



Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique
No. 142

Évolution des technologies
de la fibre
et de l'investissement en ce
domaine

OCDE

<https://dx.doi.org/10.1787/230507280164>

Non classifié

DSTI/ICCP/CISP(2007)4/FINAL



Organisation de Coopération et de Développement Économiques
Organisation for Economic Co-operation and Development

15-Jul-2008

Français - Or. Anglais

**DIRECTION DE LA SCIENCE, DE LA TECHNOLOGIE ET DE L'INDUSTRIE
COMITÉ DE LA POLITIQUE DE L'INFORMATION, DE L'INFORMATIQUE ET DES
COMMUNICATIONS**

Groupe de travail sur les politiques d'infrastructure et de services de communication

ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE LA FIBRE ET DE L'INVESTISSEMENT EN CE DOMAINE

JT03248949

Document complet disponible sur OLIS dans son format d'origine
Complete document available on OLIS in its original format

**DSTI/ICCP/CISP(2007)4/FINAL
Non classifié**

Français - Or. Anglais

AVANT-PROPOS

Le Groupe de travail PISC a examiné le présent document au cours de ses réunions de mai et décembre 2007. Il a convenu d'en recommander la déclassification au Comité PIIC, qui a approuvé la déclassification en mars 2008.

Ce document a été rédigé par Rudolf van der Berg, du Ministère des affaires économiques des Pays-Bas, dans le cadre de sa mission à l'OCDE.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	6
DEVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES DANS LE DOMAINE DE LA FIBRE OPTIQUE	7
Description et fonctionnement d'une fibre optique.....	7
Avantages des fibres par rapport aux autres milieux physiques.....	8
Réseaux longue distance (longhaul).....	8
Réseaux de raccordement (backhaul).....	10
Réseaux du dernier kilomètre – principes généraux, débit et bande passante.....	11
Réseaux du dernier kilomètre – sans fil	15
Réseaux du dernier kilomètre – configurations hybrides	17
Réseaux du dernier kilomètre – fibre	22
Comparaison entre réseaux	27
Concurrence et régulation	29
Perspectives à court terme.....	30
MODÈLES ÉCONOMIQUES ET DÉCISIONS D'INVESTISSEMENT	32
Opérateurs historiques contre nouveaux entrants.....	32
Risques associés aux modèles économiques	34
Autres modèles économiques.....	35
Paramètres financiers d'un modèle économique.....	37
RÔLE DES POUVOIRS PUBLICS	40
Incitateur	40
Régulateur	42
Investisseur.....	43
CONCLUSIONS	47
ANNEXE A. COÛTS D'UN RÉSEAU TOUT EN FIBRE	49
ANNEXE B. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE RÉSEAU	53
NOTES	55

SYNTHÈSE

Le présent document propose un aperçu général des développements des technologies de la fibre optique pour les réseaux dits du dernier kilomètre, c'est-à-dire reliant les locaux des abonnés aux commutateurs de télécommunications, et pour les réseaux de raccordement, c'est-à-dire reliant les commutateurs au cœur du réseau. Ce document aborde également les questions du déploiement et du coût des réseaux du dernier kilomètre et évoque les problèmes connexes en matière de réglementation. L'échelle de temps considérée dans ce document est la période comprise entre 2010 et 2020, c'est-à-dire la décennie au cours de laquelle la nouvelle génération de réseaux hybrides ou tout en fibre arrivera à maturité et sera déployée à grande échelle.

La demande de haut débit toujours plus forte des utilisateurs conduit les fournisseurs d'accès Internet et les opérateurs de télécommunications à tout mettre en œuvre pour augmenter en conséquence la capacité des réseaux. Au cours de ces 20 dernières années, la fibre optique a surtout été appliquée aux réseaux de raccordement, jusqu'aux répartiteurs d'entrée locaux. Dans les années à venir, l'objectif sera de rapprocher plus encore la fibre des utilisateurs finaux, afin de disposer de la bande passante voulue. Entre 2010 et 2020, la consommation parallèle de services (TVHD, radio, vidéoconférences, sécurité, etc.) sur le réseau pourrait bien nécessiter des débits descendants de 50 Mbit/s et montants de 10 Mbit/s. Ces débits se situent bien au-delà de la valeur de 256 kbit/s que l'OCDE utilise actuellement pour définir le haut débit, mais ils sont requis si l'on veut que les utilisateurs finaux puissent accéder à une gamme complète de services parallèles et que la concurrence puisse avoir lieu entre les fournisseurs de ces services sur le réseau.

Le présent document évalue les différentes technologies (sans fil, hybrides et tout fibre) de déploiement de réseaux du dernier kilomètre capables d'assurer des débits de 50 Mbit/s. Il est clair à présent que la technologie sans fil, bien qu'elle soit appelée à jouer un rôle très important, ne sera pas la technologie choisie en priorité pour connecter les habitations et les entreprises aux réseaux haut débit. Les réseaux filaires ont en effet l'avantage, tant en termes de performance qu'en termes d'investissement. La technologie sans fil sera appliquée au dernier mètre, mais pas au dernier kilomètre.

Les réseaux hybrides fibre et cuivre (également appelés réseaux de fibre jusqu'au trottoir ou de fibre jusqu'au nœud) utilisent les réseaux de cuivre existants (de câble, de téléphone ou d'électricité) pour parcourir la distance entre les utilisateurs finaux et les nœuds des fibres, situés plus près des utilisateurs finaux que les points d'échange traditionnels. Les débits des connexions DSL existantes dépendent de la distance entre l'abonné et le commutateur. Étant donné que les débits se détériorent rapidement avec la distance, un haut débit, par exemple de 50 Mbits/s, a une portée limitée à 450 mètres, ce qui, dans la plupart des pays, ne permet de desservir qu'un dixième de la population. C'est pourquoi, dans le but de garantir de tels débits à plus de clients, des réseaux de fibre sont déployés jusqu'aux sous-répartiteurs : on parle alors de FTTC (*Fibre To The Curb* : fibre jusqu'au trottoir) ou FTTN (*Fibre To The Node* : fibre jusqu'au nœud). Les réseaux de câble, en cours de modernisation dans un certain nombre de pays de l'OCDE, pourraient se révéler plus attractifs du fait de leur débit maximal plus élevé que celui du DSL, mais cet avantage est souvent contrebalancé par la nature partagée de la technologie : plus il y a d'utilisateurs simultanément connectés au réseau, moins il y a de bande passante disponible pour chacun d'eux. Bien que la technologie de courant porteur en ligne (CPL) soit souvent citée comme une technologie alternative, concurrente du câble et du DSL, elle est aujourd'hui encore peu mise en œuvre à grande échelle et il est difficile de prévoir son potentiel réel sur le marché.

Dans le cas de la FTTC, les répartiteurs d'entrée deviennent inutiles et plusieurs opérateurs historiques ont indiqué qu'ils les démantèleraient à l'issue du déploiement des réseaux fibre. Cependant, à l'heure actuelle, dans la plupart des pays de l'OCDE ayant dégroupé la boucle locale, le dégroupage a lieu

au niveau des répartiteurs d'entrée. L'une des questions importantes est donc de déterminer la meilleure stratégie pour les nouveaux entrants dépendant du dégroupage. Le dégroupage de la sous-boucle en concurrence avec un opérateur historique ne semble pas une option viable à grande échelle. Les opérateurs concurrents de l'opérateur historique doivent donc choisir entre aller de l'avant et investir dans des réseaux tout en fibre, ou se satisfaire du rôle de fournisseur de services et utiliser le réseau de l'opérateur historique (ou un réseau concurrent disponible) par le biais de la fourniture en gros d'accès haut débit.

Du fait de sa capacité à prendre en charge la plupart des applications très consommatrices de bande passante, la fibre jusqu'au domicile (FTTH : *Fibre To The Home*) est sans doute la technologie la plus à l'abri du vieillissement. Il existe plusieurs topologies pour les réseaux de fibre et la topologie retenue influe sur les possibilités d'ouverture du réseau à plusieurs fournisseurs d'accès Internet et sur l'efficacité du dégroupage de la boucle locale, qui peut être insuffisante dans certaines configurations de réseau. Les opérateurs historiques pourraient donc reconquérir de la puissance de marché ou, au mieux, si le câble est également disponible, une situation de duopole pourrait émerger.

Lorsqu'on étudie les facteurs commerciaux qui justifient le passage à des réseaux de plus haut débit, il devient évident que, dans le cas du câble et de l'ADSL2+, la plupart des investissements requis pour atteindre des débits supérieurs ont déjà été réalisés. Le VDSL2 et la FTTH, en revanche, sont encore en attente d'investissements substantiels. Les investissements dans le VDSL2 semblent plus faciles à réaliser pour les opérateurs historiques que pour les nouveaux entrants ou les propriétaires de réseaux concurrents moins étendus. Les opérateurs historiques peuvent en effet utiliser les économies réalisées sur les coûts d'exploitation de leur réseau, associées à d'autres économies (par exemple, vente des emplacements des répartiteurs d'entrée), pour financer le déploiement du réseau. En ce qui concerne les nouveaux entrants, leur décision de progresser ou non d'un échelon sur l'échelle des investissements pour investir dans de nouveaux réseaux VDSL2 ou FTTH dépend des conditions locales.

Le présent document décrit le modèle financier d'un réseau FTTH dans le but d'estimer les coûts d'un tel réseau et la répartition de ces coûts entre les différents postes. Bien que le modèle utilisé soit fonction d'une situation locale aux Pays-Bas, il permet de conclure que les coûts sont importants et que les coûts mensuels par abonné dépendent très fortement des taux de pénétration. Les coûts substantiels mis en jeu soulèvent des interrogations quant au degré de concurrence qui émergera sur le marché. Le partage des coûts, en particulier les coûts de génie civil et de câblage des bâtiments, pourrait présenter des avantages et réduire les risques d'investissement.

Pour favoriser le déploiement des réseaux, les pouvoirs publics peuvent jouer trois rôles. Le rôle d'incitateur consiste à supprimer les obstacles susceptibles d'entraver les investissements et le déploiement de nouveaux réseaux. Le rôle d'investisseur consiste à effectivement investir dans les nouveaux réseaux. Enfin, le rôle de régulateur se limite à agir en tant que régulateur des télécommunications dans le but de garantir l'existence d'un marché concurrentiel. La nécessité pour les pouvoirs publics d'un pays d'assumer l'un de ces rôles dépend de la situation locale. Une politique bien définie, établie en partenariat avec les acteurs de l'industrie et les autres parties prenantes, et intégrant des objectifs et échéances clairement énoncés, peut permettre d'identifier les éventuels goulots d'étranglement et les domaines à la rentabilité incertaine. Sur la base d'une telle politique, les pouvoirs publics peuvent alors décider d'agir en tant qu'incitateur ou d'intervenir directement.

Les pouvoirs publics, et en particulier les municipalités, peuvent jouer un rôle important dans la facilitation du déploiement de l'infrastructure en fibre. Ce rôle peut consister à fournir ou faciliter les droits de passage, si nécessaire dans le cadre d'un partenariat public-privé de développement de l'infrastructure.

INTRODUCTION

Le présent document propose un aperçu des développements des technologies de communication utilisant la fibre optique et des investissements dans ce domaine. Il dresse une liste générale des facteurs mis en jeu lors du déploiement de réseaux basés sur cette technologie. Il n'a pas pour objectif de comparer les uns aux autres les réseaux de façon normative, ni de déterminer le type de réseau que les pays de l'OCDE devraient sélectionner. Il présente les paramètres à prendre en compte lors du développement d'investissements dans les réseaux, dans le but de faciliter la prise de décisions mieux informées à propos de ces investissements et de la réglementation des futurs réseaux.

De nombreux pays de l'OCDE s'intéressent actuellement à l'avenir des réseaux de télécommunications, à l'heure où apparaissent la convergence et les investissements dans les réseaux de la prochaine génération, appelés NGN (*Next Generation Networks*). Dans ce contexte, l'une des questions fondamentales concerne le rôle que joueront les réseaux de fibre optique. La technologie de la fibre est utilisée pour les dorsales des réseaux de télécommunications depuis la fin des années 70. Les développements de ces dernières années ont consisté à l'appliquer à des tronçons de réseau de plus en plus proches des utilisateurs finaux. Aujourd'hui, il s'agit de la méthode la plus couramment appliquée pour connecter les grandes entreprises aux réseaux de télécommunications et pour relier le « dernier kilomètre » (la sous-boucle locale) des réseaux Internet, téléphoniques ou TV basés sur le câble ou sur le réseau téléphonique public commuté (RTPC) à leurs dorsales. Du cœur jusqu'à la sous-boucle, les réseaux de télécommunications sont aujourd'hui composés de fibre : ils seront appelés « réseaux de fibre » dans le présent document. Ce terme ne se limitera donc pas aux réseaux déployant des fibres jusqu'au « dernier centimètre ».

Le présent document est étroitement lié aux documents suivants du comité PIIC :

- « Les possibilités de développer l'accès à l'Internet dans le monde » (COM/DSTI/DCD(2007)3/FINAL), qui approfondit la question des réseaux longue distance transocéaniques.
- « Droits de passage sur le domaine public pour le déploiement de la fibre jusqu'au domicile » (DSTI/ICCP/CISP(2007)5/FINAL), qui s'intéresse à la question des droits de passage publics.
- « Convergence et réseaux de la prochaine génération » (DSTI/ICCP/CISP(2007)2/FINAL).

EVOLUTION TECHNOLOGIQUE DANS LE DOMAINE DE LA FIBRE OPTIQUE¹

Cette section décrit la technologie à partir de laquelle sont créés les réseaux de fibre. Elle présente un bref aperçu du fonctionnement des fibres optiques et des différentes technologies qui existent. Elle liste également les types de réseaux que l'on retrouve des longues distances jusqu'au dernier kilomètre. Enfin, elle met en lumière les problèmes soulevés par la construction d'un réseau de fibre : en effet, que le réseau soit utilisé ou non par le client dont le domicile a été raccordé au réseau ou connecté, la plupart des coûts d'un réseau sont des dépenses d'investissement et la plupart de ces dépenses concernent l'ingénierie physique, par exemple l'ouverture de tranchées et l'installation de canalisations. Les équipements actifs ne représentent qu'un faible pourcentage des dépenses d'investissement. De même, les coûts d'exploitation d'un réseau de fibre ne comptent que pour une faible part des coûts totaux.

Description et fonctionnement d'une fibre optique

Le développement des fibres optiques remonte aux années 70, mais leur première utilisation commerciale à grande échelle date de la fin des années 80 et c'est au cours des années 90 que les réseaux de fibre ont révolutionné le secteur des télécommunications. De nouveaux développements se sont alors succédé rapidement et, à la fin 2000, la technologie était largement en avance sur la demande réelle. Pour illustrer la rapidité des progrès réalisés, rappelons que la première connexion commerciale en fibre optique installée en avril 1977 à Long Beach en Californie acheminait 6 mégabits par seconde (Mbits/s) et nécessitait deux fibres, une pour chaque sens de communication. Aujourd'hui, les réseaux n'utilisent qu'une seule fibre et atteignent des débits de 3.2 térabits par seconde (Tbit/s), soit un million de fois plus qu'au début. Après une accalmie de quelques années au début du siècle, les développements ont repris en 2006 et le marché est optimiste quant aux perspectives de croissance des communications optiques.

C'est la lumière qui permet à une fibre optique de transmettre des données d'un point à un autre. Une fibre optique est composée d'une source lumineuse (laser ou DEL), d'une fibre de verre qui sert de milieu de transmission et d'un détecteur. Le laser émet une lumière pulsée à une fréquence spécifique (appelée couleur ou canal). Cette lumière est détectée à l'autre bout de la fibre par le détecteur et convertie en une pulsation électrique, utilisée par le terminal. Il est possible de communiquer dans les deux sens au moyen d'une même fibre. En général, la présence de lumière indique un 1 et l'absence de lumière correspond à un 0. Ce dispositif peut fonctionner à des débits impressionnants. Les lasers commercialisés aujourd'hui atteignent des débits pouvant aller jusqu'à 10 gigabits par seconde (Gbit/s), voire 40 Gbit/s avec la technologie la plus récente, et certaines recherches actuelles dans les réseaux commerciaux ont prouvé qu'il était possible d'atteindre 106 Gbit/s avec une seule couleur². Des débits plus élevés sont théoriquement possibles, mais des problèmes techniques se posent alors au niveau de la conversion de la lumière en pulsations électriques par le détecteur. Outre l'augmentation du débit sur une même couleur, il est également possible de combiner plusieurs couleurs sur une même fibre grâce au multiplexage en longueur d'onde ou WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)³. A l'heure actuelle, certains systèmes commercialisés permettent d'utiliser 160 couleurs sur une même fibre, soit un total de 3.2 Tbit/s sur une même fibre⁴. En laboratoire, des débits de 25 Tbit/s ont été atteints.

Les fibres optiques sont composées de plusieurs couches. En partant du centre et en remontant jusqu'à la surface d'une fibre, on trouve tout d'abord un cœur de verre à l'intérieur duquel circule la lumière, puis une gaine de verre autour du cœur, puis enfin un revêtement en plastique et/ou en Kevlar. En fonction de l'utilisation prévue, des couches de protection supplémentaires peuvent être ajoutées autour de la fibre⁵. Plusieurs fibres peuvent ensuite être associées pour former un câble. Un câble standard peut ainsi contenir jusqu'à 912 fibres. Les câbles sont souterrains, *i.e.* enterrés dans des canalisations, ou aériens, *i.e.* suspendus sur des poteaux. Lorsque les opérateurs de télécommunications équipent un parcours de

câbles en fibre optique, ils installent des gaines vides en surnombre en vue d'une utilisation future. Un parcours peut donc être équipé de 12 à 30 gaines dont seulement 2 à 6 seront immédiatement remplies de câbles. Il existe également des câbles qui combinent paires torsadées en cuivre, câble coaxial, CAT5/6 et fibres. Ces câbles sont utilisés pour connecter les utilisateurs finaux⁶.

Avantages de la fibre par rapport aux autres supports physiques

Plusieurs caractéristiques rendent les réseaux de fibre plus avantageux :

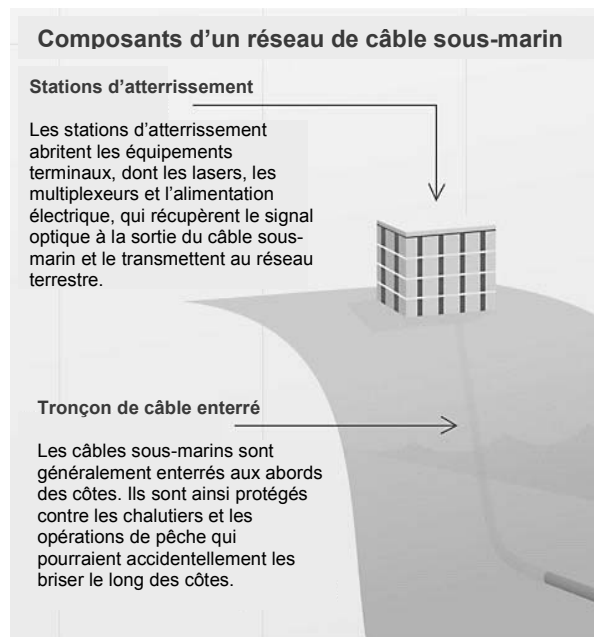
- La bande passante des réseaux de fibre est quasiment illimitée. Elle est plus grande que sur les réseaux par satellite et le temps de latence/de propagation en boucle sur les réseaux fibre est inférieur⁷.
- L'atténuation et la dispersion plus faibles du signal signifient que le nombre de répéteurs ou de régénérateurs de signal nécessaires est minime voire nul.
- Les câbles de fibre ne sont pas soumis à l'influence des champs électromagnétiques, de la corrosion, etc. comme les câbles coaxiaux ou les paires torsadées en cuivre, et leur fonctionnement n'est pas entravé par la pluie, les feuillages, les bâtiments, etc. comme peuvent l'être les communications sans fil.
- L'encombrement et la masse des câbles de fibre sont plus faibles : mille câbles téléphoniques de paires torsadées pèsent 8 000 kg/km, tandis que 912 fibres pèsent 495 kg/km⁸. Les câbles métalliques occupent également un espace plus important qu'une quantité équivalente de fibres.
- Enfin, les coûts au kilomètre d'un câble de fibre sont comparables aux coûts d'un câble de paires torsadées ou coaxial de longueur et de nombre de brins équivalents. En revanche, la capacité des fibres est beaucoup plus élevée.

Réseaux longue distance

La fibre optique a tout d'abord été le mode d'acheminement des communications privilégié sur les longues distances. Les réseaux longue distance sont utilisés pour transporter des données à travers les océans ou les continents, sur des distances pouvant dépasser les 10 000 km⁹. Les développements qui les concernent sont donc considérés comme à la pointe de la technologie. La fibre optique a permis d'obtenir des bandes passantes plus larges et des portées plus étendues sans qu'il soit nécessaire d'amplifier le signal. Des économies substantielles ont donc pu être réalisées et la fibre est devenue l'unique mode d'acheminement des communications sur les longues distances. Les progrès technologiques qui ont suivi ont généralisé les réseaux longue distance en fibre, tant continentaux que sous-marins, à la fin des années 90. En particulier, le développement du multiplexage par répartition en longueur d'onde dense ou DWDM (*Dense Wave Division Multiplexing*) a entraîné une augmentation significative de la capacité. Alors que les premiers réseaux étaient limités à une seule couleur et au débit maximal transférable sur cette couleur, les nouveaux réseaux ont pu intégrer plusieurs couleurs sur une seule fibre, d'où la mise à disposition de plusieurs ordres de grandeur de bande passante supplémentaire. La technologie de mise en réseau sur ces anneaux est appelée SONET/SDH. C'est au niveau des liaisons transocéaniques sous-marines que la demande en matière de réseaux longue distance est la plus exigeante. Les réseaux terrestres présentent eux aussi certaines difficultés, mais les rénovations et l'entretien sont des opérations plus simples. Un réseau usuel peut contenir jusqu'à huit fibres. Du fait des risques encourus en mer, des profondeurs immenses (plus de 7 000 m à certains endroits) et des contraintes résultantes appliquées, les fibres doivent être protégées par des câbles métalliques contre les effets de la pression, les requins, les ancres et les

équipements des pêcheurs. La répartition des coûts d'un tel réseau est la suivante : 40 % pour le câble, 30 % pour la pose sous-marine du câble et 20 % pour les répéteurs, qui doivent être installés tous les 75 à 100 km. Le reste des coûts correspond aux équipements installés aux points terminaux, aux coûts de gestion du projet, etc.¹⁰ La capacité d'un réseau n'étant jamais entièrement utilisée dès la mise en service du réseau, il existe donc une différence entre la capacité nominale maximale et la capacité effective. Pour pouvoir utiliser une partie de la capacité inutilisée (fibre noire), de nouveaux investissements sont nécessaires dans des équipements destinés aux points terminaux du réseau¹¹, mais ces coûts sont minimes par rapport aux dépenses d'investissement initiales.

