrictif puisqu'il suppose que les classes présentent des caractéristiques identiques. L'idée sous-jacente est que le réseau opérera une distinction entre clients en fonction de l'urgence de leurs demandes et leur imposera des tarifs différents. Ce mécanisme est connu sous le nom de discrimination tarifaire; il peut permettre d'améliorer le bien-être collectif, bien que cela ne soit pas le cas suivant l'approche proposée par P&T.



Les calculs nécessaires à l'optimisation dynamique des prix deviennent rapidement ingérables à mesure que s'accroît le nombre de classes et qu'augmente la capacité. Une tarification entièrement dynamique n'est donc pas commode à appliquer, ce qui a conduit les auteurs à étudier si (et dans quelles conditions) l'offre de prix statiques (c'est-à-dire les tarifs qui s'appliquent sur une longue durée et ne reflètent pas exactement l'état du réseau) constitue une alternative satisfaisante. La politique de tarification étudiée est constante au cours d'une session mais varie périodiquement entre deux sessions.

Bien que les travaux de P&T nous montrent effectivement que l'application d'une modélisation statique des prix peut être satisfaisante, il serait certainement nécessaire de procéder à d'autres études s'appuyant sur des conceptions de modèle légèrement différentes sur des hypothèses moins contraignantes (utilisation de classes de service dissemblables par exemple), sur la possibilité donnée au client de modifier son choix de classe et sur une attention plus grande portée aux conséquences en termes de bien-être collectif. Si ces travaux sont utiles pour comprendre comment fonctionne la tarification de l'Internet, il serait également nécessaire de disposer d'études d'économétrie appliquée afin d'obtenir des données relatives à la demande de services Internet.

### **Wang, Peha et Sirbu (1995)**

Cette étude examine la question de la tarification d'un réseau ATM à deux classes de service: un service garanti relatif à un niveau QoS spécifié à l'avance (niveau pas absolu mais stochastique) et une classe de service assuré au mieux.

Les réseaux ATM mettent en oeuvre une *politique de gestion de trafic* en vue de contrôler l'admission sur réseau des cellules en fonction d'un ensemble de paramètres prédéterminés faisant l'objet d'un accord contractuel avec chaque client. Les étiquettes du champ ToS des en-têtes de paquets IP ne sont pas reconnues par les réseaux ATM. Ainsi, avant que la politique de gestion du trafic ne soit appliquée, les réseaux reconfigurent le trafic qu'ils émettent afin que ce dernier corresponde au profil client. De plus, lorsque le protocole IP est appliqué à l'une des extrémités d'un réseau ATM, les paquets IP doivent être différenciés avant de parvenir dans ce réseau et être dirigés dans un circuit, une voie ou une connexion virtuels ATM en fonction de la classe de service à assurer.

Le niveau d'"interprétabilité" entre les protocoles ATM et IP (couches 2 et 3 du modèle ISO<sup>87</sup>) n'est généralement pas indiqué, et il est par ailleurs impossible pour les utilisateurs finals d'exercer un contrôle quelconque sur ce processus. Ainsi, à l'instar des travaux précédemment décrits, l'étude de Wang et autres ne cherche pas à dégager une solution pratique aux problèmes Internet existants, mais constitue une démarche théorique qui enrichit nos diverses connaissances sur la tarification et la gestion de réseau. Elle permettra aussi de mieux concevoir des solutions pratiques aux problèmes de tarification et de qualité de service à mettre en oeuvre dans l'avenir.

Dans le cas d'un service assuré au mieux, les clients sont facturés sur la base du nombre de cellules émises. Compte tenu des informations sur la demande, la capacité de réseau et la taille de la mémoire tampon, un prix plancher est déterminé et les cellules pour lesquelles les clients ne sont pas prêts à payer cette somme minimale sont éliminées. La façon dont ce prix plancher est déterminé est un point central de l'étude de Wang et autres, avec la détermination du tarif associé à la classe de service garanti.

---

<sup>87</sup> Voir la Figure 2-1.