Figure 1. Composants d'un réseau de câble sous-marin



Source : Telegeography © Primetrica.

Les coûts initiaux de tels réseaux sont un sujet de préoccupation pour les investisseurs. A titre d'exemple, le réseau Trans-Pacific Express entre l'Asie et les États-Unis a coûté ISD 500 millions¹² et acheminera un débit maximal de 5.12 Tbit/s pour une capacité initiale de 1.28 Tbit/s à sa mise en service. Il existe donc deux modèles de financement de ces réseaux. Le modèle traditionnel utilisé au cours de ces dernières décennies repose sur la formation d'un consortium d'opérateurs de télécommunications historiques (nationaux), comme pour le réseau Trans-Pacific Express. Certains des câbles font l'objet d'une concurrence limitée et les droits de passage sont partagés entre les membres du consortium. De ce fait, les opérateurs historiques de certains pays en ont profité pour abuser de leur position et facturer d'importants frais de location des câbles sous-marins. Sur d'autres parcours sous-marins, les câbles ont été installés de façon concurrentielle et, dans certains cas, avec de nouvelles sources de financement par l'intermédiaire de grandes sociétés privées. Les câbles sous-marins sont d'abord financés par les sociétés privées puis les coûts sont remboursés grâce à la vente de capacité aux opérateurs de télécommunications au titre d'opérateur d'opérateurs. La capacité maximale d'une fibre est si élevée que le parcours est souvent en surcapacité. Dans un marché concurrentiel où plusieurs fournisseurs proposent des câbles similaires, la surcapacité peut conduire les concurrents à facturer en fonction des coûts marginaux uniquement, qui sont proches de zéro. Ces investissements considérables, les développements technologiques, ainsi que la surcapacité installée et la forte concurrence, en particulier sur les routes atlantiques, ont ainsi entraîné la

faillite de plusieurs réseaux transocéaniques au cours de ces dernières années¹³ et les fortes consolidations qui ont fait suite. Des impacts économiques similaires ont pu être observés sur les réseaux continentaux/de raccordement et nous renseignent sur l'économie des réseaux de fibre, caractérisés par l'abondance et des coûts marginaux d'expansion faibles, d'où des difficultés sur les marchés très concurrentiels. Ces facteurs seront à prendre en compte lors de la discussion à propos des caractéristiques des investissements et des modèles économiques.

Réseaux de raccordement

Dans le présent document, le terme « réseau de raccordement » est utilisé de façon générale pour désigner l'ensemble des réseaux autres que les réseaux longue distance et les réseaux du dernier kilomètre. On parle également de réseaux métropolitains, réseaux étendus (WAN : *Wide Area Networks*), dorsales, réseaux régionaux, etc. Leurs caractéristiques sont très variables, mais ils ne sont généralement que d'une longueur de 100 à 200 km dans les zones densément peuplées. Ils servent à acheminer le trafic des commutateurs locaux et régionaux jusqu'aux réseaux longue distance, ou à distribuer le trafic dans les zones métropolitaines et régionales entre les points de présence (POP : *Points of Presence*), les fournisseurs d'accès Internet, les autres réseaux, les grands clients entreprises et les points d'échange Internet. À ce titre, ils peuvent devenir les goulots d'étranglement d'un réseau de télécommunications si l'opérateur a vendu une bande passante descendante supérieure à la bande passante de la ligne (on parle de taux de contention ou de surabonnement). Les opérateurs de télécommunications doivent donc planifier l'attribution de la bande passante avec prudence, mais le problème peut être résolu techniquement grâce à l'utilisation de canaux plus rapides (plus de bits par seconde et par couleur), l'utilisation simultanée de plusieurs couleurs ou l'ajout de fibres.

Les réseaux de raccordement sont constitués par jonction de réseaux dans des configurations en anneau. La configuration en anneau garantit que deux nœuds quelconques du réseau sont toujours reliés par au moins deux chemins différents. En associant plusieurs anneaux, on multiplie les chemins redondants entre les points du réseau. Les protocoles de couche liaison de données les plus utilisés actuellement sur les fibres sont ATM, SONET/SDH et Ethernet. Ces protocoles acheminent des paquets IP et les données des réseaux mobiles et voix traditionnels. Le protocole ATM est progressivement abandonné sur de nombreux réseaux et remplacé par le Gigabit Ethernet et le 10 Gigabit Ethernet¹⁴ ou la technologie POS (*Packet over SONET*). Les réseaux SONET/SDH devraient être conservés un certain temps encore, du fait de leur utilisation sur les longues distances. A l'origine, il existait un réseau de raccordement spécifique pour chaque réseau d'accès, mais la situation est en train d'évoluer et on devrait voir apparaître des cœurs de réseau communs, basés sur Ethernet et IP, pour les différents réseaux d'accès¹⁵.

C'est sur les réseaux de raccordement que la croissance du trafic de données a été la plus importante. Le trafic en provenance des utilisateurs finaux est agrégé au niveau des têtes de réseau, telles que les multiplexeurs d'accès DSL, les têtes de réseau du câble et les points de présence des clients entreprises. Il est ensuite acheminé jusqu'aux points de commutation centraux du réseau et, de là, transmis à d'autres réseaux régionaux, nationaux et internationaux. On a peu de certitudes quant au volume de trafic échangé entre réseaux et au volume de trafic qui reste sur le réseau d'un opérateur de télécommunications. L'échange peut avoir lieu directement entre réseaux, mais dans le monde de l'Internet, les échanges de trafic au niveau des points d'échange Internet sont également très courants. Cela étant, on pense souvent à tort que l'ensemble du trafic IP d'un pays est échangé au niveau des points d'échange Internet. En réalité, des échanges de trafic IP bilatéraux entre réseaux ont fréquemment lieu directement sans passer par les points d'échange Internet, afin d'augmenter la fiabilité et de réduire la charge appliquée à la liaison vers le point d'échange Internet. Dans ces cas-là, la liaison vers le point d'échange Internet est utilisée pour interconnecter un plus grand nombre de réseaux plus petits ainsi que comme route de secours supplémentaire, au cas où les interconnexions principales deviendraient inopérantes. Le trafic entre réseaux

croît de 50 % à 100 % chaque année¹⁶. La plupart du trafic reste dans le pays ou la région dont il est originaire¹⁷.

Les commutateurs qui assurent les échanges de trafic sur le réseau d'un fournisseur ou entre les réseaux de plusieurs fournisseurs sont conçus pour ne pas retarder le trafic au moment de sa commutation. Les architectures non bloquantes modernes acheminent les paquets d'un commutateur à un autre en moins d'une milliseconde¹⁸ et peuvent commuter plus d'1 Tbit/s. En avril 2007, au niveau de l'AMS-IX d'Amsterdam, l'un des points d'échange Internet le plus utilisé, le trafic a été de 165 Gbit/s en moyenne et a atteint des pics de 260 Gbit/s. En 2008, il devrait dépasser les 500 Gbit/s, certains clients ayant besoin de plusieurs ports 10 Gbit/s pour échanger des données. C'est cette croissance continue du trafic qui a contribué à normaliser les réseaux 10 Gbit/s et qui incite également à la normalisation des réseaux 100 Gbit/s Ethernet, actuellement en cours.

Dans de nombreux pays de l'OCDE, les réseaux de raccordement ont été conçus en surcapacité à la fin des années 90 et au début du XXI^e siècle. Cette surcapacité est évidente au niveau des axes principaux, notamment le « triangle d'or » reliant Londres, Paris, Francfort et Amsterdam. Quelque 10 à 20 réseaux disposent d'une infrastructure sur ce parcours. En général, les entreprises installent 12 gaines, dont 2 opérationnelles et 10 vides. Sur certains tronçons, des milliers de fibres sont devenues disponibles. Les clients qui ont acheté certaines des fibres de ces réseaux ont souvent utilisé des équipements de multiplexage en longueur d'onde pour augmenter la capacité des lignes et revendre le surplus à leurs propres clients en concurrence directe avec le réseau leur ayant vendu de la connectivité au départ. On a également assisté à ce genre de scénario à plus petite échelle sur les réseaux métropolitains, d'où le fait qu'un grand nombre de villes importantes des pays de l'OCDE disposent de plusieurs réseaux et de gaines inutilisées. Dans les zones moins attractives sur le plan commercial, il n'existe parfois que deux réseaux, voire un seul, doté de connexions en fibres sur le dernier kilomètre à partir d'un certain emplacement, même si, sur ces réseaux aussi, des gaines supplémentaires restent souvent inutilisées.

Réseaux du dernier kilomètre – principes généraux, débit et bande passante

Principes généraux

Les réseaux du dernier kilomètre (sous-boucles locales) sont définis ici comme les segments de réseau compris entre, d'une part, les utilisateurs finaux ou les petites et moyennes entreprises et, d'autre part, les commutateurs et réseaux de raccordement. Plusieurs technologies permettent de relier un utilisateur final à un commutateur et un réseau de raccordement. Elles peuvent être filaires ou sans fil et reposer sur différents types de câbles ou de bandes de fréquences. Il existe des règles générales pour déterminer à quels usages se prête une certaine technologie et quel est le débit en bit/s qu'elle peut acheminer. Ces règles générales sont les suivantes :

- Plus la bande de spectre électromagnétique utilisée est large, plus le nombre de bits acheminés est important. Les débits accessibles aux fréquences les plus élevées sont donc plus rapides car le spectre est alloué en bandes plus larges dans les hautes fréquences.
- Aux fréquences les plus basses, le signal se propage plus loin (pour une puissance donnée) et (dans le cas des connexions sans fil) plus facilement, notamment en présence d'obstacles. Aux fréquences les plus hautes, il est acheminé sur des distances plus courtes et a plus de difficulté à traverser ou contourner les obstacles.
- Plus la puissance est élevée, plus la distance parcourue par le signal est longue.

- Pour envoyer plus de bits par seconde, il faut utiliser une puissance électrique plus importante.
- Plus les distances sont longues, plus la communication est entravée par des phénomènes de distorsion, d'interférence et de bruit.
- Plus il y a de lignes métalliques dans un faisceau, plus les phénomènes de distorsion, d'interférence et de bruit sont importants (ce n'est pas le cas pour les fibres optiques puisque deux fibres d'un câble quelconque n'interfèrent pas l'une avec l'autre).
- Plus il y a de distorsion, d'interférence et de bruit, moins le débit en bits par seconde est grand.
- Plus il y a de puissance, plus il y a de distorsion, d'interférence et de bruit.
- Plus le nombre d'utilisateurs simultanés d'un réseau partagé est grand, moins la bande passante disponible en moyenne est large.

Ces effets ont tendance à être progressifs et cumulatifs plutôt que linéaires. Cela signifie que pour qu'une connexion puisse acheminer plus de bits par seconde, il faut à la fois utiliser plus de bande passante et plus de puissance, générer moins de bruit, disposer d'une détection du signal plus performante, réduire la distance et renforcer le blindage. Pour augmenter le débit d'une connexion, on peut utiliser plus de spectre, réduire le nombre d'utilisateurs simultanés, réduire la distance, augmenter la puissance de la ligne, etc. Il existe une limite absolue au nombre de bits qu'un canal peut transporter ; cette limite dépend de la bande passante mesurée en hertz et du rapport signal/bruit mesuré en décibels.

Débit et bande passante

Le débit d'un réseau est exprimé en mégabits ou gigabits par seconde. Il dépend donc de trois éléments : le nombre de bits, le temps et le rapport entre le nombre de bits et le temps, *i.e.* le débit soutenu. Le débit sur le réseau du dernier kilomètre est le facteur définissant la qualité de l'expérience de l'utilisateur. Ses trois composants sont définis de la façon suivante :

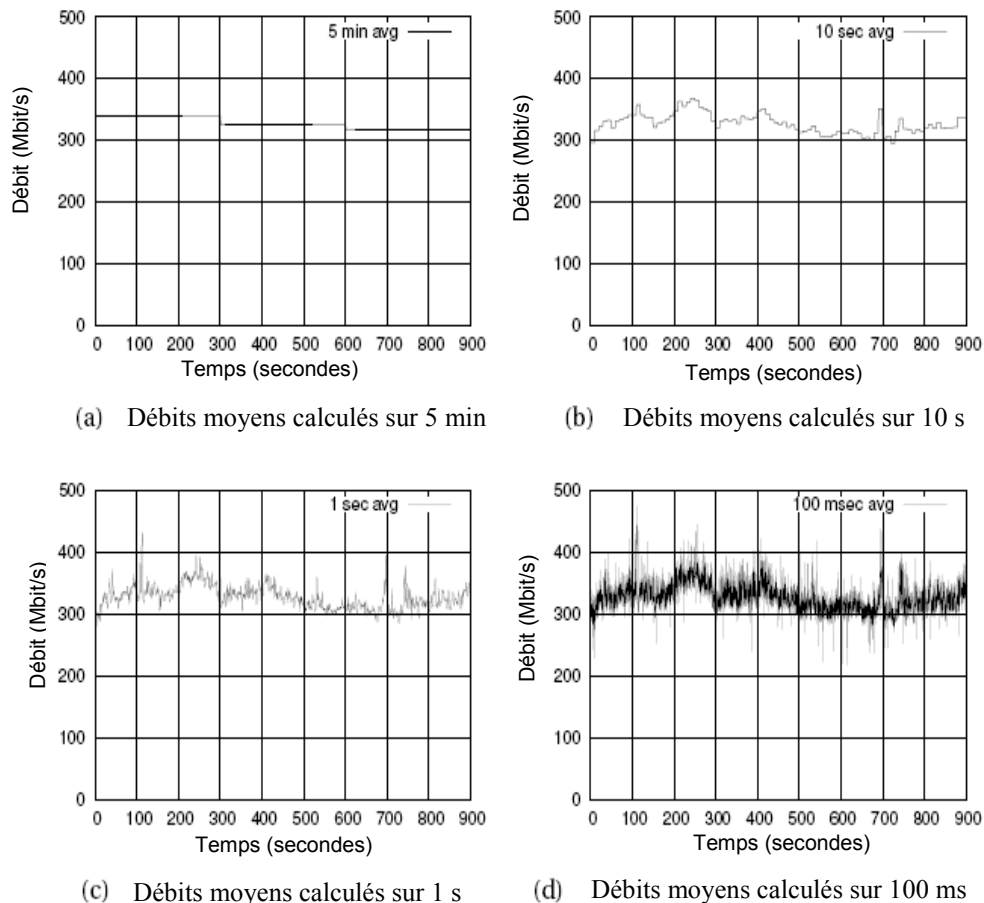
- Temps : le temps est l'un des facteurs les plus importants lorsqu'il s'agit de choisir d'utiliser un certain service. Des études récentes indiquent que les utilisateurs sont prêts à patienter quatre secondes en moyenne pendant le téléchargement d'une page. Si le téléchargement est plus long, le nombre d'utilisateurs en attente chute progressivement¹⁹.
- Temps (2) : lorsque des utilisateurs doivent partager de la bande passante, par exemple parce qu'ils accèdent au même serveur ou partagent le même réseau d'accès, c'est le nombre d'utilisateurs simultanés qui détermine les vitesses de téléchargement moyennes par utilisateur. Plus le réseau est rapide, plus il est probable que le téléchargement requis par un utilisateur sera achevé avant qu'un second utilisateur ne lance son propre téléchargement. Dans ce cas, les deux utilisateurs ne sont pas en concurrence sur la même bande passante et chacun d'eux bénéficie d'une meilleure expérience. Un réseau partagé peut donc être suffisant pour assurer un grand nombre de téléchargements courts sans que l'expérience des utilisateurs n'en soit amoindrie, mais peut ne pas être optimal pour l'acheminement de plusieurs flux à un débit soutenu.
- Bits : le volume de données envoyées et reçues influe très fortement sur la qualité de l'expérience des utilisateurs. C'est pour cette raison qu'on recherche en permanence de

nouveaux systèmes d'encodage des données, meilleurs et plus efficaces. Les développements tels que le mp3, le mpeg2 et le mpeg4 ont permis de réduire la taille des fichiers audio et vidéo et, partant, le délai d'accès à leur contenu. L'impact de ces développements est renforcé par la mise en service de réseaux capables d'acheminer un nombre plus important de mégabits par seconde.

- Débit soutenu : le rapport entre le nombre de mégabits et l'intervalle de temps permet de connaître le débit en Mbit/s qu'une connexion peut soutenir. Cette caractéristique est fondamentale pour les communications en temps réel, par exemple la VoIP, la vidéo, etc. Lors d'une communication en temps réel, il est important que la connexion ne soit pas soumise à des pics qui entraîneraient la mise en file d'attente des paquets et que les délais restent bien inférieurs à 100 millisecondes. Le débit soutenu d'une connexion a une incidence sur le type d'applications utilisables et sur le nombre d'applications qui peuvent être exécutées en parallèle. Comme l'illustre la figure 2, ces débits moyens peuvent varier fortement (30 %) ²⁰ lorsque l'intervalle de temps considéré est de 100 millisecondes.

Figure 2. Débits moyens sur différentes échelles de temps

Plus l'intervalle de temps est court, plus le débit est variable



Source : Van de Meent, 2006.

Le débit maximal qu'une connexion peut soutenir au niveau de la liaison physique dépend des caractéristiques physiques de la liaison. L'architecture du réseau détermine la part de bande passante dont l'utilisateur final dispose effectivement. Dans le cas de certaines technologies (sans fil, câble ou réseaux optiques passifs), les utilisateurs doivent partager le même réseau physique : plus il y a d'utilisateurs simultanément connectés au réseau, moins il y a de bande passante disponible en moyenne pour chacun d'eux. Des problèmes de contention peuvent également se poser sur les réseaux de raccordement, lorsque la bande passante disponible vers le cœur de réseau est inférieure à la somme des bandes passantes que les utilisateurs sont susceptibles de générer individuellement. Par exemple, si un multiplexeur DSLAM local est relié à 300 connexions VDSL2 de 50 Mbit/s chacune, alors, pour éviter tout risque de contention, le réseau de raccordement doit pouvoir acheminer 15 Gbit/s jusqu'au cœur de réseau. La probabilité que l'ensemble des utilisateurs aient simultanément besoin du débit maximal est faible, c'est pourquoi les opérateurs de télécommunications peuvent relier plus de personnes au réseau de raccordement sans réellement entraver la liberté de chaque utilisateur à se servir du réseau. C'est d'autant plus vrai lorsque les personnes utilisent le réseau pour consulter leur messagerie électronique ou naviguer sur le web, puisque ce type d'usage génère un trafic par paquets : pendant qu'un utilisateur télécharge une page Internet ou un e-mail, d'autres utilisateurs lisent du contenu et ne consomment pas de bande passante. Le visionnage de vidéos ou le recours à des services P2P (*Peer-to-Peer* : poste-à-poste) génèrent un trafic continu moins en rafales et plus stable (la transmission en continu d'une vidéo à la demande pèse sur réseau pendant la totalité de la durée du film). Le rapport entre la bande passante maximale requise si tous les utilisateurs utilisaient le réseau au débit maximal et la bande passante réellement disponible est appelé taux de contention. S'il est de 1:1, cela signifie qu'il n'existe aucune contention sur le réseau, s'il est de 1:10, cela signifie que la bande passante disponible est partagée entre 10 connexions²¹. Les opérateurs de télécommunications utilisent des modèles statistiques de calcul du nombre de personnes susceptibles d'utiliser simultanément le réseau pour définir un taux de contention idéal.

La largeur de bande passante dont un utilisateur final a besoin dépend non seulement de l'utilisation actuelle, mais également de l'utilisation prévue à l'avenir. A l'heure actuelle, la littérature scientifique manque de données à propos de la consommation « normale » des réseaux de télécommunications. La seule étude scientifique connue à ce propos est une étude japonaise qui indique qu'environ 10 % des utilisateurs de la fibre optique génèrent un trafic de plus de 2.5 Gbit/jour, mais aucune distinction claire n'est établie entre les gros consommateurs et les usagers normaux²². En outre, il existe peu de différences entre les transmissions montantes et les transmissions descendantes, ce qui est contraire aux hypothèses en vigueur qui supposent que les téléchargements montants sont moins nombreux que les téléchargements descendants.

Une étude d'Arthur D. Little, commandée par Liberty Global (opérateur du câble), a tenté de prévoir la quantité de bande passante dont un foyer moyen aura besoin au cours des années à venir. Selon cette étude, les besoins des foyers en 2011 devraient atteindre des maxima d'environ 50 Mbit/s dans le sens descendant et 8 Mbit/s dans le sens montant, si l'on s'en tient à l'hypothèse qu'un utilisateur final a besoin de moins de débit montant que de débit descendant. La répartition de cette future consommation de bande passante est indiquée au tableau 1²³.

Tableau 1. Prévisions à propos de la consommation de bande passante

Services	Descendant	Montant
World Wide Web / e-mail	0.2-5 Mbit/s	2 Mbit/s
TVHD (par canal / terminal)	8-10 Mbit/s	0.5 Mbit/s
P2P	0.2-5 Mbit/s	2 Mbit/s
VoIP	<1 Mbit/s	<1 Mbit/s
Jeux interactifs	2 Mbit/s	3 Mbit/s
Messagerie instantanée	<1 Mbit/s	<1 Mbit/s
Audio, radio web, podcasts	<0.5 Mbit/s	<0.5 Mbit/s
Vidéoconférences	2 Mbit/s	3 Mbit/s
Sécurité au domicile	2 Mbit/s	0.5 Mbit/s ²⁴
E-gouvernement	<5 Mbit/s	<0.5 Mbit/s
Demande moyenne par foyer	<50 Mbit/s	<8 Mbit/s

Source : Arthur D. Little²⁵

L'année 2011 sera bientôt là et l'expérience de ces dernières années nous apprend que la croissance de la demande de bande passante doit également être considérée pour la période allant de 2011 à 2020. La plupart des réseaux pouvant atteindre des débits d'environ 50 Mbit/s ne seront opérationnels qu'aux alentours de 2011-2015. Mais les calculs ne tiennent pas compte de l'augmentation éventuelle des échanges P2P. Une autre difficulté vient du fait que ces calculs ont été effectués pour un foyer moyen et qu'ils ne tiennent pas compte de la limite à laquelle se situeront le 70^e, le 80^e et le 90^e centile. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le débit à partir duquel le lancement de nouveaux services ne serait pas limité par des contraintes liées à la bande passante. De toute évidence également, l'utilisation de la bande passante dépendra des tarifs et du consentement des consommateurs à payer les tarifs fixés par le marché.

En général, les petites et moyennes entreprises devraient avoir besoin de plus de bande passante que les foyers. Les applications telles que les caméras de sécurité à distance, les sauvegardes à distance, les applications hébergées, etc. nécessitent une connexion symétrique de 100 Mbit/s. D'après les calculs, des connexions capables d'assurer de tels débits devraient également permettre aux PME de réaliser des économies considérables²⁶ car il devient alors possible d'externaliser certains éléments des systèmes informatiques.

Pour les besoins du présent rapport, nous nous intéresserons aux réseaux pouvant acheminer environ 50 Mbit/s de données dans le sens descendant et plus de 10 Mbit/s de données dans le sens montant par utilisateur final. Un tel réseau permet de proposer toute une gamme de services simultanés. Les réseaux ne pouvant assurer que des débits inférieurs limiteront probablement le champ des utilisations des consommateurs et les possibilités de concurrence en matière de services sur le réseau, étant donné la moindre disponibilité de la bande passante. Dans le présent rapport, nous nous limiterons à l'étude des réseaux généralement accessibles aux utilisateurs finaux entre 2010 et 2020 et soumis à des contraintes minimales en matière de bande passante.

Réseaux du dernier kilomètre – sans fil

HSDPA et EV-DO

Les protocoles HSDPA (*High Speed Download Packet Access*) et EV-DO (*Evolution Data Optimized*) sont en train de concurrencer les normes mobiles sans fil 3G (ou 3.5G) capables d'assurer des débits de plus de 1 Mbit/s. Ces normes sont actuellement mises en œuvre par les opérateurs mobiles. Les débits que les nouveaux réseaux peuvent atteindre vont jusqu'à 14 Mbit/s. Cependant, ces versions n'ont pas encore été mises en œuvre. A l'heure actuelle, une antenne HSDPA doit se trouver à moins de 250 m des utilisateurs pour assurer des débits moyens de l'ordre de 1 Mbit/s pour 20 utilisateurs²⁷. Du fait de leurs

capacités limitées, ces protocoles sont malvenus pour proposer le haut débit aux utilisateurs finaux à leur domicile, néanmoins ils devraient jouer un rôle important sur le segment des terminaux portables sans fil mobiles. La fibre est le principal mode de liaison des cellules individuelles au réseau. Néanmoins, il existe également des connexions sans fil point à point, des lignes E1/T1 et des connexions DSL²⁸.

WiFi

La version 802.11g de la norme IEEE 802.11x permet d'atteindre des débits de 54 Mbit/s et la version prochaine 802.11n devrait atteindre des débits supérieurs. Ces débits sont partagés par les utilisateurs des réseaux, donc plus il y a d'utilisateurs simultanés, plus la bande passante dont chacun d'entre deux dispose est réduite. La distance maximale jusqu'à un point d'accès normal est de 30 m, bien que des distances supérieures aient été signalées. Cette distance maximale dépend cependant fortement de conditions telles que la qualité de l'antenne, la puissance utilisée, l'influence des objets à proximité et la configuration, de type omnidirectionnel ou point-à-point. Au niveau du dernier kilomètre, c'est souvent une configuration point-à-point qui est utilisée afin de garantir une performance homogène et d'émettre sur une distance plus importante. Néanmoins, la nature partagée de la connexion et la faible portée du signal limitent l'utilisation de cette technologie sur le dernier kilomètre. Il s'agira en revanche d'une norme très importante à l'intérieur et aux alentours des habitations.

WiMAX/WiBro

La norme IEEE 802.16 (WiMAX) permet d'atteindre des débits allant jusqu'à 40 Mbit/s sur des distances de plus de 10 km. Lorsque plusieurs utilisateurs se servent simultanément du réseau, la bande passante disponible est partagée entre eux. Cette norme est relativement récente et les déploiements déjà en service sont encore limités. Il est prévu que dans les applications commerciales, la bande passante dont dispose un utilisateur final soit inférieure à la limite théorique maximale et que la portée soit elle aussi inférieure à 10 km, ce qui n'est pas sans rappeler le cas de figure des autres technologies sans fil précédemment mentionnées. Étant donné l'ampleur des débits disponibles, il devient nécessaire d'équiper chaque cellule de sa propre fibre ou connexion DSL, d'où un déploiement plus coûteux. Du fait de sa portée et des débits relativement élevés, cette norme serait une option intéressante pour mettre en place des réseaux de transport de données dans les zones rurales. La Corée a développé sa propre version du WiMAX appelée WiBro. Les débits atteints avoisinent les 1 Mbit/s à une vitesse de 60 km/h. Pour une analyse plus approfondie de la technologie du WiMAX, consultez le document DSTI/ICCP/TISP(2005)4/FINAL.

Réseaux sans fil : conclusions

La portée actuelle des réseaux sans fil ne permet pas de proposer une connectivité haut débit comparable à celle des réseaux filaires. On ignore encore dans quelle mesure les futures technologies de réseau sans fil pourront être concurrentielles sur le dernier kilomètre et il est probable que cela variera en fonction de la géographie et de la densité de population. La nature partagée des réseaux sans fil limite également la capacité disponible²⁹. Même si des bandes de fréquences supplémentaires sont libérées pour l'utilisation du haut débit, il est peu probable que l'offre sans fil puisse inquiéter les réseaux filaires existants. Pour que le débit soutenu proposé aux utilisateurs finaux soit concurrentiel, il faudrait que les fibres et les sous-répartiteurs soient installés à une distance inférieure à celle des équipements des réseaux VDSL ou de câble³⁰. Il est donc plus probable que les futurs réseaux sans fil seront établis à partir des réseaux hybrides ou de fibre existants et qu'au lieu d'entrer en concurrence directe, ils seront intégrés à une offre convergente. Associés aux réseaux filaires, les réseaux sans fil feront néanmoins partie intégrante de notre vie quotidienne, car ils nous permettent de communiquer lorsque nous sommes en déplacement à l'intérieur ou à proximité de nos domiciles ou de nos lieux de travail.

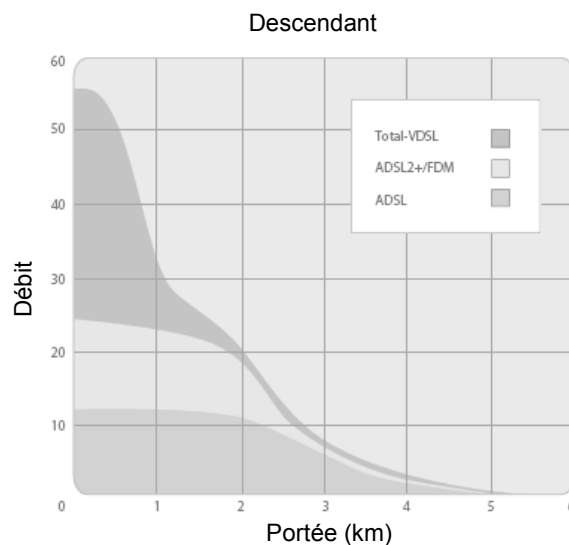
Réseaux du dernier kilomètre – configurations hybrides

Il existe plusieurs formes de réseaux filaires capables d'assurer des débits symétriques supérieurs à 10 Mbit/s. Lorsque ces réseaux sont basés sur des infrastructures existantes de type RTPC, câbles ou lignes électriques, ils nécessitent l'installation de fibres à plus grande proximité des locaux des utilisateurs finaux, de manière à garantir la disponibilité d'une bande passante suffisante. Ils sont appelés réseaux hybrides fibre-coaxial-DSL.

xDSL

Les normes DSL sont définies par l'Union internationale des télécommunications (UIT). Le DSL résulte d'une extension des capacités des réseaux téléphoniques publics commutés traditionnels. À l'origine, le réseau RTPC était optimisé pour l'envoi de signaux dans la bande de fréquences comprise entre 300 et 3 400 Hz et les signaux au-dessus et au-dessous de cette plage étaient filtrés, ce qui limitait le débit du réseau à environ 56 kbit/s. Pour qu'un flux de données plus important puisse circuler sur la ligne, les filtres appliqués aux hautes fréquences ont été supprimés. Sur le site du client et au niveau des points de commutation, les deux signaux sont séparés et envoyés soit vers les équipements DSL, soit vers les équipements RTPC³¹. La norme utilisée actuellement permet d'émettre sur les fréquences allant jusqu'à 30 MHz.

Figure 3. Relation entre les débits de téléchargement descendants et la distance



La norme est mise en œuvre sous plusieurs formes, mais la plupart des versions existantes reposent sur le principe du transfert asymétrique de données entre le commutateur et l'utilisateur final, même si certaines variantes proposent un transfert symétrique. Dans le cas d'un transfert asymétrique, le commutateur, également appelé multiplexeur d'accès DSL ou DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*), peut envoyer plus de bits par seconde dans le sens descendant, c'est-à-dire vers l'utilisateur, que l'utilisateur ne peut en envoyer dans le sens montant vers le commutateur. Dans le cas d'un transfert symétrique, les débits montants et descendants sont les mêmes. On choisit habituellement le mode de transfert asymétrique car les données acheminées vers l'utilisateur ont tendance à être plus nombreuses que les données émises par l'utilisateur (le téléchargement d'un film ne nécessite qu'un seul clic). Le spectre disponible sur une connexion RTPC est donc divisé en deux parties inégales : une grande partie pour les données descendantes et une partie plus faible pour les données montantes. Une connexion ADSL2+ (UIT G.992.5 annexe M) peut atteindre des débits de l'ordre de 24 Mbit/s dans le sens descendant et 3.5 Mbit/s

dans le sens montant. Une connexion VDSL2 (G.993.2) peut monter jusqu'à 100 Mbit/s dans les deux sens descendant et montant. Dans le cas des connexions VDSL2, la bande de fréquences utilisée est plus large : 30 MHz contre 2.2 MHz pour l'ADSL.

Les débits annoncés pour les connexions DSL dépendent cependant de la distance entre le commutateur et le client. La figure 3 illustre la façon dont les débits de téléchargement se détériorent avec la distance³². Dans le cas du VDSL2, le commutateur doit se trouver à environ 450 mètres du client pour que le débit puisse être d'environ 50 Mbit/s dans le sens descendant et 30 Mbit/s dans le sens montant³³. Le RTPC étant un réseau point à point, la bande passante disponible est exclusivement réservée au client concerné et n'a pas à être partagée entre plusieurs utilisateurs. Lorsque le client veut accéder à la télévision sur IP (TVIP) à partir de sa connexion, le débit nécessaire doit être prélevé sur les 50 Mbit/s disponibles sur la ligne. Il est donc peu probable qu'un tel réseau puisse acheminer simultanément plus de trois à cinq flux de télévision haute définition (TVHD) concurrents, représentant entre 10 et 20 Mbit/s chacun.

La longueur moyenne de la boucle locale est le plus souvent bien supérieure au kilomètre. Dans la plupart des pays, moins de 10 % de la population vit suffisamment près des points d'échange pour bénéficier de débits de 50 Mbit/s³⁴. Les opérateurs propriétaires de la boucle locale du RTPC ne peuvent donc proposer de tels débits que s'ils installent de nouveaux équipements à portée de leurs clients. Pour ce faire, des fibres doivent être posées jusqu'aux sous-répartiteurs. Ce type de réseau est souvent appelé FTTC (*Fibre To The Curb* : fibre jusqu'au trottoir) ou FTTN (*Fibre To The Node* : fibre jusqu'au nœud). Aux Pays-Bas, KPN a estimé qu'il devrait aller de 1 350 points d'échange locaux jusqu'à ses 24 000 à 28 000 nœuds pour parvenir à moins de 450 mètres de 8 millions de ses clients. Aux États-Unis, AT&T déploie actuellement son réseau U-Verse basé sur la même technologie mais reposant sur des longueurs de ligne moyennes plus importantes. Une initiative similaire est actuellement entreprise par Deutsche Telekom, Swisscom et Belgacom. Le coût de mise à niveau du réseau est estimé à USD 100 à 500 par client³⁵. Au Japon et en Corée, le VDSL2 est utilisé pour relier les 100 derniers mètres des grands complexes d'appartements aux utilisateurs finaux et assurer des débits symétriques de 100 Mbit/s. Ce dispositif est appelé FTTB (*Fibre To The Building* : fibre jusqu'au bâtiment) ou encore FTTH (*Fibre To The Home* : fibre jusqu'au domicile).

Le déploiement des réseaux VDSL2 suscite de nouvelles interrogations de la part des autorités de régulation à propos du partage et du dégroupage des réseaux. Si la fibre est déployée jusqu'au nœud, les points d'échanges locaux deviennent moins nécessaires. Les sous-répartiteurs fonctionnent en effet comme des points d'échange. Ces questions font l'objet de nombreux débats au sein de l'UE, et en particulier en Allemagne et aux Pays-Bas. Ce dont on est sûr, c'est que la réponse dépend de la situation locale. Pour les opérateurs concurrents qui utilisaient la boucle locale dégroupée, le scénario commercial est souvent négatif³⁶ et ils devront soit progresser d'un échelon sur l'échelle des investissements, soit reculer d'un échelon pour revenir à la fourniture en gros d'accès à large bande. Dans le cas des opérateurs historiques, le scénario est plus clair. Ils peuvent vendre les emplacements de leurs répartiteurs d'entrée, et ainsi financer en partie ou totalement le déploiement du VDSL. De plus, ils sont en position de bénéficier de coûts d'exploitation annuels plus faibles.

Les principaux avantages des réseaux DSL sont les suivants :

- L'utilisation de l'infrastructure existante garantit une mise en œuvre efficace.
- La bande passante est réservée à l'acheminement de données depuis et vers un utilisateur donné. Les applications nécessitant un transfert continu de données ne sont donc pas soumises à des interférences dues à d'autres utilisateurs.

Les inconvénients des réseaux DSL sont les suivants :

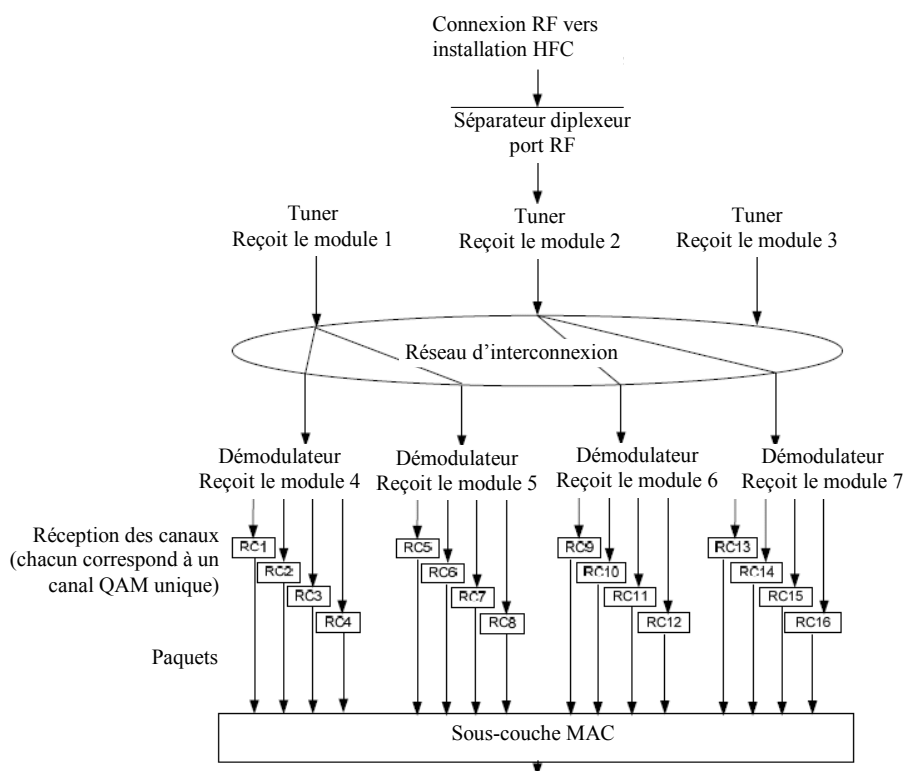
- La performance décroît avec la distance : la performance est trop faible au-delà de 5 kilomètres et pour obtenir des débits de l'ordre de 50 Mbit/s, la portée doit être limitée à environ 450 mètres.
- Il existe peu d'opportunités d'améliorations permettant d'augmenter la bande passante.
- Les contenus transmis en continu (par exemple, TVIP) peuvent consommer la bande passante descendante de la ligne, et donc limiter la capacité des autres services dans le sens descendant. Dans la plupart des configurations, il est impossible d'assurer plus de trois à cinq flux simultanés de TVHD³⁷.

Câble

Les réseaux de câble ont été conçus sur un principe différent puisque l'objectif était d'acheminer des bouquets de chaînes de télévision analogique sur de longues distances et vers un grand nombre de personnes. Les câbles physiques ont donc été pourvus d'un blindage efficace et optimisés pour la transmission d'une large bande de fréquences. De par sa conception, le câble coaxial permet d'exploiter une largeur de spectre plus importante que les autres réseaux de cuivre comme les lignes d'alimentation électrique ou les lignes du réseau RTPC. Il est donc possible de réserver à chaque service une partie différente du spectre. Aux États-Unis, les opérateurs du câble ont habituellement utilisé les fréquences comprises entre 54 et 550 MHz, la transmission des signaux de télévision nécessitant une largeur de bande de 6 MHz par canal. En Europe, c'est le spectre compris entre 65 et 550 MHz qui a été attribuée au câble, la meilleure résolution des systèmes de télévision PAL et SECAM nécessitant des canaux plus grands compris entre 6 et 8 MHz. Le câble coaxial, quant à lui, permet d'utiliser les fréquences allant de 5 MHz à 1 000 MHz. À l'heure actuelle, le spectre inférieur à 850 MHz est réservé à la télévision analogique et numérique.

À l'origine, les réseaux de câble étaient des réseaux de diffusion unidirectionnels (dans le sens descendant) et chaque client recevait le même signal. L'apparition des services de données a obligé les opérateurs à mettre en place une communication bidirectionnelle et personnalisée. Les fréquences de 5 à 42 MHz ont ainsi été réservées aux données montantes et les fréquences d'un ou plusieurs canaux de télévision ont été affectées aux données descendantes, d'où la création d'un système asymétrique. Une largeur de bande de 6 à 8 MHz (c'est-à-dire l'équivalent d'un canal TV) permet d'acheminer entre 40 et 50 Mbit/s de données dans le sens descendant. Cette largeur potentielle doit cependant être partagée entre plusieurs clients. Pour que chaque client ne reçoive que les données qui lui sont destinées, les signaux sont chiffrés. La nouvelle norme Docsis 3.0 qui a été ratifiée en 2006 et devrait devenir opérationnelle dans les prochaines années permet de transmettre 160 Mbit/s (voire plus) dans le sens descendant et 120 Mbit/s dans le sens montant depuis les terminaux des utilisateurs finaux. Cette capacité devra être partagée par ces utilisateurs finaux. Pour cela, au moins 4 canaux sont regroupés pour former un même canal de communication (voir figure 4). Avec les technologies dont on dispose aujourd'hui, il serait possible de transmettre jusqu'à 5 Gbit/s de données (débits descendant et montant cumulés) sur un réseau hybride fibre et câble (HFC) si aucun canal de télévision analogique ou numérique n'était diffusé et si toutes les bandes de fréquences servaient à l'acheminement des données.

Figure 4. Exemple de 4 fois 4 canaux groupés



La plupart des câblo-opérateurs des pays de l'OCDE ont largement investi au cours de ces dernières années pour transformer leurs réseaux en réseaux HFC et pouvoir ainsi proposer à leurs clients une offre de télévision numérique et des services Internet. Ils ont donc dû rapprocher les fibres des utilisateurs finaux et raccourcir la boucle locale. Les signaux transmis par le câble coaxial sont reproduits sur les fibres pour parcourir la distance nécessaire entre les points de distribution centraux, où se trouve le système CMTS (*Cable Modem Termination System*), et les points de distribution locaux, où le signal optique de la fibre est converti en signal électrique. Le système CMTS multiplexe les données des canaux et leur ajoute un chiffrement. En général, un point de distribution local se trouve à 10 à 20 km du point de distribution central, mais la distance qui les sépare peut aller jusqu'à 160 km. Un même point de distribution local dessert le plus souvent entre 500 et 1 000 abonnés³⁸. Il est cependant possible d'utiliser plus de quatre canaux pour envoyer des données. La norme, référencée dans la figure 4, indique qu'il est possible d'utiliser quatre fois quatre canaux groupés³⁹. Dans ce cas, le nombre d'abonnés devant partager 160 Mbit/s serait ramené à 250 en moyenne. Le fonctionnement futur de ce dispositif est encore incertain, car les premiers produits basés sur cette norme ne seront disponibles qu'à la fin 2007. Le coût du nouveau réseau Docsis est inconnu, mais devrait être inférieur à celui des réseaux VDSL2 utilisant la fibre jusqu'au nœud, étant donné que les opérateurs du câble ont déjà investi dans leurs réseaux HFC pour rendre opérationnelles les versions précédentes de Docsis.

Les avantages des réseaux de câble sont les suivants :

- Il est possible d'acheminer jusqu'à 160 Mbit/s ou plus dans le sens descendant en combinant au moins 4 canaux destinés à un groupe de clients.

- Les fréquences réservées à la télévision linéaire (programmes télévisés planifiés) peuvent être distinctes des fréquences destinées à la communication des données. La télévision n'entrave donc pas le fonctionnement des autres services de données.
- L'utilisation de l'infrastructure existante garantit une mise en œuvre efficace.

Les inconvénients des réseaux de câble sont les suivants :

- Le fait que la bande passante soit partagée, aussi bien dans le sens montant que dans le sens descendant, limite la bande passante affectée à chaque utilisateur en fonction du nombre d'autres utilisateurs du réseau. Plus il y a d'utilisateurs simultanés, moins chacun d'entre eux dispose de bande passante⁴⁰.
- La bande passante est plus limitée dans le sens montant que dans le sens descendant. Cette caractéristique pourrait limiter la performance des applications de transmission de données en continu très consommatrices de bande passante dans le sens montant, par exemple les caméras de sécurité.
- Ce type de réseau est optimisé pour les modes de diffusion permettant à un large groupe de personnes de regarder les mêmes chaînes d'une façon « linéaire ». La qualité de la vidéo à la demande et de la TVHD se limitera à un nombre de flux maximal.