Cette étude aborde la question de la tarification sous l'angle de la maximisation des profits et non du bien-être collectif. Elle s'attache à décrire une procédure à trois étapes destinée à obtenir une approximation de la "maximisation" idéale, sachant que vouloir déterminer cette dernière conduirait à des calculs mathématiques inextricables. Ces trois étapes sont les suivantes: la décision d'investissement, la tarification optimale du service garanti et la tarification immédiate du service assuré au mieux. On procède à l'itération de cette procédure jusqu'à obtention d'un état stable.

## Annexe III

### Attributs de qualité de service des réseaux ATM

Dans les réseaux ATM, les cellules arrivantes remplissent un compteur logique qui "fuit" selon des paramètres de trafic spécifiques sur lesquels repose la définition des contrats de qualité de service. Ces paramètres sont: le taux de perte de cellules (CLR), le temps de transfert de cellules (CTD), la variation du temps de propagation des cellules (CDV), le débit cellulaire crête (PCR), le débit cellulaire réel (SCR), le débit cellulaire minimal (MinCR) et l'indicateur d'encombrement explicite (ECI).

Les opérateurs ont récemment commencé à mettre en oeuvre une forme d'architecture à commutation IP WAN sous protocole de commutation multiprotocolaire par étiquetage (MPLS). L'adoption de cette technique conduira à introduire certaines modifications dans les contrats SLA conclus entre les fournisseurs ISP et leur fournisseur de transit. La commutation MPLS est étudiée au paragraphe 5.2.1

**Tableau 0-1 – Caractéristiques de la correspondance entre certaines applications et les catégories de service du forum ATM**

Applications	CBR	VBR-rt	VBR-nrt	ABR	UBR
Données critiques	Bonne	Correcte	Optimale	Correcte	Impossible
Interconnexion LAN	Correcte	Correcte	Bonne	Optimale	Bonne
Transport de données WAN	Correcte	Correcte	Bonne	Optimale	Bonne
Emulation de circuit	Optimale	Bonne	Impossible	Impossible	Impossible
Téléphonie	Optimale	Bonne	Impossible	Impossible	Impossible
Conférence vidéo	Optimale	Bonne	Correcte	Correcte	Mauvaise
Compression audio	Correcte	Optimale	Bonne	Bonne	Mauvaise
Distribution vidéo	Optimale	Bonne	Correcte	Impossible	Impossible
Multimédia interactif	Optimale	Optimale	Bonne	Bonne	Mauvaise

Source: McDyson (2000)

- CBR: débit binaire constant,
- VBR-rt: débit binaire variable avec temps réel,
- VBR-nrt: débit binaire variable sans temps réel,
- ABR: débit binaire disponible
- UBR: débit binaire non spécifié.

La correspondance éventuelle entre des catégories de service ATM et certains types d'application est indiquée dans le Tableau 0-1. Pour les services qui requièrent des caractéristiques de qualité de service élevées (téléphonie, données interactives et vidéo temps réel par exemple), les réseaux ATM peuvent être configurés de manière à présenter une largeur de bande conséquente, un petit temps de latence et une faible gigue, à l'instar d'un circuit spécialisé.

Il convient de noter que les garanties QoS s'appliquent généralement au trafic Internet de transit, mais uniquement s'il s'agit d'un service normalisé. Hors des réseaux privés (c'est-à-dire sur l'Internet public), les garanties QoS sont celles qui sont associées à la couche AAL5 ATM et au débit UBR, et non celles qui permettraient d'assurer une qualité de service temps réel fiable. D'autres classes de service susceptibles d'être fournies par des réseaux ATM (couche AA1 et débit CBR ou VBR-rt par exemple) ne sont apparemment pas reconnues sur les réseaux ISP.

Dans le cas où un réseau émetteur ou récepteur de trafic met en oeuvre une architecture *IntServ* ou *DiffServ*, un système CoS peut fonctionner hors réseau bien que cela soit très rarement ou jamais observé dans la pratique.

---