*Ligne électrique*⁴¹

Dans certains pays de l'OCDE, les réseaux électriques sont également utilisés en tant que technologie du dernier kilomètre. Le CPL (courant porteur en ligne) est né de l'idée que les réseaux électriques sont probablement le réseau filaire le plus omniprésent dont on dispose. Bien que ces réseaux n'aient jamais été conçus pour transporter des signaux de communication, ils en ont la capacité. Les débits peuvent aller jusqu'à 27 Mbit/s dans le sens descendant et 18 Mbit/s dans le sens montant, ces débits devant être partagés entre plusieurs utilisateurs. Ce système ne laisse aucune place à la TVIP. Il existe cependant plusieurs paramètres à prendre en considération lors de la conception de tels réseaux. Ces paramètres sont les suivants :

- Les câbles et réseaux électriques sont conçus pour distribuer de l'énergie et non des données. Pour cette raison, la technologie CPL ne permet pas de traverser les transformateurs. Cela signifie qu'à chaque fois qu'un transformateur se trouve sur la ligne, les données doivent être répétées de l'autre côté du transformateur. Le nombre de répéteurs nécessaires dépend de la configuration du réseau et peut être important. Les coûts de déploiement d'un réseau risquent donc d'augmenter en conséquence.
- Le CPL peut provoquer des interférences sur plusieurs types de fréquences sans fil car les câbles ne sont pas blindés pour limiter ces interférences et, vu la façon dont fonctionne la technologie, il est difficile d'atténuer le problème.
- On n'a toujours pas déterminé avec précision les échelles de distance que le CPL peut parcourir sur la partie en cuivre du réseau. Il est probable que, comme dans le cas du DSL, la bande passante exploitable décroisse avec la distance, et la distance franchissable devrait être inférieure à celle du DSL. Dans la pratique, les fibres devraient donc être amenées encore plus près des utilisateurs finaux, ce qui induit des coûts de déploiement plus élevés que dans le cas d'un réseau DSL.

Il est encore trop tôt pour évaluer la place que le CPL est appelé à occuper sur le marché. Plusieurs essais ont été réalisés, mais les mises en œuvre à grande échelle sont encore peu nombreuses. L'étude plus approfondie des facteurs associés aux réseaux CPL et des potentialités de succès de cette technologie n'entre pas dans le cadre du présent document.

Réseaux du dernier kilomètre – fibre

Il existe deux grands types de réseaux de fibre applicables au dernier kilomètre, chaque type possédant des caractéristiques et des avantages propres. Ces deux types de réseaux permettent de se passer des réseaux historiques et ne dépendent que de la fibre optique elle-même.

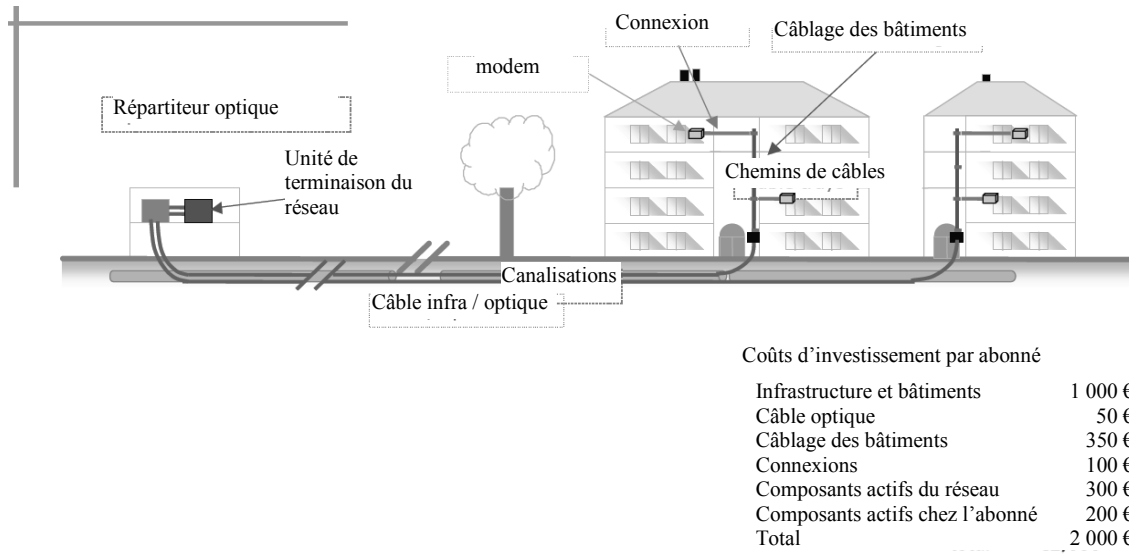
Il est donc possible de concevoir de tels réseaux en repartant sur de bonnes bases, sans avoir à faire de compromis en raison des limitations des technologies plus anciennes. Les limitations des réseaux de fibre ne résultent donc que des limitations de la configuration et de la topologie choisies qui, à leur tour, peuvent être limitées par des considérations d'ordre économique ou des contraintes budgétaires. Les deux principaux types de réseaux, en particulier sur le marché de la fibre jusqu'au domicile, sont les réseaux Ethernet point-à-point et les réseaux optiques passifs (PON: *Passive Optical Networks*). Le coût d'un réseau FTTH oscille entre USD 500 et 2 500 par connexion à une habitation, en fonction des conditions existantes. Dans certains cas, les coûts peuvent être moindres, par exemple, si les fourreaux sont largement disponibles. Ainsi, en ce qui concerne Paris, les coûts estimatifs par foyer se situent entre USD 360 et 440 du fait de l'extension du réseau d'égouts en place, et France Telecom estime les coûts par foyer à moins de USD 440 au stade précommercial dans les grandes villes françaises. La figure 5 indique des estimations des coûts totaux, y compris le câblage, de l'ordre de USD 1 550⁴².

Construction de réseaux (de fibre)

Lorsqu'il est décidé de construire un réseau de fibre, des investissements doivent être réalisés dans les postes suivants :

- Fibres et infrastructures permettant de les poser ou de les suspendre. Les équipements aériens (fibres suspendues sur des poteaux), les tranchées, les emplacements des points de présence et les autres infrastructures physiques représentent souvent de 30 à 80 % des coûts d'investissement et sont conçus pour durer au moins 30 ans, bien qu'ils soient amortis sur 15 ans.
- Composants actifs du réseau, c'est-à-dire l'ensemble des systèmes optiques et électriques permettant au réseau d'émettre et de recevoir des signaux, par exemple les commutateurs, les répéteurs, etc. Ces composants doivent être remplacés tous les 5 à 7 ans.
- Équipements utilisés dans les locaux du client, c'est-à-dire les matériels tels que les modems et, s'ils sont proposés, les décodeurs pour la télévision sur IP ou la télévision numérique.
- La main d'œuvre : gestion, administration du réseau, facturation, personnel de maintenance, personnel d'assistance client, etc.

Figure 5. Configuration d'un réseau de fibre et coûts d'investissement



Source : ARCEP.

La majeure partie des dépenses correspond aux coûts d'investissement dans les travaux d'ingénierie requis pour que le réseau puisse être fonctionnel et opérationnel. La conception et le déploiement du réseau tiennent compte du fait que les clients se connecteront après la construction du réseau, et incluent donc l'installation préalable de trappes d'accès, de fibres supplémentaires, etc. Le coût total du projet n'augmente que de façon minimale lorsque de nouveaux abonnés choisissent de se connecter.

Le montant total des investissements dépend de plusieurs facteurs :

- Superficie de la zone où doit être effectué le déploiement (sauf parcs, lacs, etc.).
- Distribution des logements dans cette zone (nombre de logements par hectare).
- Choix entre tranchées ou équipements aériens et disponibilité de l'infrastructure existante.
- Type de bâtiments : l'équipement d'immeubles de grande hauteur est moins coûteux que celui d'immeubles de moyenne hauteur ou de zones pavillonnaires.
- Coût des droits de passage et d'accès aux bâtiments.
- Charges prélevées par les collectivités locales (par exemple, coûts de resurfacement, accès aux égouts, charges administratives, taxes, etc.).
- Type de terrain, sol, etc. (montagneux ou plat, rocheux ou sablonneux, etc.).
- Travaux spéciaux nécessaires à la traversée de routes, autoroutes, voies navigables, etc.

Ces coûts peuvent sérieusement mettre en danger un modèle économique car il s'agit de fonds irrécupérables relativement fixes pour une zone donnée, quel que soit le nombre de clients choisissant de s'abonner.

Les entreprises du secteur ont donc identifié plusieurs méthodes ingénieuses pour réduire les coûts de l'infrastructure passive :

- Utiliser les infrastructures existantes, par exemple les canalisations de télécommunications, du gaz ou des eaux usées, pour accéder aux locaux des clients.
- Utiliser la surcapacité que d'autres réseaux (gaz, électricité) ont déployée pour traverser les rivières, les villes, etc. en vue d'une utilisation future.
- Inciter les installateurs et les réparateurs à déployer des fibres dans les situations où les technologies traditionnelles ne fonctionnent pas (par exemple à l'aide de rats ou de furets).
- Désassembler les câbles de cuivre pour libérer de la place pour les fibres sans qu'il soit nécessaire de creuser de nouvelles tranchées.
- Certains opérateurs historiques ont également équipé les câbles du RTPC d'une gaine vide supplémentaire pour pouvoir ultérieurement y insérer des fibres.

Les méthodes de déploiement des réseaux passifs dépendent également de facteurs locaux. On dit parfois que l'industrie des télécommunications céderait volontiers certaines des avancées technologiques réalisées dans le domaine de la fibre optique en échange de progrès similaires dans le domaine du génie civil.

Réseaux point à point

Un réseau point à point, également appelé réseau en étoile, est un réseau au sein duquel une fibre (ou un groupe de fibres) spécifique est déployée vers chaque utilisateur final. Cette configuration ressemble à la configuration actuellement utilisée pour les réseaux RTPC et pour connecter les grandes entreprises équipées de fibres aux réseaux de raccordement. Le protocole de couche liaison de données standard actuellement utilisé est Ethernet. Initialement développé pour la mise en réseau à l'intérieur de bâtiments, Ethernet est devenu la nouvelle norme de mise en œuvre de réseaux étendus ou de dorsales, remplaçant ainsi les protocoles ATM et SDH. Comparés aux réseaux optiques passifs, les réseaux point à point présentent les avantages suivants :

- Chaque utilisateur possède une connexion dédiée. Les débits de téléchargement dans le sens montant ou descendant sont donc indépendants de l'existence d'autres abonnés.
- Pour moderniser une connexion individuelle, il suffit de modifier les lasers aux deux extrémités. Si un utilisateur possède une connexion à 100 Mbit/s et souhaite l'améliorer, il est possible d'installer à chaque extrémité des lasers capables d'assurer des débits de 1 Gbit/s ou 10 Gbit/s. Le cas échéant, il est même possible d'inclure des technologies WDM et d'ajouter différents protocoles de couche liaison de données.
- Les commutateurs intermédiaires sont simples et peu coûteux. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des systèmes de chiffrement haut débit au niveau des commutateurs pour séparer le trafic des différents utilisateurs.
- Le protocole Ethernet utilisé est le même protocole de couche liaison de données que celui qui est appliqué sur les réseaux locaux. L'intégration est donc facilitée.

Les réseaux point à point présentent également des inconvénients :

- Les commutateurs centraux doivent être équipés d'un port spécifique pour chaque client. Le coût des points de commutation et des commutateurs est donc plus élevé.

- Les déploiements requièrent plus de fibres que dans le cas d'une topologie en anneau, donc leur coût est plus élevé.
- Aucun système ne permet actuellement d'intégrer un canal de télévision analogique à une fibre déjà utilisée pour d'autres signaux. Certains plans de déploiement prévoient donc une fibre distincte spécifique pour la transmission des signaux de télévision analogique via le même câble⁴³. Le coût par abonné est alors plus important. Cependant, cette situation pourrait évoluer en fonction de la demande du marché.

Réseaux optiques passifs

La différence fondamentale entre les réseaux PON et les réseaux point à point tient au fait qu'au lieu d'utiliser une fibre par nœud terminal, les réseaux PON utilisent la même fibre pour interconnecter plusieurs nœuds terminaux. La topologie choisie est donc en anneau, en bus ou en arborescence. Chaque topologie présente des avantages techniques et financiers propres, mais les différences sont limitées. La principale caractéristique d'un réseau PON est que la fibre du réseau est partagée par plusieurs utilisateurs. Il s'agit donc d'une solution qui économise les fibres. Dans le sens descendant, un laser envoie les données et des diviseurs optiques passifs séparent les données entre les différents utilisateurs. Dans le sens du retour, les données transmises par chaque utilisateur sont intégrées par les diviseurs et acheminées le long d'une même fibre. Il existe désormais également des systèmes qui appliquent le multiplexage par répartition approximative en longueur d'onde ou CWMD (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*), ce qui permet d'attribuer certaines couleurs à des groupes d'utilisateurs finaux : ainsi, un groupe d'utilisateurs finaux communique grâce à un couple de deux couleurs, tandis qu'un autre groupe communique au moyen de deux autres couleurs. Comme dans le cas du câble, l'infrastructure est un support partagé, donc les abonnés doivent se partager la bande passante disponible. Cependant, les réseaux PON sont partagés entre un nombre de personnes inférieur à celui d'un réseau HFC. Ce rapport dit de division est de 32-64 pour les réseaux PON tandis que sur un réseau HFC, le nombre de personnes se partageant la même bande passante peut aller jusqu'à 1 000. Les principaux avantages des réseaux PON sont les suivants :

- Le nombre de fibres nécessaires est minime, donc les coûts d'investissement dans l'implantation du réseau sont réduits (dans l'une des variantes existantes, un diviseur optique situé au point de commutation central permet au réseau PON d'utiliser des fibres point à point ; ce dispositif ne minimise pas le nombre de fibres, mais un seul port optique permet d'atteindre 16 à 64 abonnés).
- Un seul port optique est utilisé au niveau du central, d'où des coûts de matériels de transmission et de maintenance réduits.
- L'encombrement des équipements du central est plus faible que dans le cas des réseaux point à point.
- Il est possible de subdiviser ultérieurement la fibre pour desservir de nouveaux abonnés.
- Il est possible de transmettre un signal sur de longues distances – jusqu'à 60 km – et d'atteindre jusqu'à 64 clients.

Les inconvénients des réseaux PON sont les suivants :

- La bande passante est partagée entre plusieurs utilisateurs, donc la consommation de l'un peut influencer sur celle des autres. Dans cette situation, on parle de rapport de division.
- Il est difficile d'effectuer une mise à niveau individualisée pour un seul utilisateur final. Les augmentations de débits doivent avoir lieu pour tous les utilisateurs en même temps.

- Les commutateurs centraux requièrent plus d'équipements logiques et de systèmes de chiffrement pour intégrer ou séparer les signaux des différents utilisateurs.

Bon nombre des systèmes actuellement opérationnels utilisent trois couleurs. Deux des couleurs servent à l'acheminement dans le sens descendant : l'une pour les données Internet et l'autre pour la télévision diffusée (analogique et numérique). La troisième couleur sert aux transmissions de données Internet dans le sens montant.

À l'heure actuelle, trois normes se font concurrence dans le domaine des réseaux PON :

- APON/BPON (ITU G.983). Il s'agit des premières normes PON, publiées en 1995 et mises à jour en 2001. Jusqu'à il y a peu, BPON était toujours déployé sur les réseaux. La norme BPON permet d'acheminer des débits de 622 Mbit/s dans le sens descendant et 155 ou 622 Mbit/s dans le sens montant pour un rapport de division de 32-64. Il utilise le protocole ATM comme protocole de couche liaison de données.
- GPON (ITU G.984). Cette norme, qui a succédé officiellement aux normes APON/BPON, a été finalisée en 2005 mais son développement se poursuit. Les débits sont de 2.5 Gbit/s dans le sens descendant et le plus souvent 1.25 Gbit/s dans le sens montant, bien qu'il soit également possible d'obtenir des flux montants de 2.5 Gbit/s. Le rapport de division est de 64-128 et le protocole de couche liaison de données peut être ATM ou Ethernet sur GEM. Les distances parcourues peuvent aller jusqu'à 60 km. A titre d'exemple, Verizon utilise la norme GPON sur son réseau FiOS. Des opérateurs historiques européens tels que BT et France Télécom ont également annoncé leur intention d'appliquer cette technologie.
- EPON (IEEE 802.3ah). Cette norme a été finalisée en 2004 par l'IEEE. Elle diffère des deux normes précédentes en ce qu'elle accepte uniquement Ethernet comme protocole de couche liaison de données. Elle assure des débits symétriques de 1.25 Gbit/s et sa portée maximale est de 20 km. Korea Telecom a récemment décidé de mettre en œuvre EPON. Des travaux sont actuellement en cours à l'IEEE pour créer une norme qui succédera à celle-ci et qui permettrait d'atteindre 10 Gbit/s⁴⁴.

Des débats houleux opposent les partisans et les opposants des normes GPON ou EPON. Ces deux versions sont largement utilisées sur les réseaux et activement mises en œuvre.

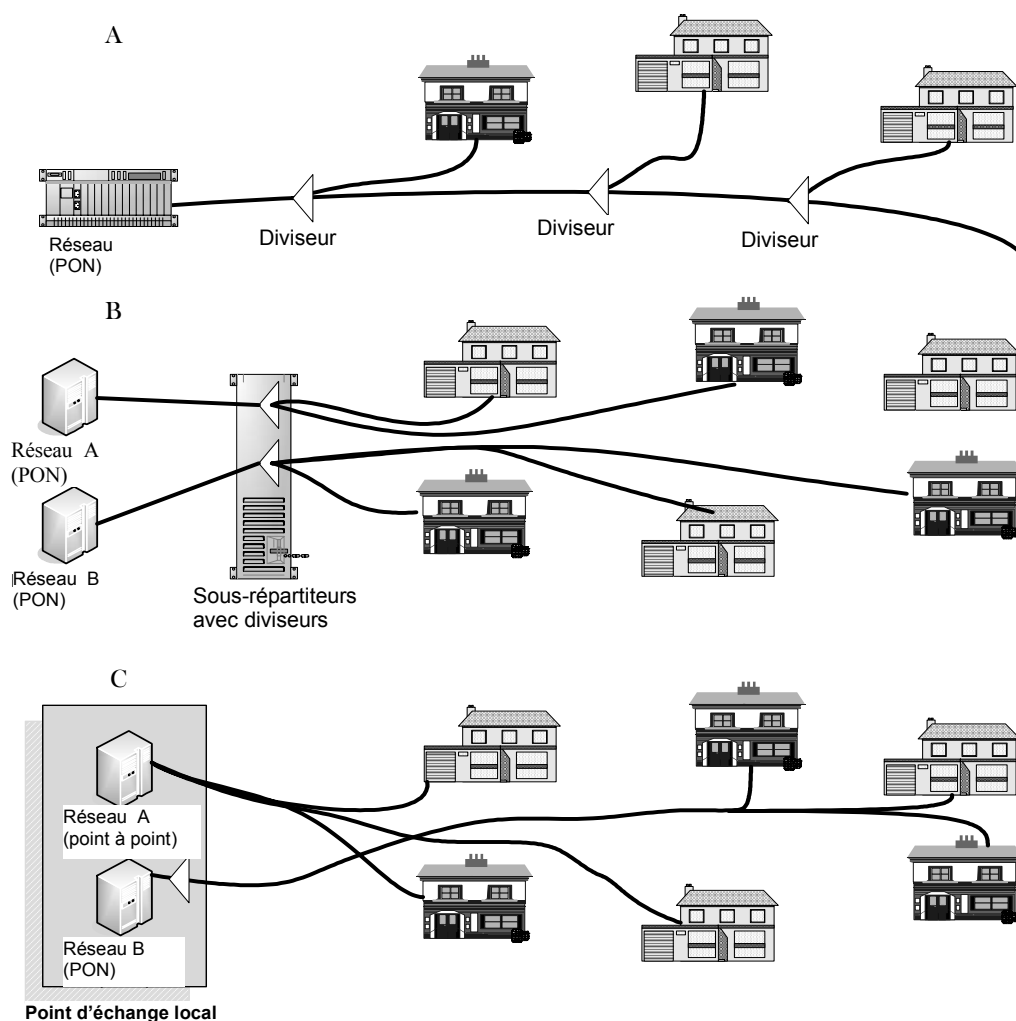
Le mode de déploiement des réseaux PON influe sur la façon dont ils peuvent être ouverts à plusieurs fournisseurs de services. Il existe trois méthodes de base pour construire un réseau PON :

- i) La fibre est divisée à proximité des habitations des utilisateurs. Une seule fibre est utilisée le long d'un groupe d'habitations. Au niveau de chaque habitation, un diviseur spécifique est installé pour détourner le signal depuis ou vers le bâtiment. Cette solution est la plus économe en fibre, mais elle rend l'infrastructure difficile à partager avec d'autres opérateurs au moyen du dégroupage de la boucle locale. Si le réseau est partagé, ce doit être par le biais d'une fourniture en gros d'accès à large bande.
- ii) La fibre est divisée à mi-chemin. Un petit groupe de fibres est posé jusqu'à un sous-répartiteur. Le signal optique est divisé au niveau de ce sous-répartiteur puis transmis au moyen d'une connexion point à point, chaque domicile possédant sa propre fibre. Pour changer de fournisseur d'accès, il suffit de déconnecter la fibre du diviseur de l'ancien fournisseur et de la reconnecter au diviseur du nouveau fournisseur. Cependant, cette opération peut nécessiter un déplacement en camion jusqu'au diviseur, ce qui induit des coûts de transfert.

- iii) Réseau PON avec point à point. Le réseau est construit comme un réseau point à point, mais il peut être utilisé aussi bien comme réseau PON que comme réseau point à point, le diviseur se trouvant au niveau du point d'échange local.

La figure 6 illustre les trois topologies possibles.

Figure 6. Topologies des réseaux de fibre PON

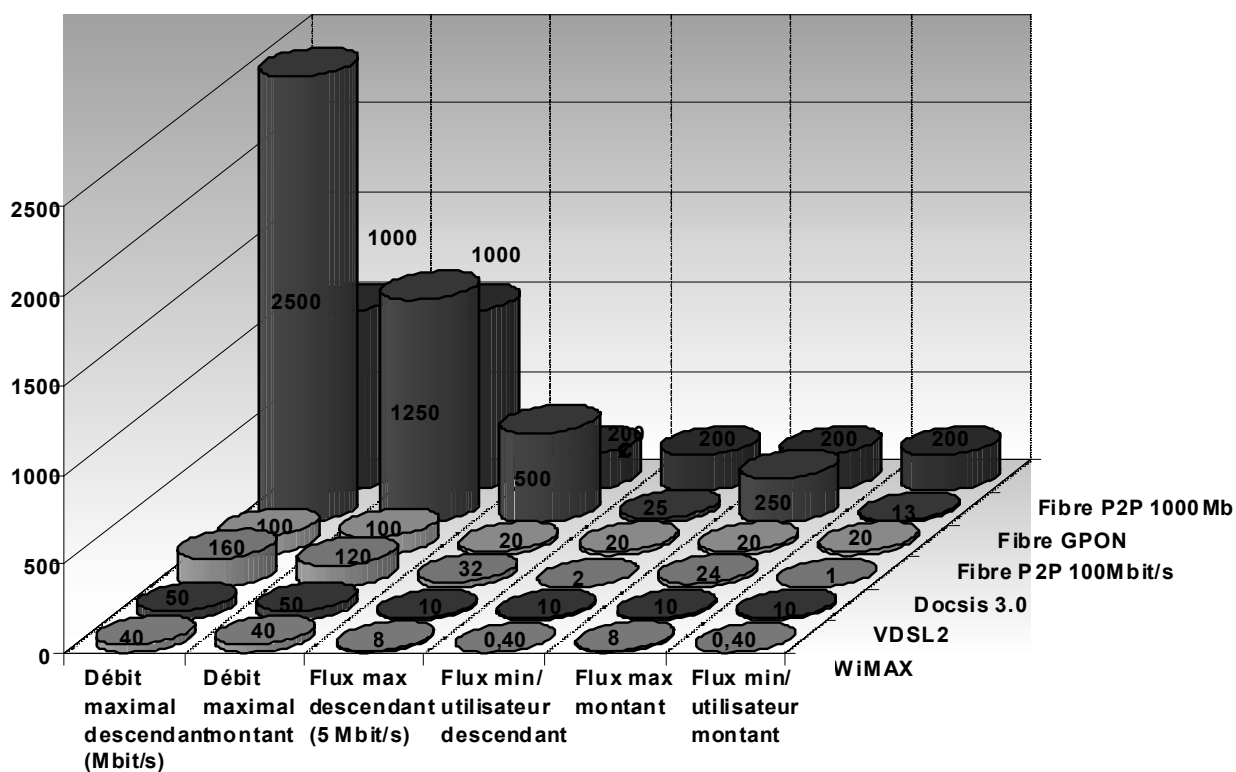


Comparaison entre réseaux

Les débats se poursuivent pour déterminer la meilleure solution de connexion des utilisateurs finaux aux réseaux haut débit. Les solutions possibles présentent des implications réglementaires différentes : certains outils réglementaires existants, en particulier le dégroupage de la boucle locale, peuvent ne pas être efficaces dans certaines configurations de réseau. Cela signifie que les opérateurs historiques peuvent récupérer de la puissance de marché sur les boucles locales en investissant dans une configuration spécifique. En matière de haut débit, les futurs abonnés auront certainement pour exigence la continuité de l'utilisation et de l'expérience sur tous les types de support, pour un coût minimal et sans limitation des capacités des applications futures.

Les réseaux sans fil présentent certains avantages en termes de coût sur les derniers mètres, de mobilité et de flexibilité. Mais ils ne permettent pas l'envoi de gros volumes de données sur de longues distances et la fourniture simultanée d'un service à de nombreux utilisateurs. Les limitations sont en grande partie inhérentes aux technologies sans fil. Les réseaux sans fil devraient donc être principalement utilisés à l'intérieur et aux alentours des locaux des utilisateurs finaux pour couvrir les derniers mètres qui séparent le terminal du réseau physique, ou par les usagers qui n'ont pas besoin d'une importante bande passante ou n'en veulent pas. Les réseaux sans fil serviront également aux applications mobiles. Au niveau de la boucle locale, ils ne peuvent concurrencer les réseaux hybrides ni en termes de bande passante, ni en termes de coût. Cependant, ils constitueront parfois le seul choix viable pour le dernier kilomètre dans certaines situations géographiques où la population est extrêmement dispersée et éloignée, et où il n'y a pas de problème de rareté et de partage des fréquences.

Figure 7. Comparaison des différentes technologies de réseau (voir annexe B)



Les réseaux hybrides associent des technologies existantes à de nouvelles technologies ; ils nécessitent donc des coûts d'investissement inférieurs à ceux des réseaux entièrement conçus en fibre. Les courants porteurs en ligne (BPL) devraient rester une technologie de niche, en raison des problèmes d'interférence et parce que les réseaux de câble et DSL sont très souvent plus compétitifs que la technologie actuelle. La technologie ADSL présente certaines limitations en termes de débit descendant et de débit montant, donc elle ne pourra pas satisfaire les besoins en bande passante de ces 15 prochaines années. Le VDSL2 élargit la bande passante disponible en rapprochant la fibre des utilisateurs finaux. Les abonnés peuvent donc avoir simultanément accès à plusieurs flux haut débit. Les réseaux de câble peuvent assurer des débits de téléchargement montant ou descendant encore plus élevés que ceux du VDSL. Mais le câble est un mode de diffusion qui partage la bande passante entre les utilisateurs tant dans le sens montant que dans le sens descendant. Sa capacité à transmettre en continu plusieurs flux à la demande est

donc limitée par le nombre d'utilisateurs et la consommation de bande passante de chacun d'eux. Au cours des prochaines années, les deux technologies du câble et du VDSL devraient permettre de fournir aux utilisateurs moyens les services qu'ils attendent.

Les réseaux de fibre jusqu'au domicile sont la solution fournissant la bande passante la plus large et les débits soutenus les plus élevés par utilisateur. Cette technologie est toujours en cours de développement. La FTTH est à l'heure actuelle la solution la plus « à l'abri du vieillissement » car elle peut prendre en charge la plupart des nouvelles applications très consommatrices de bande passante. Le choix entre réseau PON et réseau point à point se fera en fonction de diverses préférences et il y a tout lieu de penser que les deux topologies seront utilisées pour atteindre un grand nombre d'utilisateurs ainsi que des profils d'utilisateurs différents. Les autorités de régulation ne doivent pas oublier que le choix de la topologie pourrait avoir une incidence sur les options réglementaires applicables.

Concurrence et régulation

Dans les pays qui ont pour politique de développer la concurrence au niveau des infrastructures sans partage des réseaux, il ne sera peut-être pas nécessaire, compte tenu des différentes topologies choisies pour développer les réseaux fibre, de modifier les cadres de réglementation. L'impact des différents types de réseaux dans ces pays ne sera peut-être qu'indirect, dans la mesure où différentes configurations de réseaux fibre peuvent avoir des incidences sur les débits qui pourront être offerts et sur le coût de la prestation du service. Cela pourrait se répercuter sur la capacité de la fibre à concurrencer d'autres technologies qui pourraient être de proches substituts. Dans les pays qui ont choisi d'autoriser le partage des réseaux et le dégroupage pour favoriser le développement de la concurrence et réduire la puissance de marché significative, la configuration des réseaux a une incidence du point de vue de la concurrence et de la réglementation⁴⁵. Cela tient à ce que, comme indiqué plus haut, les différentes topologies ont des incidences sur la facilité avec laquelle on pourra permettre aux fournisseurs de partager le réseau, par exemple pour encourager la fourniture en gros d'accès haut débit et pour le dégroupage de la boucle locale. Dans les pays qui ont opté pour le partage de réseaux, les nouveaux entrants seront également capables de livrer une concurrence plus efficace si des mesures sont prises pour réduire les coûts d'entrée, par exemple, en fixant les tarifs de gros des fourreaux de l'opérateur historique ou en persuadant les municipalités de mettre en place des fourreaux de grande capacité lorsqu'elles entreprennent des travaux de voirie.

Le dégroupage peut se produire à quatre niveaux différents :

1. Conduits de transmission et installations de colocalisation.
2. Dégroupage de la couche physique : dégroupage de la sous-boucle pour les réseaux DSL ou location de fibre noire pour les réseaux FTTH ou, peut-être, dégroupage de la couche optique (CWDM ou DWDM sur réseau PON).
3. Dégroupage de la couche liaison de données : fibre noire et matériels électroniques de la couche liaison de données à chaque extrémité. Par exemple, réseau local virtuel (VLAN) basé sur Ethernet ou réseaux virtuels basés sur ATM (en Europe, on parle de fourniture en gros d'accès à large bande).
4. Dégroupage de la couche réseau : service de réseau de base fourni. Par exemple, service IP couche 3 sur le câble avec routage utilisant des règles vers plusieurs FAI⁴⁶.

En France, l'opérateur Free a déclaré qu'il proposerait la fibre jusqu'au domicile à ses clients et qu'il ouvrirait également son réseau à ses concurrents. Son modèle économique devrait illustrer l'un des

cas *ii)* ou *iii)* ci-dessus. En Suède, l'entreprise Stokab exploite un réseau de fibre en suivant le deuxième modèle.

Dégroupage de la boucle locale

- La nature partagée des réseaux de câble ou PON rend le dégroupage de la boucle locale plus complexe à mettre en œuvre. Dans le cas du câble, le dégroupage est quasiment impossible car il nécessiterait l'attribution d'une connexion propre à chaque utilisateur au lieu de l'utilisation d'une connexion au réseau partagée. Les réseaux HFC sont rarement de type point à point. Dans le cas des réseaux PON, le dégroupage de la boucle locale n'est possible que s'il a été pris en compte dès le début de la construction du réseau et si les opérateurs concurrents peuvent accéder aux diviseurs situés au niveau des sous-répartiteurs ou des points d'échange locaux.
- Les réseaux DSL et les réseaux en fibre point à point permettent le dégroupage de la boucle locale.

Fourniture en gros d'accès à large bande

Il est possible de mettre en œuvre la fourniture en gros d'accès à large bande sur tous les types de réseaux.

- La mise en œuvre de la fourniture en gros d'accès à large bande est plus complexe sur les infrastructures de réseau partagées (réseaux de câble ou PON) car il est difficile de garantir la même qualité de service à tous les fournisseurs de services tout en optimisant l'utilisation de la bande passante disponible.
- La diffusion de la télévision sur les réseaux de câble ou PON ne peut pas être partagée entre différents opérateurs sans que le nombre de chaînes ne s'en trouve limité ou sans l'utilisation d'une couleur différente sur les réseaux PON. La mise en œuvre de la fourniture en gros d'accès à large bande nécessite donc soit la revente du signal télévisé, soit l'intégration de la TVIP au canal de données, ce qui réduirait la bande passante disponible pour les autres applications de données.
- Sur les connexions DSL, la TVIP entrera en concurrence avec les autres données. Afin de garantir une largeur de bande suffisante à la TVIP, les fournisseurs d'accès Internet devront lui réserver une partie de la bande. Il est donc très probable que le FAI et le fournisseur de TVIP collaborent au lieu de fonctionner de manière indépendante.
- Un réseau de fibre point à point sans canal distinct réservé à la télévision soulèvera les mêmes problèmes que la DSL et la TVIP, même si la plus grande largeur de bande disponible peut permettre la fourniture de la TVIP sans l'implication du fournisseur d'accès Internet.
- Lorsque la télévision par câble est transmise sur une fibre distincte, la solution point à point permet le dégroupage de la boucle locale à la fois sur la ligne de la télévision et sur la ligne de données, et le client a alors le choix du fournisseur et du mode de transmission du signal (sur IP ou par câble).

Perspectives à court terme

Dans un avenir proche, on pourrait également assister à la convergence des réseaux : un utilisateur pourrait alors s'abonner à un fournisseur de services et accéder à plusieurs réseaux. Le fournisseur de services proposera un bouquet de réseaux, par exemple la FTTH associée à des technologies

sans fil GSM, 3G, WiFi et WiMAX, DVB. Les terminaux de l'utilisateur final sélectionneront le réseau disponible et nécessaire. Ce type de développement peut déjà être observé dans les cas suivants :

- Offre de service UMA (*Unlicensed Mobile Access* : accès mobile sans licence) baptisée Unik, proposée par Orange et Vodafone, qui associe le haut débit et des offres mobiles.
- Développement du FON, par exemple tel que mis en œuvre par Neuf Cegetel en France. Le FON est un concept qui permet à des utilisateurs de partager leur connexion WiFi en toute sécurité avec d'autres utilisateurs FON. L'implémentation réalisée par le Neuf permet à tous les abonnés au Neuf de mettre en commun leurs connexions, d'où la création de 1.6 million de points d'accès sans fil en France⁴⁷.
- Mise en œuvre de la radio logicielle, qui permet de changer dynamiquement de bande de spectre ou de protocole. Cette technologie peut (en théorie) faire d'un client ou point d'accès WiFi une antenne ou point d'accès WiMAX ou une picocellule 3G.

Les choix technologiques déterminent les possibilités de prise en charge des différentes applications par les réseaux et également les modèles économiques et les options réglementaires disponibles. Les réseaux sans fil présentent certains avantages, mais ne disposent pas de la bande passante et de la performance dont la plupart des particuliers et des entreprises ont besoin pour accéder aux applications actuelles et futures. Ces réseaux sans fil joueront donc très probablement un rôle complémentaire vis-à-vis des réseaux filaires. Les réseaux HFC basés sur le câble ou le DSL peuvent probablement fournir une bande passante suffisante aux particuliers au cours des années à venir mais, si la croissance du trafic et des applications consommatrices de bande passante se poursuit comme au cours de ces dernières années, aucun n'est à l'abri du vieillissement. De plus, les réseaux HFC risquent souvent de ne pas convenir aux entreprises de plus de dix salariés. Les réseaux de fibre possèdent l'ensemble des caractéristiques nécessaires aux particuliers et aux entreprises : les entreprises préféreront fortement les réseaux point à point tandis que les foyers devraient être aussi intéressés par les réseaux PON que par les réseaux point à point, ces deux topologies ayant chacune leurs avantages. Les développements devraient poursuivre dans ces deux domaines, et offrir de nouvelles opportunités. Concernant la régulation, un réseau point à point permet plus facilement d'instaurer des mesures réglementaires telles que le dégroupage de la boucle locale ou la fourniture en gros d'accès à large bande.

MODÈLES ÉCONOMIQUES ET DÉCISIONS D'INVESTISSEMENT

Il existe plusieurs modèles économiques de mise en œuvre de réseaux hybrides ou tout en fibre. Ces modèles économiques dépendent fortement des décisions d'investissement prises par les entreprises et leurs investisseurs. Cette section examine les facteurs qui influent sur ces décisions d'investissement et sur les modèles économiques, par exemple les coûts d'un réseau tout en fibre, les paramètres d'un modèle économique, les différents types de modèles économiques, les acteurs du marché et les risques encourus.

Opérateurs historiques contre nouveaux entrants

En matière d'investissement dans de nouveaux réseaux, qu'ils soient hybrides ou tout en fibre, les opérateurs historiques ont des motivations différentes de celles des nouveaux entrants. Ces différences influent sur leur perception à propos des choix à faire et des résultats souhaitables. Les pouvoirs publics peuvent eux aussi investir dans les nouveaux réseaux : nous reviendrons sur ce point dans la section suivante.

Les choix d'un opérateur historique dépendent de l'infrastructure dont il dispose déjà et des intérêts de ses actionnaires, de ses employés et de sa direction. Dans la plupart des cas, les opérateurs historiques considèrent qu'investir dans un réseau tout en fibre est pour l'instant trop coûteux par rapport à la modernisation de certaines parties de leur infrastructure existante. De leur côté, les opérateurs du câble considèrent que rénover leur réseau HFC pour qu'il achemine plus de services de données consiste à installer de nouveaux commutateurs CMTS au niveau du cœur et des équipements différents dans les locaux des clients. Cette stratégie devrait leur permettre de passer à Docsis 3.0 à un prix dépendant presque uniquement du coût des équipements. Le modèle économique actuel de ces opérateurs ne leur permet pas de libérer d'importants flux de trésorerie disponible, puisque leur chiffre d'affaires provient principalement d'abonnements mensuels fixes. Ils disposent donc de peu de marge de manœuvre pour attirer des investissements conséquents soit par l'émission d'obligations, soit par l'émission de nouvelles actions. On prévoit donc que ces réseaux passent à Docsis 3.0, mais n'évoluent pas au-delà dans un avenir proche, que ce soit en posant des fibres à plus grande proximité des utilisateurs ou en réduisant le nombre d'abonnés partageant une même connexion. Les nouveaux entrants ont plusieurs raisons d'investir dans de nouveaux réseaux. Il peut s'agir de progresser d'un échelon sur l'échelle des investissements, de créer des avantages pour la région en termes de bien-être, de bénéficier de l'avantage du premier arrivé, etc.

Les opérateurs historiques qui exploitent un réseau RTPC ont le choix entre trois stratégies pour développer leur réseau. Chacune de ces stratégies est privilégiée par certains opérateurs.

La première stratégie consiste à conserver le réseau ADSL2+ actuel et à le déployer dans des zones n'ayant pour l'instant pas accès au haut débit. Cette approche nécessite des investissements limités, mais ne permet également de proposer que des débits de connexion limités aux utilisateurs finaux. Elle pourrait rendre l'opérateur historique plus vulnérable vis-à-vis des nouveaux réseaux sans fil ou basés sur le câble et pourrait lui faire perdre des clients par le biais du dégroupage de la boucle locale. British Telecom a annoncé qu'il privilégiait le passage à l'ADSL2+.

- Certains opérateurs historiques préfèrent faire passer leur réseau au VDSL2, ce qui requiert l'installation de fibres à plus grande proximité des utilisateurs finaux. C'est le cas par exemple de KPN, AT&T, Belgacom et Deutsche Telekom. Cette stratégie a pour avantage

majeur d'augmenter les débits du réseau, ce qui permet de lancer de nouveaux services et de réaliser des économies. Les investissements dans le réseau peuvent être substantiels, mais ils restent néanmoins bien inférieurs à ceux que représenterait l'implantation d'un réseau tout en fibre. Certains opérateurs historiques pensent qu'il est nécessaire de passer par une étape intermédiaire avant de finalement opter pour un réseau tout en fibre. Par ailleurs, leurs investissements dans le VDSL leur permettent de décourager leurs concurrents d'entrer sur le marché avec des réseaux soit HFC, soit tout en fibre⁴⁸. Deux arguments peuvent être opposés à cette stratégie :

- Ces entreprises disposent actuellement de flux de trésorerie importants grâce à leurs services voix. Cependant, le chiffre d'affaires provenant des services voix des lignes fixes est en régression depuis quelques années et devrait continuer à décroître dans les années à venir. La concurrence des fournisseurs de VoIP, des opérateurs du câble et des fournisseurs d'accès Internet fera de la voix un service quelconque, équivalent aux services de messagerie électronique ou Internet, dotés d'un modèle de tarification identique. Cette évolution pourrait influencer très négativement sur les flux de trésorerie des opérateurs historiques. Si c'est le cas, une proportion plus importante du réseau devra être financée par des emprunts, ce qui augmentera le coût du réseau.
- Il existe très peu d'informations permettant de conclure que la construction d'un réseau jusqu'au sous-répartiteur aujourd'hui et jusqu'au domicile demain permettra en fait de réduire ou de maintenir au même niveau les coûts d'un réseau tout en fibre. Les coûts pourraient bien se révéler plus élevés car, d'une part, une méthode de pose efficace d'un réseau DSL n'est peut-être pas la même que celle d'un réseau tout en fibre et, d'autre part, les coûts d'ingénierie sont restés relativement stables et pourraient augmenter à l'avenir en raison de l'augmentation des coûts de main d'œuvre, des droits de passage et de l'inflation.

La modernisation des réseaux avec le VDSL semble être dans le meilleur intérêt des actionnaires actuels et, à ce titre, pourrait être considérée comme une stratégie à court terme. Elle accorde au propriétaire du réseau la liberté d'investir et également de verser des dividendes sans augmenter l'endettement.

- Certains opérateurs historiques sont passés à des réseaux tout en fibre en installant des fibres jusqu'aux bâtiments ou jusqu'aux domiciles. On peut citer à titre d'exemple France Telecom, NTT, Korea Telecom et Verizon. La motivation principale semble être la menace concurrentielle représentée soit par les nouveaux entrants, soit par les opérateurs historiques du câble. Cette stratégie nécessite des investissements considérables. Les coûts par foyer sont estimés entre USD 500 et 2 500, bien que Verizon annonce aujourd'hui une moyenne autour de 850 USD par foyer.

Certains entrants sur le marché déploient actuellement des réseaux de fibre hybrides⁴⁹ ou tout en fibre. Au Japon et en Corée, de nouveaux acteurs tels que Softbank et Hanaro font leur apparition sur le marché de manière agressive et à l'échelon national. Ils bénéficient de la forte densité de logement des deux pays, qui rend leurs projets plus faciles à justifier sur le plan commercial et moins dépendants des coûts d'investissement dans les réseaux passifs. En Europe, on peut citer comme exemples de nouveaux entrants sur ce marché les opérateurs Fastweb en Italie, Bredbandbolaget en Suède, Free en France et Reggefiber aux Pays-Bas. Les raisons de telles initiatives sont les suivantes :

- Déplacement le long de la chaîne de valeur, de la position d'opérateur de la boucle locale dégroupée à celle d'opérateur propriétaire d'installation. Les économies réalisées sur la location des lignes dégroupées peuvent être utilisées pour financer le réseau.
- Certitude de la justification commerciale des réseaux de fibre, et choix conservateur des meilleures zones où déployer la fibre.
- Place laissée sur le marché à de nouveaux entrants potentiels par un opérateur historique qui n'a pas suffisamment rapidement fait le choix du développement du haut débit.
- Conviction que l'avantage du premier arrivé est important et susceptible de décourager les concurrents. Afin de bénéficier de cet avantage du premier arrivé, il est nécessaire de s'assurer de forts taux de pénétration. Dans certaines zones, des projets FTTH ont permis d'attirer plus de 70 % de parts de marché au cours de la première année et ont, en quelque sorte, fait de l'entreprise un opérateur « historique » instantané.

La capacité de nouveaux entrants ou d'opérateurs de télécommunications concurrents utilisant une offre de boucle locale dégroupée à progresser le long de la chaîne de valeur et à construire leur propre réseau dépendra des conditions locales. Cependant, des recherches mettent en évidence de nombreuses situations dans lesquelles il n'existe aucun scénario commercial viable qui permette aux nouveaux entrants actuellement exploitants de la boucle locale dégroupée de passer au dégroupage de la sous-boucle dans le but d'investir à même hauteur que les opérateurs historiques⁵⁰. Les nouveaux entrants sont souvent désavantagés par rapport aux opérateurs historiques car ils n'ont pas accès aux travaux de génie civil existants, par exemple sur les canalisations ou les équipements aériens, et/ou aux droits de passage. De plus, ils ne disposent pas d'économies réalisées sur des coûts d'investissement ou d'exploitation ou la vente de matériels existants pour financer des investissements dans de nouveaux réseaux.

Certains nouveaux entrants particuliers sont les entreprises du secteur de l'eau et de l'énergie. Dans certains pays, par exemple au Danemark et au Canada, ces entreprises sont entrées sur le marché des télécommunications ou ont annoncé qu'elles l'envisageaient. A l'origine de cette décision, se trouve le fait qu'elles considèrent les investissements dans les réseaux passifs comme des investissements dans les réseaux de transport de l'eau, des eaux usées, du gaz ou de l'électricité. Elles disposent souvent d'accords et d'infrastructures leur permettant de réduire les coûts de déploiement d'une infrastructure passive, par exemple en matière de droits de passage, d'accès aux bâtiments, d'installation de canalisations sous les routes ou les voies navigables, d'équipements aériens, etc. Leurs modèles économiques visent l'investissement à long terme avec des retours modérés mais réguliers. Leur position existante leur permet également de minimiser leur profil de risque lorsqu'elles empruntent et donc les intérêts qu'elles doivent rembourser. De plus, elles sont souvent contrôlées par les collectivités locales ou entretiennent des relations étroites avec les régions qu'elles desservent. Elles sont donc considérées comme un outil de développement économique par les collectivités locales.

Risques associés aux modèles économiques

Il existe plusieurs risques qui peuvent infléchir la décision d'un investisseur ou d'un opérateur de télécommunications d'investir dans la construction de réseaux hybrides ou tout en fibre. La technologie elle-même présente un risque pour l'investisseur. Lorsqu'une technologie est nouvelle et n'a pas encore fait ses preuves, il est impossible de prévoir sa performance commerciale auprès d'utilisateurs réels. Les deux inconnues majeures sont la façon dont les abonnés choisiront d'utiliser la technologie et les applications qui feront leur apparition. On ne sait pas non plus si d'autres technologies seront développées et si elles représenteront une menace. Certaines des incertitudes inhérentes aux technologies de réseau ont

été exposées dans le premier chapitre. Au cours de ces dernières années, la technologie des réseaux de fibre est devenue suffisamment mature pour ne plus être un sujet d'inquiétude.

Des surinvestissements dans la boucle locale pourraient entraîner une concurrence des prix aboutissant à une baisse des tarifs en deçà du taux auquel les investisseurs peuvent récupérer leur mise. Les investisseurs ont indiqué qu'ils craignent que ne se produise sur la boucle locale une situation de surinvestissement identique à celle des réseaux transocéaniques et de raccordement, où les concurrents en faillite ont été sortis de la faillite avec des bilans assainis et ont concurrencé les vainqueurs initiaux, initiant ainsi une seconde guerre des prix.

Les risques réglementaires sont une autre forme de risque que les investisseurs prendront en compte. Il y a risque réglementaire lorsque l'autorité de régulation agit sur le marché d'une manière non prévue par les investisseurs. Le changement peut alors réduire la rentabilité du projet de l'organisation et des investisseurs. Il peut être le résultat d'une exigence réglementaire appliquée au réseau, mais aussi d'une exigence réglementaire appliquée et bénéficiant à un concurrent. La probabilité qu'un risque réglementaire devienne un problème dépend du modèle économique choisi, de la vulnérabilité du modèle économique vis-à-vis des changements de réglementation, de la stabilité du cadre juridique et de son interprétation, de la clarté dont fait preuve l'autorité de régulation et de la conduite de l'entreprise (et de ses concurrents) sur le marché. Un modèle économique basé sur un modèle d'accès ouvert ou pouvant le devenir sera moins soumis aux risques réglementaires dus aux exigences en matière de séparation structurelle, de dégroupage ou de fourniture en gros.

Le phénomène de cannibalisation se produit lorsqu'une entreprise propose, pour un prix et/ou une marge bénéficiaire inférieur(e), de nouveaux produits appelés à remplacer en partie ou totalement les produits existants à un prix et/ou une marge bénéficiaire supérieur(e). Ces nouveaux produits peuvent menacer le chiffre d'affaires et la rentabilité actuels. Dans le secteur des télécommunications, ce phénomène s'observe lorsque des clients passent du réseau téléphonique commuté au haut débit parce que le prix fixe du haut débit leur permet de faire des économies. Avec les réseaux hybrides ou tout en fibre, les risques de cannibalisation augmentent. Le réseau passe d'un état de rareté à un état d'abondance. Les opérateurs de télécommunications de l'OCDE dépendant toujours des services voix pour près de 80 %⁵¹ de leur chiffre d'affaires, on comprend que la cannibalisation par des offres VoIP moins chères rendues possibles par le haut débit constitue une menace sérieuse pour les modèles économiques existants.

Autres modèles économiques

Il existe de nombreux modèles économiques applicables au déploiement des réseaux hybrides ou tout en fibre. Le développement d'un modèle économique nécessite de faire des choix à propos du rôle du propriétaire du réseau et de la façon dont les coûts du réseau seront récupérés. Plusieurs modèles économiques intéressants ont été développés dans le but de financer le déploiement des réseaux de fibre. Ces modèles sont des alternatives au modèle économique plus traditionnel. Ils sont listés ci-après :

- Réseaux centrés sur le bien-être.
- Réseaux possédés par les clients.
- Réseaux financés par les services et la publicité.
- Réseaux ouverts.

Les paragraphes ci-après détaillent les raisons justifiant chacun de ces modèles.

Réseaux centrés sur le bien-être

Les réseaux de télécommunications sont à l'origine d'externalités importantes. Il est difficile pour le propriétaire d'un réseau d'intégrer ces externalités à la tarification du réseau. Certains projets en cours tentent d'internaliser certaines des externalités positives au sein du scénario commercial justifiant le déploiement d'un nouveau réseau. Au Canada, par exemple, il a été proposé d'utiliser les réseaux haut débit pour réaliser des gains d'efficacité énergétique⁵². Les bénéfices produits par les gains d'efficacité énergétique prévus pourraient être suffisants pour financer le réseau. Des idées similaires ont été émises par certaines collectivités locales et sociétés immobilières à propos de l'investissement dans de nouveaux réseaux. Le fait pour des personnes âgées de vivre à leur domicile une année de plus ou la possibilité de pouvoir monitorer à distance des patients qui, dans le cas contraire, seraient hospitalisés, pourraient générer des bénéfices suffisant à financer le réseau. La mise en pratique de ces idées est souvent complexe, car les bénéfices et les économies mettent souvent plusieurs années à se matérialiser, alors que l'investissement doit être engagé en amont. Cependant, de telles idées prouvent que les réseaux sont des plateformes à partir desquelles il est possible de développer des applications et services nouveaux qui peuvent offrir des avantages supérieurs aux seuls avantages visibles à l'échelle du modèle économique du réseau.

Réseaux possédés par les clients

Dans le cas des réseaux possédés par les clients, la logique de mise en réseau est inversée. Ce n'est pas l'opérateur du réseau ou le fournisseur d'accès Internet qui contacte le client et lui fournit un réseau et un service. C'est le client qui construit un réseau lui permettant d'atteindre des fournisseurs de services. Pour ce faire, le client prolonge sa connexion au réseau jusqu'à un marché central (point de commutation du central) où se trouvent les fournisseurs de services. Ce marché permet aux clients d'acheter individuellement et/ou collectivement des services. Le développement de tels modèles est favorisé par les forces de marché suivantes :

- Disponibilité de la fibre à faible coût grâce au surinvestissement
- Moins de blocage des clients du fait des coûts de commutation plus faibles
- Possibilités plus nombreuses pour les utilisateurs finaux de choisir la combinaison de services et/ou de fournisseurs de services qui leur convient.
- Les opérateurs de télécommunications ont étagé les prix des connexions locales (par exemple, entre deux secteurs scolaires). L'acheminement d'un plus grand nombre de bits sur une liaison locale coûte souvent plus cher même si le matériel effectivement utilisé est exactement le même et qu'il n'induit aucun coût supplémentaire pour le fournisseur du réseau⁵³.

Reste à savoir si ces raisons s'inscriront dans la durée, attendu que les opérateurs de télécommunications adapteront leurs modèles économiques à la concurrence. Si ce modèle réussit à s'implanter et atteint une masse critique, il sera alors difficile pour un opérateur à la recherche de bénéfices de proposer un réseau concurrentiel, étant donné que les réseaux possédés par les clients allient de forts taux de pénétration à de faibles coûts et l'accès à des fournisseurs de services concurrents.

Réseaux financés par les contenus, les services et la publicité

Les contenus, les services et la publicité sont souvent considérés par les propriétaires de réseaux comme des sources de revenus permettant de financer de nouveaux réseaux. Le financement du réseau par les services a pour avantage de répartir équitablement les coûts du réseau entre les utilisateurs en fonction

de l'usage qu'ils font du réseau, de la même façon que les facturations à la minute ont payé les réseaux de téléphonie fixe et mobile. Les recettes publicitaires ont partiellement financé les réseaux de câble et la croissance de la publicité en ligne et la perspective des publicités ciblées laissent à penser qu'il existe là un moyen de financer le réseau. La publicité, les contenus et les services sont souvent utilisés au sein du même modèle économique : les utilisateurs doivent payer plus pour recevoir des contenus et services sans publicité.

Il n'est pas encore sûr que ce modèle économique soit viable. Les dépenses en matière de contenu et de publicité sont bien moindres que celles qu'engendrent les services et réseaux de télécommunications et il est difficile de tarifier correctement l'ensemble des services et contenus. De plus, le propriétaire du réseau est plus dépendant des fournisseurs de services et contenus que ces derniers ne le sont de lui, ce qui pourrait entraîner la réduction des marges bénéficiaires par les fournisseurs de services et contenus⁵⁴. Des développements technologiques perturbateurs pourraient modifier l'équilibre entre les modes d'utilisation des services et des contenus, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur les finances du propriétaire du réseau, comme l'a eu le lancement de la VoIP. Ces développements risqueraient alors de provoquer la mise en liste noire de certaines applications par peur du phénomène de cannibalisation.

Réseaux ouverts

Plusieurs opérateurs de télécommunications ont annoncé qu'ils ouvriraient leur réseau à la concurrence dès la mise en service⁵⁵. Ce mode de fonctionnement est semblable au système du dégroupage ou de la fourniture en gros. La justification commerciale de ce modèle repose sur la division du chiffre d'affaires des différentes activités de l'opérateur de télécommunications intégré en un empilement de revenus distincts, les différentes couches correspondant au réseau passif, aux composants actifs et aux services et contenus. Le réseau passif (et parfois certains composants actifs) est considéré comme correspondant à un coût irrécupérable bénéficiant principalement d'un fort taux de pénétration permettant d'obtenir des tarifs plus faibles et/ou des marges plus élevées. Le propriétaire du réseau renonce à certains des profits qu'il aurait réalisés en offrant des connexions, services et contenus directement aux utilisateurs. En contrepartie, il s'assure un revenu garanti grâce aux lignes fixes qu'il propose à tous les opérateurs fournissant des services sur le réseau.

Les analyses de certaines sociétés d'investissement⁵⁶ indiquent qu'il pourrait exister un avantage pour les opérateurs se concentrant uniquement sur la fourniture d'accès au réseau et non sur la fourniture de contenus et services. Pour les opérateurs de télécommunications, les marges sur les réseaux sont régulièrement meilleures que sur les contenus et services. Centrer leurs activités autour du réseau leur permettrait d'engager des coûts d'exploitation inférieurs et d'augmenter les flux de trésorerie issus de l'exploitation et les flux de trésorerie disponible.

Paramètres financiers d'un modèle économique

L'annexe 1 présente des résultats obtenus à partir d'un modèle de calcul de coûts néerlandais établi pour des projets FTTH (ces résultats sont résumés dans le tableau 2 ci-après). Ce modèle a été commandé par le Ministère des affaires économiques des Pays-Bas et validé par comparaison avec des projets FTTH néerlandais réels. Il est utilisé par la société de conseil en ingénierie Arcadis <http://ngn.arcadis.nl> pour conseiller ses clients⁵⁷. Il calcule le prix par foyer (connexion) et par mois des offres triservices (télévision, haut débit et téléphonie). Il détermine le prix moyen par foyer connecté en fonction du taux de pénétration (nombre de foyers utilisant effectivement le service exprimé en pourcentage du nombre de foyers accessibles/connectés.) Ce modèle est inclus dans ce document pour donner aux décideurs politiques un aperçu des différents postes de coûts d'un réseau tout en fibre.

Tableau 2. Prix par foyer (EUR/mois)

Taux de pénétration	15 %	25 %	33 %	50 %	75 %	100 %	50 % à 5 % de marge	50 % à 7.5 %
Triservices	22	22	22	22	22	22	22	22
Charges mensuelles réseau passif	67.80	40.68	30.82	20.34	13.56	10.17	15.02	17.66
Charges mensuelles réseau actif	19.44	17.94	17.43	16.91	16.42	16.28	14.83	15.85
TVA 19 %	20.76	15.32	13.35	11.26	9.88	9.21	9.85	10.55
Total	130.00	95.94	83.60	70.50	61.86	57.66	61.70	66.06

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de ce modèle :

- Les investissements dans les infrastructures passives et actives dépendent de la superficie de la zone, de la densité de logement, du type d'habitations, des coûts de surfacage, des coûts des équipements actifs, etc. Pour une densité de logement moyenne égale à celle des Pays-Bas, le modèle indique que le coût d'un réseau passif oscille entre EUR 500 et EUR 1500, mais qu'il pourrait être supérieur.
- Le coût des équipements actifs est d'environ 750 EUR, mais les achats de gros devraient permettre d'obtenir des rabais. Ce coût est, dans une large mesure, indépendant du nombre de clients décidant de s'abonner effectivement au service.
- Le taux de pénétration a une forte incidence sur le coût mensuel par client. Plus le taux de pénétration est élevé, moins le coût mensuel est important.
- Le coût mensuel par utilisateur final dépend également du mode de financement du projet. Plus le réseau a nécessité d'emprunts, plus les investisseurs devront attendre pour récupérer leur investissement. Si le projet est financé à 40 % par des emprunts et que le dividende annuel versé aux actionnaires est de 10 %, il faut 4 ans pour que l'emprunt soit remboursé et que le réseau commence à générer des dividendes. Les investisseurs intéressés par ce type de projet sont soit des investisseurs à long terme comme les fonds de pension, soit les opérateurs de télécommunications qui peuvent utiliser leurs flux de trésorerie existants.
- Les pouvoirs publics peuvent influencer sur le prix mensuel payé par les utilisateurs finaux en réduisant certains des coûts de déploiement d'un réseau, par exemple le montant des charges administratives ou des coûts de resurfacage et, dans certains pays, le taux de TVA applicable (de nombreux pays de l'UE disposent de deux taux de TVA, un taux élevé aux alentours de 19 % et un taux faible autour de 6 %).

Ce modèle se limite à la situation des Pays-Bas, mais on peut néanmoins en conclure qu'il y a peu d'espace sur le marché pour un déploiement par plusieurs opérateurs d'une nouvelle infrastructure uniquement en fibre. Dans l'hypothèse d'une société de monopole détenant 100 % des parts de marché (et sans concurrence de la part des réseaux de fibre hybrides), le prix par foyer calculé avec le modèle est de EUR 57.66/mois (voir tableau 2). Si deux opérateurs déploient un réseau sans partager les coûts, le prix d'abonnement moyen est égal au prix d'abonnement de EUR 70.50/mois correspondant à une part de marché de 50 %. Plus on ajoute de réseaux, plus le taux de pénétration décroît, donc plus le tarif moyen par abonné augmente, à supposer que tous les opérateurs enregistrent des bénéfices. Cette augmentation du prix moyen réduit également la probabilité que les personnes s'abonnent et contribue à faire baisser les taux de pénétration. Les tarifs réels d'une offre triservices sur la FTTH aux Pays-Bas sont actuellement compris entre EUR 45 et 80.

Tableau 3. Coût d'un réseau passif

Coût d'un réseau passif par foyer	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
Offre triservices	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Charges mensuelles réseau passif	6.17	11.87	17.56	23.26	28.95	34.64	40.34	46.03	51.72
Charges mensuelles réseau actif	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91	16.91
TVA 19 %	8.57	9.65	10.73	11.81	12.89	13.97	15.06	16.14	17.22
Total	53.65	48.56	67.2	73.98	80.75	87.52	94.31	101.08	107.85

Étant donné les paramètres du modèle, il est également possible d'effectuer les calculs pour différents coûts d'infrastructure passive. L'investissement dans l'infrastructure active (commutateurs, etc.) est fixé à EUR 767. On évalue alors les charges mensuelles en fonction de l'investissement dans l'infrastructure passive par foyer. Les résultats sont indiqués dans le tableau 3 pour un taux de pénétration de 50 %. (La relation entre le taux de pénétration et le coût mensuel est quasiment linéaire, donc à un taux de pénétration de 100 %, le coût mensuel correspondant au réseau passif serait réduit de moitié : pour un coût moyen par foyer de EUR 2 000, le coût mensuel serait de EUR 23.)

Plusieurs facteurs influent sur le choix d'un modèle économique. Les principaux paramètres sont le taux de pénétration et les coûts d'investissement, qui ont une incidence sur la rentabilité du modèle et le risque encouru par un investisseur. Le taux de pénétration exerce une influence sur la structure des coûts du propriétaire d'un réseau et, partant, agit sur la tarification dans une mesure telle que, selon le marché, il pourrait s'avérer difficile pour une concurrence basée sur les installations d'émerger et de prospérer. L'impact du taux de pénétration sur le tarif mensuel d'un réseau tout en fibre est tel qu'il est peu probable qu'il existe plusieurs réseaux pour garantir l'existence d'un marché concurrentiel. Même en tenant compte des réseaux de câble et des réseaux RTPC existants, il est toujours peu probable qu'il y ait suffisamment de place sur le marché pour quatre infrastructures ou plus accessibles à chaque foyer. Pour les autorités de régulation, ce constat signifie qu'il existe une possibilité permanente de collusion (tacite) sur le marché.

Si l'on examine le marché du point de vue des investisseurs, il devient évident que la situation dynamique et l'économie des investissements risquent d'inciter de nombreux investisseurs à long terme à rester à l'écart de la fibre jusqu'au domicile. Les coûts sont importants, tout comme le risque représenté par les réseaux hybrides concurrents. Les expériences des projets de déploiement de la fibre à grande échelle dans des villes comme Amsterdam, Paris et Verizon (États-Unis), ou au Japon, en Corée et à Singapour permettront aux investisseurs des pays de l'OCDE de savoir si investir dans la FTTH est un risque qui en vaut la peine. Si l'avantage du premier arrivé est suffisamment solide et si la concurrence des réseaux hybrides n'est pas trop forte, les investisseurs à long terme d'autres pays seront tentés d'investir.

RÔLE DES POUVOIRS PUBLICS

En ce qui concerne les réseaux fibre, les pouvoirs publics peuvent jouer trois rôles : incitateur, investisseur ou régulateur. Le rôle d'incitateur consiste à supprimer les barrières susceptibles d'entraver les investissements et le déploiement de nouveaux réseaux. Le rôle d'investisseur consiste à effectivement investir dans les nouveaux réseaux. Le rôle de régulateur se limite à agir en tant que régulateur des télécommunications dans le but de garantir l'existence d'un marché concurrentiel.

Les nouveaux réseaux et les avantages qu'ils peuvent apporter à la société nécessitent des pouvoirs publics qu'ils aient une vision claire du rôle qu'ils doivent jouer pour identifier le juste équilibre entre les demandes des différentes parties prenantes. Le fait de savoir si les pouvoirs publics doivent jouer un rôle actif et l'étendue de ce rôle le cas échéant dépendront de la situation locale et nécessiteront une décision politique. Un cadre équilibré, tel que celui qu'illustre la figure 7 pour les investissements, peut être un outil utile en vue de la mise en œuvre cohérente des politiques gouvernementales et de l'instauration d'un climat de certitude pour les entreprises.

Certains des éléments à prendre en compte dans le cadre d'une politique publique sont les suivants :

- Une estimation de la zone de couverture potentielle des réseaux de fibre en termes de géographie et de démographie et l'échelle de temps considérée.
- Le type d'implication acceptable de la part des pouvoirs publics, et sous quelles conditions.
- La liste des régions peu intéressantes sur le plan économique du point de vue d'un opérateur commercial et la façon dont des déploiements peuvent être encouragés dans ces régions.

En règle générale, les pouvoirs publics doivent supprimer les barrières à l'entrée et à l'investissement ; favoriser les déploiements rentables ; veiller à ce que les nouveaux services puissent se développer ; laisser au marché, dans la plus grande mesure possible, le soin de développer les réseaux et les marchés ; apporter certaines garanties réglementaires ; et faire preuve de vigilance quant à la mise en place d'un marché concurrentiel pour les réseaux et les services.

Incitateur

À tous les niveaux, locaux ou nationaux, les pouvoirs publics pensent que le déploiement de réseaux haut débit fixes et sans fil bénéficiera à leurs économies et au bien-être de leurs concitoyens. Il existe plusieurs leviers sur lesquels les pouvoirs publics peuvent jouer pour, le cas échéant, faciliter le déploiement des réseaux d'une manière neutre qui n'avantage ni les opérateurs historiques, ni les nouveaux entrants.

Afin de réduire les coûts de déploiement et d'exploitation des réseaux, les pouvoirs publics peuvent prendre les mesures suivantes :

- Établir la coopération entre les propriétaires de logements collectifs et les opérateurs de télécommunications. L'objectif serait de faciliter l'accès des opérateurs de télécommunications aux bâtiments et de réduire les efforts que doivent faire les propriétaires des bâtiments pour favoriser la pluralité des réseaux. En France, pour les immeubles neufs, on tente de persuader les constructeurs en délivrant une certification qui indique la présence d'un câble fibre accessible à tous les opérateurs dans le sous-sol de l'immeuble. À Paris, la municipalité a décidé de réduire les prix d'accès à son réseau d'égouts. Les collectivités locales ou les entreprises publiques du secteur de l'eau et de l'énergie sont souvent propriétaires de canalisations passant sous les routes, etc. L'octroi aux opérateurs d'un accès à ces installations pourrait réduire les coûts de construction de nouveaux réseaux.
- Réduire les coûts de resurfacement, les charges administratives, etc. prélevées par les collectivités locales. Aux Pays-Bas, la ville de Deventer a convenu de facturer un coût de resurfacement par mètre inférieur à condition que les propriétaires de réseau garantissent la bonne qualité du resurfacement après le déploiement du réseau.
- En cas de construction de nouveaux lotissements, prévoir le déploiement de canalisations vides à travers l'ensemble du site, de la même façon que pour les autres infrastructures telles que les égouts. Les clients bénéficient ainsi d'un meilleur accès aux réseaux concurrents et l'avantage existant des opérateurs historiques est réduit.
- Lorsque les pouvoirs publics ont prévu l'ouverture d'une tranchée dans une route ou un trottoir pour effectuer des réparations ou installer de nouvelles canalisations pour l'eau ou l'énergie, etc., autoriser les opérateurs de réseau à ajouter leurs propres infrastructures à des coûts minimaux.
- Lorsque de nouveaux réseaux sont construits, assurer une meilleure coordination entre les opérateurs qui déploient simultanément leurs réseaux.
- En général, ne pas subventionner le déploiement d'un réseau dans une région, à moins qu'il existe des raisons évidentes de croire que le secteur privé n'est pas prêt à y investir. Au cours de ces dernières années, certaines collectivités locales ont financé un réseau ADSL-DSLAM (souvent pour l'opérateur historique) sur la boucle locale pour instaurer l'accès haut débit dans une région. Souvent, les subventions supprimaient toute impulsion que d'autres opérateurs auraient pu avoir d'entrer sur le marché de la région. Si les pouvoirs publics subventionnent le déploiement d'un réseau, ils doivent veiller à ce que ce réseau soit accessible dans des conditions identiques aux autres opérateurs et fournisseurs de services.

Les pouvoirs publics peuvent également inciter les utilisateurs finaux à choisir la fibre.

- Les collectivités locales peuvent grouper leurs demandes de nouveaux réseaux avec les demandes des entreprises pour acquérir un réseau possédé par les clients ou signer un accord avec un opérateur de réseau existant. Il est important que les termes de tels accords favorisent la concurrence au niveau des services et n'attribuent pas à un opérateur le monopole sur les acteurs participant à la demande groupée.
- Si les pouvoirs publics sont le premier client d'un nouveau réseau et qu'ils aident à le lancer, ils doivent veiller à ce que ce réseau soit ouvert à d'autres opérateurs et fournisseurs

de services et s'assurer qu'en tant que premier client, ils ne paient pas un prix disproportionné.

Régulateur

Les nouveaux réseaux de fibre vont représenter des enjeux inédits pour les autorités de régulation. Tous les modèles économiques développés par les opérateurs dépendent des coûts de déploiement, de la densité de population, des taux de pénétration et, par conséquent, induisent des avantages importants pour le premier arrivé et privilégient les réseaux existants au niveau local. Plusieurs choix technologiques peuvent avoir une incidence sur la capacité des autorités de régulation à mettre en place une réglementation après la construction des réseaux. Il est donc important que les régulateurs étudient la façon dont les nouvelles technologies influenceront les marchés et la façon d'encourager au mieux la concurrence et d'équilibrer les intérêts des consommateurs avec les intérêts des opérateurs de réseau et des fournisseurs de services. Les questions qui devront être prises en compte sont les suivantes :

- Les réseaux sans fil ne représentent peut-être pas une alternative viable aux réseaux fixes pour la fourniture du haut débit aux particuliers. Ils joueront un rôle important à plus d'un titre en tant que complément et ne seront concurrentiels que pour un éventail limité de services ou pour les petits usagers de bande passante et pourraient faire office de contrainte concurrentielle vis-à-vis des réseaux hybrides ou tout fibre. Les politiques des pouvoirs publics doivent tenir compte de cet état de fait.
- Les offres intégrées de réseaux filaires et sans fil (offres quadriservices) pourraient devenir une force concurrentielle. Les autorités de régulation doivent être conscientes que les propriétaires de réseau chercheront à renforcer leur position sur un marché afin de réduire la concurrence sur un autre marché, par exemple, en refusant aux réseaux sans fil existants et nouveaux l'accès aux (nouveaux) réseaux filaires.
- Lorsqu'il existe plusieurs réseaux (câble, DSL, FTTH), les autorités de régulation doivent identifier les éventuelles dissymétries entre les mesures réglementaires et réglementations en vigueur pour ces réseaux et supprimer ces dissymétries pour créer un marché uniforme. Autrement dit, il faut déterminer les mesures propres à stimuler la concurrence au niveau des installations.
- Les autorités de régulation et les pouvoirs publics doivent autoriser le déploiement de nouveaux réseaux, qu'il existe ou non des réseaux dans la zone concernée et que ces réseaux soient ou non publics (autrement dit, elles ne doivent pas tenter de protéger un investissement existant dans un réseau réalisé par une entreprise privée ou un organisme public/semi-public). La concurrence entre les réseaux bénéficiera aux utilisateurs finaux.
- Les modèles économiques s'appliquant aux nouveaux réseaux sont fonction des coûts de déploiement, de la densité de population, des taux de pénétration et, par conséquent, induisent des avantages importants pour le premier arrivé et privilégient les réseaux existants au niveau local. Cette situation pourrait contribuer à créer des états concurrentiels différents selon les régions. Dans une région, un réseau existant pourrait disposer d'un avantage tel qu'aucun autre nouvel acteur ne pourrait émerger, tandis que dans une autre région, il pourrait exister plusieurs réseaux concurrents qui se feraient concurrence de manière efficace. Dans certaines régions, enfin, un nouvel entrant pourrait rapidement acquérir une large part de marché, laissant peu de place aux autres acteurs et se retrouvant ainsi opérateur « historique » du jour au lendemain. Les autorités de régulation doivent donc adapter les politiques nationales aux réalités locales.

- La mise en application d'une politique réglementaire stable lorsque des opérateurs de réseau déploient de nouvelles infrastructures doit avoir pour objectif le succès des réseaux et non le succès des services fournis sur ces réseaux. Les autorités de régulation doivent veiller à ce que la fourniture de services reste ouverte et concurrentielle et ne doivent pas accorder de monopole sur les services lorsqu'ils garantissent une stabilité réglementaire lors des investissements dans les réseaux.

Certains pouvoirs publics ont mis en place des politiques favorisant le dégroupage de la boucle locale et la fourniture en gros d'accès à large bande. Ces politiques doivent anticiper les spécificités techniques des nouveaux réseaux afin de faciliter le dégroupage de la boucle locale et la fourniture en gros. Certains des facteurs à prendre en compte sont les suivants :

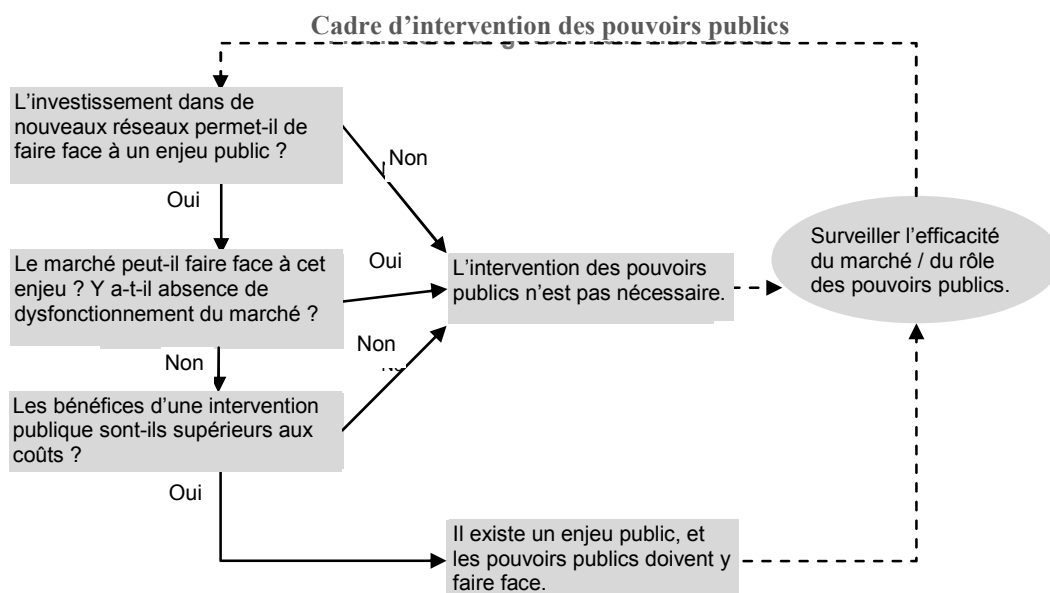
- L'encombrement des sous-répartiteurs des nouveaux réseaux VDSL est substantiel. Les municipalités et les citoyens risquent de protester, pour des raisons esthétiques, contre l'installation de plusieurs sous-répartiteurs au même endroit. Les politiques nationales doivent prendre en compte ces problèmes locaux et permettre l'émergence de solutions au niveau local. Parmi ces solutions figurent : la colocalisation des sous-répartiteurs, l'ordre de construire des sous-répartiteurs de manière moins envahissante (à l'intérieur de bâtiments, sous terre, etc.) ou l'annulation des objections locales et l'exigence pour les collectivités locales d'autoriser les sous-répartiteurs multiples.
- L'un des problèmes susceptible de bloquer les investissements sera la fermeture des répartiteurs d'entrée existants si ces installations sont actuellement utilisées par des opérateurs alternatifs.
- Comme on l'a vu, il existe différentes configurations de dégroupage des réseaux PON. Si le dégroupage est un outil réglementaire, alors le fait de l'intégrer dès le départ à la conception du réseau et le fait de permettre aux investisseurs de prendre leurs propres décisions technologiques doivent être évalués et comparés l'un à l'autre.
- Les politiques doivent permettre au trafic local d'être échangé localement en autorisant les interconnexions locales entre réseaux réglementés et réseaux non réglementés. Lorsque le trafic IP du client d'un FAI à destination du client d'un autre FAI (par exemple, flux P2P ou caméra de sécurité) reste interne à une région, les politiques doivent permettre à ce trafic de rester local, c'est-à-dire que l'échange de trafic entre les deux FAI ne doit pas nécessiter l'acheminement des données sur les réseaux de raccordement du pays. De cette manière, la charge appliquée aux réseaux de raccordement est réduite, la concurrence entre FAI est plus efficace et les utilisateurs finaux bénéficient de coûts moins élevés et d'une meilleure qualité de service. Pour faciliter ce phénomène, il peut être nécessaire soit d'exiger de l'opérateur historique qu'il autorise les interconnexions locales, soit de disposer d'un point d'interconnexion neutre et ouvert, via lequel les clients, fournisseurs de réseaux et fournisseurs de services peuvent se raccorder au réseau.

Investisseur

Dans de nombreux pays de l'OCDE, la question se pose de savoir si les pouvoirs publics (les collectivités locales) doivent faire plus qu'encourager et réguler le déploiement des réseaux de fibre, et doivent donc activement investir dans de nouveaux réseaux. L'étude approfondie des bénéfices et des coûts de telles interventions sur le marché n'entre pas dans le cadre du présent document. En règle générale, l'intervention des pouvoirs publics sur le marché doit être aussi limitée que possible. Si les pouvoirs publics investissent dans de nouveaux réseaux, ils doivent déterminer dans quelle mesure une telle décision

est nécessaire pour remédier au dysfonctionnement du marché et n'investir que dans le but de compenser ce dysfonctionnement. La figure 8 schématise un processus décisionnel général permettant de déterminer si l'intervention publique est justifiée.

Figure 6. Figure 8. Cadre d'intervention des pouvoirs publics



Avant de décider d'investir dans de nouveaux réseaux, les pouvoirs publics doivent se poser trois questions.

1. *Le bien-être public sera-t-il amélioré grâce à l'investissement dans les nouveaux réseaux ?*

La nouvelle génération de réseaux de télécommunications présente des avantages majeurs par rapport à la génération de réseaux actuelle. Les nouveaux réseaux fournissent davantage de bande passante à moindre coût, et permettent ainsi de proposer de nouveaux services et de stimuler l'économie et l'efficacité. Des externalités positives sont également à prévoir. Les nouveaux réseaux peuvent être considérés comme améliorant le bien-être public.

2. *Y a-t-il dysfonctionnement du marché ?*

Les pouvoirs publics doivent clairement déterminer si le marché fournit déjà les réseaux requis et s'il y a dysfonctionnement du marché. Si les réseaux sont déjà disponibles et qu'il y a dysfonctionnement du marché, l'intervention publique doit se limiter à la suppression des barrières à l'entrée de nouveaux acteurs et, si nécessaire, à la régulation des réseaux existants pour compenser le dysfonctionnement. Si les réseaux requis n'existent pas et si aucun investissement du marché n'est envisagé dans un avenir prévisible en raison d'un dysfonctionnement de ce marché, alors les pouvoirs publics peuvent convenir d'investir eux-mêmes.

3. *Les bénéfices d'une intervention publique sont-ils supérieurs aux coûts ?*

Il n'est pas facile de calculer les avantages que procurent de nouveaux réseaux. Ces nouveaux réseaux sont en effet à l'origine de bénéfices tangibles et intangibles. Les bénéfices découlent de la mise à disposition de nouveaux services, de la baisse des coûts de transaction, de

l'augmentation d'efficacité, et contribuent ainsi à la croissance économique et au bien-être public. Les investissements dans de nouveaux réseaux débouchent rarement directement sur la création d'un grand nombre d'emplois, sur l'attraction de nouvelles industries vers une région ou sur la modification en profondeur de la structure économique d'une région. La croissance économique et le bien-être public sont la conséquence d'une combinaison de plusieurs facteurs, la disponibilité d'une infrastructure de télécommunications n'étant que l'un d'entre eux. Tout ce que l'on peut affirmer, c'est que s'il n'existe pas d'infrastructure de télécommunications adéquate, il sera plus difficile pour les régions d'augmenter leur croissance économique et le bien-être public.

Lorsque les pouvoirs publics prennent la décision politique d'intervenir au niveau des réseaux de télécommunications avancés, ils doivent déterminer la mesure dans laquelle ils comptent intervenir. Leur intervention doit favoriser la concurrence et établir un réseau ouvert permettant l'émergence d'un environnement concurrentiel. Avant d'envisager une intervention et des investissements, certains éléments doivent être pris en compte, parmi lesquels :

- Les interventions réglementaires doivent uniquement avoir pour but de compenser les dysfonctionnements du marché.
- Si les pouvoirs publics subventionnent de nouveaux réseaux ou participent à des partenariats publics-privés, ce doit être dans le but d'ouvrir les réseaux et d'encourager la concurrence. Il peut arriver qu'un monopole sur une infrastructure fixe soit inévitable, mais cela ne doit alors pas conduire à un monopole sur les infrastructures sans fil reposant sur l'infrastructure fixe ou sur la fourniture de services assurée grâce à l'infrastructure fixe.
- Le rôle des pouvoirs publics en matière d'investissement dans les infrastructures physiques et d'approvisionnement en services doit être progressif et respecter globalement les étapes suivantes :
 1. Creuser les tranchées et poser les gaines, afin de supprimer une part importante des coûts de déploiement d'un réseau.
 2. Fournir une infrastructure de réseau passive aux fournisseurs de réseau pour qu'ils puissent y connecter leur infrastructure active.
 3. Fournir un réseau actif à partir duquel d'autres acteurs peuvent proposer leurs services.
 4. Fournir des services aux utilisateurs finaux grâce au réseau.
- Si les pouvoirs publics investissent dans des réseaux et des services, ils doivent régulièrement vérifier la nécessité de cet investissement et, de préférence, définir au début de l'investissement un terme fixe à l'issue duquel la décision sera réévaluée.
- Le modèle économique du réseau ne doit pas dépendre de la fourniture de services et les connexions au réseau doivent être fournies indépendamment des services.
- Un réseau ouvert et neutre requiert également un point d'interconnexion ouvert et neutre, où les clients, les fournisseurs de réseau et les fournisseurs de services peuvent se connecter.
- La topologie choisie pour le réseau doit être conçue pour favoriser la concurrence. Un réseau point à point est donc plus souhaitable qu'un réseau PON.

- Les pouvoirs publics doivent marquer une différence aussi minime que possible entre les fournisseurs de services et les utilisateurs du réseau. La différenciation entre utilisateurs et fournisseurs de services doit tenir compte des coûts, des efforts et des niveaux de services, et permettre aux utilisateurs de devenir des fournisseurs de services sans barrière supplémentaire.

CONCLUSIONS

La technologie des réseaux de télécommunications s'est développée rapidement aux cours de ces dernières décennies. Au cœur des réseaux, les liaisons en cuivre ou sans fil ont été remplacées par la fibre optique. Les avancées technologiques réalisées dans le domaine de la fibre et du laser ont permis d'accéder à une bande passante en abondance, tant sur les réseaux dorsaux que sur les réseaux de raccordement, ce qui entraîné une baisse des prix de la bande passante. Les entreprises et les particuliers ont donc pu accéder aux services de leur choix à une échelle globale. Pour que de nouveaux services puissent être fournis sur le réseau, les utilisateurs finaux doivent pouvoir disposer de plus de bande passante. C'est pourquoi les opérateurs de télécommunications ont décidé d'évaluer les différents modes d'acheminement leur permettant de fournir une bande passante plus large aux utilisateurs finaux.

À l'échelle internationale, la croissance de l'utilisation de bande passante est de 50 à 100 % par an. Chaque nouvelle avancée dans le domaine permet de proposer de nouveaux services sur la bande passante disponible. Malheureusement, la consommation de services et de bande passante par les utilisateurs finaux n'est pas suffisamment documentée. Il est donc difficile pour les décideurs politiques de savoir quelle est la quantité de bande passante suffisante et d'effectuer des comparaisons entre les pays. La demande moyenne d'un foyer est estimée à environ 50 Mbit/s dans le sens descendant et 10 à 50 Mbit/s dans le sens montant pour la période allant de 2010 à 2020. Plus la bande passante accessible aux utilisateurs finaux est importante, plus il est facile de développer de nouveaux services et technologies et plus les utilisateurs finaux peuvent acquérir des services auprès de fournisseurs concurrents.

Le développement des réseaux longue distance (*longhaul*) et des réseaux d'interconnexion (*backhaul*) de fibre a révélé que les réseaux de télécommunications pourraient avoir été surdimensionnés dès le départ en termes de capacité, ce qui risque d'induire une concurrence féroce au niveau des coûts marginaux. Les investisseurs sont donc devenus réticents à l'idée d'investir dans de nouveaux réseaux tels que la fibre jusqu'au domicile. La technologie utilisée pour les réseaux longue distance et d'interconnexion migre désormais vers les réseaux locaux, ce qui devrait assurer une capacité suffisante pour l'avenir.

L'évaluation des différentes options technologiques nous apprend que les technologies de réseau sans fil possèdent d'excellentes caractéristiques en termes de mobilité et de flexibilité mais qu'elles ne libèrent pas autant de bande passante que les réseaux filaires. Dans de nombreuses zones urbaines, du fait de leur nature partagée et de leurs propriétés électromagnétiques, les réseaux sans fil ne sont un choix viable ni sur le plan technique, ni sur le plan économique pour la boucle locale. Cependant, les réseaux sans fil joueront un rôle important à l'intérieur et à proximité des habitations et des entreprises.

Les réseaux hybrides fibre et cuivre présentent certains avantages financiers significatifs par rapport aux réseaux tout en fibre. Ils nécessitent moins d'investissements sur la boucle locale puisqu'ils réutilisent l'infrastructure existante. Le courant porteur en ligne (CPL) est considéré comme un « troisième voie » possible pour concurrencer le DSL et le câble mais il est encore trop tôt pour évaluer cette technologie. Les réseaux de câble, respectivement les réseaux DSL, sont déjà déployés dans le monde entier et il est très probable que la technologie Docsis, respectivement la technologie VDSL2, soient les méthodes de modernisation des réseaux retenues par la plupart des opérateurs de télécommunications. Cela étant, ces deux types de réseaux sont limités en termes de bande passante disponible pour les utilisateurs finaux et, si les besoins en bande passante augmentent encore, il n'existe à l'heure actuelle aucune technique claire de mise à niveau de ces technologies.

Les réseaux tout fibre ne présentent aucune difficulté prévisible en termes de disponibilité de la bande passante. Les deux types de réseaux Ethernet PON ou point à point permettent de fournir une large

gamme de services existants et nouveaux et peuvent être mis à niveau si la bande passante devient insuffisante. Le choix de la topologie déterminera la façon dont l'autorité de régulation peut réglementer le marché des réseaux tout en fibre.

Les modèles économiques s'appliquant aux réseaux de fibre nécessitent d'importants investissements initiaux dans l'infrastructure. Le taux de pénétration et les coûts d'investissement sont les principaux facteurs influant sur la rentabilité d'un modèle et sur les risques encourus par les investisseurs. Le taux de pénétration exerce une influence sur la structure des coûts du propriétaire d'un réseau et, partant, agit sur la tarification dans une mesure telle qu'il y a lieu de se demander si, sur un marché donné, une concurrence basée sur les installations peut émerger. L'impact du taux de pénétration sur le tarif mensuel d'un réseau tout en fibre est tel qu'il est peu probable qu'il existe plusieurs réseaux pour garantir l'existence d'un marché concurrentiel. Même en tenant compte des réseaux de câble et des réseaux RTPC existants, il est toujours peu probable qu'il y ait suffisamment de place sur le marché pour quatre infrastructures ou plus accessibles à chaque foyer. Pour les autorités de régulation, ce constat signifie qu'il existe une possibilité permanente de collusion (tacite) sur le marché.

Si l'on examine le marché du point de vue des investisseurs, il devient évident que la situation dynamique et l'économie des investissements risquent d'inciter de nombreux investisseurs à long terme à rester à l'écart de la fibre jusqu'au domicile. Les coûts sont importants et le risque représenté par les réseaux hybrides concurrents peut lui aussi être élevé. Les expériences des grands projets de déploiement de la fibre dans certaines villes permettront de savoir si investir dans la FTTH est un risque qui en vaut la peine. Si l'avantage du premier arrivé est suffisamment solide et si la concurrence des réseaux hybrides n'est pas assez forte, les investisseurs à long terme pourraient être tentés d'investir. A l'heure actuelle, la dynamique de marché est plus favorable aux investisseurs à court terme et aux réseaux de fibre hybrides et, dans certaines régions, aux réseaux FTTH locaux et régionaux.

Dans certaines circonstances, les pouvoirs publics et les collectivités locales pourraient positivement favoriser le déploiement de réseaux de fibre en supprimant les barrières à l'entrée et en encourageant l'utilisation de ces réseaux. Un partenariat avec les opérateurs de télécommunications pour réduire les investissements grâce au partage des coûts et à la coopération avec les propriétaires de bâtiments pourrait être bénéfique. Les pouvoirs publics doivent être conscients que leurs initiatives peuvent être à l'origine d'un effet de distorsion sur le marché et doivent donc attentivement peser le pour et le contre avant d'agir. Lorsque les pouvoirs publics décident d'investir, ils doivent être d'autant plus conscients de leur impact sur le marché et choisir un rôle qui influe aussi peu que possible sur le fonctionnement du marché.

Pour les autorités de régulation, la mise en service de nouveaux réseaux pose de nouvelles questions en matière de réglementation et remplace les problèmes existants dans une nouvelle perspective. Les régulateurs doivent tenir compte de la topologie des réseaux, des différences entre régions, de la position des opérateurs concurrents face aux investissements réalisés par les acteurs disposant d'une puissance de marché significative et aux dissymétries de réglementation entre les différentes infrastructures de réseau.

ANNEXE A. COÛTS D'UN RÉSEAU TOUT EN FIBRE

La première section de ce document a présenté les facteurs à prendre en compte lors du déploiement d'un réseau de fibre. Pour de nombreux décideurs politiques, il est difficile d'avoir une vision globale de la façon dont les différents paramètres liés à la construction d'un réseau influent sur le coût total du raccordement d'un utilisateur final. Pour mieux comprendre ces paramètres et les coûts associés, le Ministère des affaires économiques des Pays-Bas a commandé à la société de conseil en ingénierie Arcadis (voir <http://ngn.arcadis.nl/>) une étude consistant à créer le modèle de coûts d'un réseau tout en fibre. Ce modèle de coûts a été validé par comparaison avec les coûts de plusieurs projets de fibre jusqu'au domicile prévus aux Pays-Bas. Le modèle est adapté à la situation néerlandaise et ne peut donc pas être simplement copié par les autres pays, mais il peut donner aux décideurs politiques une idée des coûts mis en jeu et de la manière dont les coûts des réseaux actifs et passifs ont un impact sur les abonnements mensuels des utilisateurs finaux.

Le modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- Le réseau considéré est de type point à point 100 Mbit/s basé sur Ethernet, et non un réseau PON.
 - L'infrastructure est souterraine et non aérienne.
 - Les coûts des offres triservices sont les suivants : télévision à EUR 10/mois, téléphonie à EUR 3.50/mois et accès Internet à UER 8.50/mois.
 - Les coûts de dépréciation du revêtement des chaussées pour les collectivités locales sont de EUR 4.50. Aux Pays-Bas, ce coût peut aller jusqu'à EUR 22 mais, par exemple, la municipalité de Deventer a décidé de réduire cette charge à EUR 2. Cette différence permet d'économiser en moyenne EUR 200 par foyer sur une infrastructure passive.
 - Une fibre distincte est utilisée pour la télévision par câble analogique.
 - La densité de logement utilisée est la densité nette : la superficie des parcs est déduite de la superficie totale.
 - Le taux d'intérêt des emprunts est de 7 %.
 - La période d'amortissement économique du réseau est de 25 ans.
 - Les zones d'habitation ont été définies à partir de quartiers néerlandais⁵⁸. La configuration complète de la ville ne représente sans doute pas une ville moyenne des Pays-Bas mais, pour les besoins de cette étude, ce facteur est peu important.
- De Baarsjes, Amsterdam : logements collectifs de moyenne hauteur à forte densité de population
 - 8 543 appartements dans des immeubles de moyenne hauteur
 - 55.76 hectares
 - Minervalaan, Amsterdam : logements collectifs de moyenne hauteur à moyenne densité de population
 - 2 846 appartements dans des immeubles de moyenne hauteur
 - 51.1 hectares

- Bateau-Noord, Nieuwegein : zone suburbaine mixte
 - 2 283 maisons individuelles de faible hauteur
 - 1 074 appartements dans des immeubles de moyenne hauteur
 - 103 hectares
- Doorslag, Nieuwegein : zone suburbaine à moyenne densité de population
 - 2 134 maisons individuelles de faible hauteur
 - 534 appartements dans des immeubles de moyenne hauteur
 - 106 hectares
- Zuilesteijn, Nieuwegein : zone suburbaine à faible densité de population
 - 2 313 maisons individuelles de faible hauteur
 - 474 appartements dans des immeubles de moyenne hauteur
 - 163 hectares
- Zone de logements collectifs de grande hauteur, non définie à partir d'un quartier existant
 - 600 appartements
 - 6 hectares

À partir de ces valeurs, le modèle produit les résultats suivants :

- Le coût moyen par logement connecté est calculé à EUR 872 pour l'infrastructure passive et 767 EUR pour l'infrastructure active, soit un prix moyen total de EUR 1 639 par foyer.
- Le coût de l'infrastructure passive varie entre EUR 549 et 1 189.
- L'infrastructure active possède un coût relativement fixe de EUR 767 en moyenne. En effet, le prix dépend du coût par port des commutateurs centraux et des équipements à installer dans les logements des clients.
- Le coût de l'infrastructure passive représente 53 % des coûts d'investissement.

Zone	Superficie	Maisons individuelles	Appart. moyenne hauteur	Appart. grande hauteur	Total	Réseau passif par logement	Réseau passif total	Réseau actif par logement	Réseau actif total
Forte densité moyenne hauteur	56 ha	0	8 543	0	8 543	€ 736	€ 6.286.238	€ 764	€ 6.524.164
Moyenne densité moyenne hauteur	51 ha	0	2 846	0	2 846	€ 795	€ 2.263.496	€ 767	€ 2.184.148
Zone suburbaine mixte	103 ha	2 283	1 071	0	3 354	€ 960	€ 3.218.259	€ 766	€ 2.570.561
Moyenne densité zone suburbaine	106 ha	2 134	534	0	2 668	€ 1.021	€ 2.724.278	€ 771	€ 2.058.335
Faible densité zone suburbaine	163 ha	2 313	474	0	2 787	€ 1.189	€ 3.313.453	€ 770	€ 2.145.046
Grande hauteur	6 ha	0	0	600	600	€ 549	€ 329.469	€ 792	€ 475.440
TOTAL	485 ha	6 730	13 468	600	20 798	€ 872	€ 18.135.193	€ 767	€ 15.957.694

À partir de ces chiffres, on peut déterminer l'impact des différents taux de pénétration sur le prix moyen par foyer et par mois. Les valeurs ci-dessous supposent un financement privé de 60 % et financement par emprunt de 40% avec un taux d'intérêt à 7 %. La marge bénéficiaire souhaitée est de 10 %. Les taxes sont incluses dans le modèle. Les équipements actifs sont remplacés tous les sept ans au même coût qu'au début du projet. Ce modèle n'est pas totalement exact, puisqu'il prend en compte une masse salariale limitée à 120 000 EUR seulement, mais puisque le coût de la main d'œuvre peut être calculé sur une base mensuelle, il est possible de l'ajouter ultérieurement. Cependant, dans le coût de l'offre triservices, une partie du coût de la main d'œuvre a été incluse. L'offre triservices⁵⁹ est définie à 22 EUR/mois, ce qui correspond aux prix observés tant en France qu'aux Pays-Bas pour des offres triservices sur DSL ou FTTH, les coûts de main d'œuvre étant inclus dans ces pays. Les autres coûts concernent le réseau, que les services soient utilisés ou non. Le modèle n'inclut aucune recette supplémentaire provenant de fournisseurs de services proposant des services ou de la différenciation des débits⁶⁰. Les chiffres des quatre dernières colonnes se rapportent à l'impact d'une marge bénéficiaire différente et d'une croissance de 40 % - 60 % - 80 % sur trois ans.

Taux de pénétration	15 %	25 %	33 %	50 %	75 %	100 %	40/60 /80	50 % à 5 % de marge	50 % à 7.5 %	40/60/80 à 7.5 %
Triservices	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Charges mensuelles réseau passif	67.80	40.68	30.82	20.34	13.56	10.17	13.09	15.02	17.66	11.37
Charges mensuelles réseau actif	19.44	17.94	17.43	16.91	16.42	16.28	16.16	14.83	15.85	15.13
TVA 19 %	20.76	15.32	13.35	11.26	9.88	9.21	9.74	9.85	10.55	9.21
Total	130.00	95.94	83.60	70.50	61.86	57.66	60.98	61.70	66.06	57.71

Le tableau ci-dessus nous apprend que le coût des équipements actifs pèse lourdement sur les coûts mensuels, puisqu'il représente 28 %. Il reste relativement stable quels que soient les paramètres du modèle, en particulier les taux de pénétration et les marges bénéficiaires sur le capital. Cette situation est due aux charges récurrentes à payer tous les sept ans. Le modèle conserve les prix à un niveau fixe pendant les 25 ans de durée de vie du réseau et comptabilise ces charges à trois reprises. Il est difficile de dire si ce scénario est réaliste. On pourrait considérer que les prix des composants actifs décroissent avec le temps et la croissance du marché parce que les projets FTTH permettent d'envisager une baisse des coûts importante sur 25 ans, à la fois pour les équipements dans les locaux des clients et pour les commutateurs centraux. A contrario, on peut également considérer qu'au fil des ans, de nouvelles fonctionnalités viendront s'ajouter au réseau et que, pour ce prix fixe, l'utilisateur bénéficiera de plus en plus d'options. Une autre remarque importante à propos du modèle concerne le fait que même si certains prix augmentent avec le temps, la majeure partie du modèle n'est pas soumise à l'inflation. Cela signifie que chaque année, le prix du réseau est une part de plus en plus faible du budget d'un foyer, ce qui laisse plus de place pour les services.

Modélisation de Sun City

La communauté de Sun City en Arizona, aux États-Unis, est une ville de retraite pour les seniors actifs de 55 ans et plus. En ce sens, elle est un bon modèle de la communauté suburbaine relativement aisée des États-Unis. Si le réseau était construit à cet endroit suivant le même modèle, les investissements seraient les suivants :

Calculs des investissements à Sun City

Zone	Superficie	Maisons individ.	Moyenne hauteur	Grande hauteur	Total	Réseau passif par logement	Réseau passif total	Réseau actif par logement	Réseau actif total
Sun City 1	945 ha	6 933	0	0	6 933	€ 2.151	€ 14.909.722	€ 764	€ 5.299.929
Sun City 2	945 ha	6 933	0	0	6 933	€ 2.151	€ 14.909.722	€ 764	€ 5.299.929
Sun City 3	945 ha	6 933	0	0	6 933	€ 2.151	€ 14.909.722	€ 764	€ 5.299.929
Sun City 4	945 ha	6 933	0	0	6 933	€ 2.151	€ 14.909.722	€ 764	€ 5.299.929
TOTAL	3 3.780 0000 ha	27 732	0	0	27 732	€ 2.151	€ 59.638.888	€ 764	€ 21.199.716

Le modèle ne peut pas gérer une superficie de plus de 1 000 hectares, donc la zone a été divisée en 4 zones d'égale superficie. Le prix du réseau passif s'élève à EUR 2 151 par foyer. Avec un taux de pénétration du marché de 50 % sur 25 ans, les charges d'une connexion passive augmentent jusqu'à EUR 49.35. Les coûts passifs sont de EUR 16.5 et la TVA est de EUR 16.69, soit un coût total de EUR 104.54/mois. Cependant ces chiffres n'offrent aucune garantie quant aux coûts réels puisqu'il existe de grandes différences entre les États-Unis et les Pays-Bas et que le modèle n'a pas été développé pour la situation américaine. Ces résultats sont donc donnés à titre indicatif uniquement pour donner aux lecteurs une idée de la façon dont le modèle peut fonctionner dans un pays différent et avec des densités de population différentes.

ANNEXE B. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE RÉSEAU

Technologie	Utilisateurs	Débit max descendant (Mbit/s)	Débit max montant	Débit moyen min/utilisat. descendant	Débit moyen min/utilisat. montant	Flux max descendant (5 Mbit/s)	Flux min/utilisat. descendant	Flux max montant	Flux min/utilisat. montant	Temps min pour télécharger 1 Go descendant (hr: min: s)	Temps max pour télécharger 1 Go descendant (hr: min: s)	Temps min pour télécharger 1 Go montant (hr: min: s)	Temps max pour télécharger 1 Go montant (hr: min: s)
HSDPA/HSUPA	1	14	6	14	6	3	3	1	1	0:09:31	0:23:09	0:09:31	0:23:09
HSDPA/HSUPA	20	14	6	1	0,3	3	0,14	1	0,06	0:09:31	0:23:09	3:10:29	7:42:58
Wifi 802.11g	1	54	54	54	54	11	11	11	11	0:02:28	0:02:28	0:02:28	0:02:28
Wifi 802.11g	20	54	54	3	3	11	1	11	1	0:02:28	0:02:28	0:49:23	0:49:23
Wifi 802.11n	1	248	248	248	248	50	50	50	50	0:00:32	0:00:32	0:00:32	0:00:32
Wifi 802.11n	20	248	248	12	12	50	2	50	2	0:00:32	0:00:32	0:10:45	0:10:45
WiMAX	1	40	40	40	40	8	8	8	8	0:03:20	0:03:20	0:03:20	0:03:20
WiMAX	20	40	40	2	2	8	0,40	8	0,40	0:03:20	0:03:20	1:06:40	1:06:40
WiMAX	250	40	40	0,16	0,16	8	0,03	8	0,03	0:03:20	0:03:20	13:53:20	13:53:20
ADSL	1	24	4	24	4	5	5	1	5	0:05:33	0:38:06	0:05:33	0:38:06
ADSL	20	24	4	24	4	5	5	1	5	0:05:33	0:38:06	0:05:33	0:38:06
ADSL	250	24	4	24	4	5	5	1	5	0:05:33	0:38:06	0:05:33	0:38:06
VDSL2	1	50	50	50	50	10	10	10	10	0:02:40	0:02:40	0:02:40	0:02:40
VDSL2	20	50	50	50	50	10	10	10	10	0:02:40	0:02:40	0:02:40	0:02:40
VDSL2	250	50	50	50	50	10	10	10	10	0:02:40	0:02:40	0:02:40	0:02:40
Docsis 2.0	1	38	27	38	27	8	8	5	5	0:03:31	0:04:56	0:03:31	0:04:56
Docsis 2.0	20	38	27	2	1	8	0,38	5	0,27	0:03:31	0:04:56	1:10:11	1:38:46
Docsis 2.0	250	38	27	0,15	0,11	8	0,03	5	0,02	0:03:31	0:04:56	14:37:12	20:34:34
Docsis 3.0	1	160	120	160	120	32	32	24	24	0:00:50	0:01:07	0:00:50	0:01:07
Docsis 3.0	20	160	120	8	6	32	2	24	1	0:00:50	0:01:07	0:16:40	0:22:13

DSTI/ICCP/CISP(2007)4/FINAL

Technologie	Utilisateurs	Débit max descendant (Mbit/s)	Débit max montant	Débit moyen min/utilisat descendant	Débit moyen min/utilisat montant	Flux max descendant (5 Mbit/s)	Flux min/utilisat descendant	Flux max montant	Flux min/utilisat montant	Temps min pour télécharger 1 Go	Temps max pour télécharger 1 Go descendant (hr: min: s)	Temps min pour télécharger 1 Go montant (hr: min: s)	Temps max pour télécharger 1 Go montant (hr: min: s)
Docsis 3.0	250	160	120	1	0,48	32	0,13	24	0,10	0:00:50	0:01:07	3:28:20	4:37:47
Courant porteur	1	27	18	27	18	5	5	4	4	0:04:56	0:07:24	0:04:56	0:07:24
Courant porteur	20	27	18	1	1	5	0,27	4	0,18	0:04:56	0:07:24	1:38:46	2:28:09
Courant porteur	250	27	18	0,11	0,07	5	0,02	4	0,01	0:04:56	0:07:24	20:34:34	6:51:51
Fibre P2P 100Mbit/s	1	100	100	100	100	20	20	20	20	0:01:20	0:01:20	0:01:20	0:01:20
Fibre P2P 100Mbit/s	20	100	100	100	100	20	20	20	20	0:01:20	0:01:20	0:01:20	0:01:20
Fibre P2P 100Mbit/s	250	100	100	100	100	20	20	20	20	0:01:20	0:01:20	0:01:20	0:01:20
Fibre P2P 1000Mbit/s	1	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	0:00:08	0:00:08	0:00:08	0:00:08
Fibre P2P 1000Mbit/s	20	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	0:00:08	0:00:08	0:00:08	0:00:08
Fibre P2P 1000Mbit/s	250	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	0:00:08	0:00:08	0:00:08	0:00:08
Fibre BPON	1	622	155	622	155	124	124	31	31	0:00:13	0:00:52	0:00:13	0:00:52
Fibre BPON	20	622	155	31	8	124	6	31	2	0:00:13	0:00:52	0:04:17	0:17:12
Fibre BPON	32	622	155	19	5	124	4	31	1	0:00:13	0:00:52	0:06:52	0:27:32
Fibre GPON	1	2500	1250	2500	1250	500	500	250	250	0:00:03	0:00:06	0:00:03	0:00:06
Fibre GPON	20	2500	1250	125	63	500	25	250	13	0:00:03	0:00:06	0:01:04	0:02:08
Fibre GPON	32	2500	1250	78	39	500	16	250	8	0:00:03	0:00:06	0:01:42	0:03:25
Fibre GPON	64	2500	1250	39	20	500	8	250	4	0:00:03	0:00:06	0:03:25	0:06:50
Fibre GPON	128	2500	1250	20	10	500	4	250	2	0:00:03	0:00:06	0:06:50	0:13:39
Fibre EPON	1	1250	1250	1250	1250	250	250	250	250	0:00:06	0:00:06	0:00:06	0:00:06
Fibre EPON	20	1250	1250	63	63	250	13	250	13	0:00:06	0:00:06	0:02:08	0:02:08
Fibre EPON	32	1250	1250	39	39	250	8	250	8	0:00:06	0:00:06	0:03:25	0:03:25

NOTES

- 1 D'après Computer Netwerken 4e editie, A. Tannenbaum, Pearson Prentice Hall, 2003.
- 2 Communiqué de presse Siemens : « New record – Siemens researchers achieve transmission rates of 107 Gbits per second over a single fiber channel using purely electric processing in transmitter and receiver », http://www.siemens.com/index.jsp?sdc_p=fmls5uo1426061ni1079175pcz3&sdc_bcpth=1327899.s_5.
- 3 Il existe deux types de multiplexages en longueur d'onde : le multiplexage par répartition en longueur d'onde dense (DWDM : *Dense Wavelength Division Multiplexing*) qui emploie des canaux proches les uns des autres, séparés par des bandes de fréquences très étroites, ce qui permet d'utiliser le spectre entier et de nombreux canaux ; et le multiplexage par répartition approximative en longueur d'onde (CWDM : *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) qui utilise des canaux très espacés, d'où un nombre de canaux plus limité mais des équipements moins coûteux. En termes simples, le CWDM utilise une couleur distincte pour chaque canal tandis que le DWDM utilise une nuance de couleur légèrement différente pour chaque canal.
- 4 Fiche technique NEC Spectralwave 160 : http://www.necam.com/onsd/collateral/SW160_datash.pdf.
- 5 Les câbles sont par exemple protégés contre les rongeurs. On sait que les écureuils, les rats et d'autres rongeurs peuvent mordre les câbles. Les câbles sous-marins sont protégés par de l'acier contre les requins, les filets de pêcheurs, etc. <http://www.nyquistcapital.com/2006/11/27/squirrels-ate-my-fios/>.
- 6 Ce type de câble est utilisé par Lijbrandt Telecom à Hillegom, aux Pays-Bas. L'entreprise a installé des fibres à proximité des locaux des utilisateurs finaux, où des équipements actifs convertissent le signal en signal électrique envoyé sur les paires torsadées pour la téléphonie, sur le CAT5/6 pour les données et sur le câble coaxial pour la télévision analogique. A l'heure actuelle, la partie en fibre du câble n'est pas utilisée pour transmettre des données jusqu'aux domiciles, bien qu'elle soit connectée aux réseaux de raccordement. Les lignes du réseau téléphonique public commuté, du réseau de la télévision par câble et du réseau de données sont connectées. Source : Fred Terwijn, département Marketing, Lijbrandt Telecom.
- 7 Les satellites géostationnaires se trouvent à une distance de 35 800 km de la surface de la Terre. La distance aller-retour vers un satellite est donc de 71 600 km (près de deux fois la circonférence de la Terre, c'est-à-dire beaucoup plus que le trajet en fibre le plus long qui existe sur Terre, voir note 9), ce qui donne un temps de propagation en boucle de près de 0.54 seconde.
- 8 Twentsche Kabel Fabriek, datasheet broadband fibre optic cables <http://www.tkf.nl/documentatie/pdfEN/TKF-T-5-EJ06M02c.pdf>.
- 9 Sur de telles distances, la vitesse de la lumière dans les fibres devient un problème pour le temps de propagation en boucle. La vitesse de la lumière dans une fibre est égale à environ les 2/3 de la vitesse de la lumière dans le vide. Le trajet très souvent emprunté qui traverse la Méditerranée, le canal de Suez, l'Inde et Singapour pour relier le Royaume-Uni au Japon est long d'environ 27 000 km. Le temps de propagation en boucle sur une telle distance est supérieur à 0.2 secondes, le délai limite pour les communications en temps réel. Lors de la conférence de l'OCDE « L'avenir de l'Internet » organisée en avril 2006, le prof. Murai a suggéré de suivre plus de lignes droites pour les parcours en fibre optique pour résoudre ce problème potentiel, étant donné qu'en ligne droite, la distance de Londres à Tokyo n'est que de 9 600 km. Cependant, ce parcours passe par la Norvège et la Sibérie, ce qui pose des problèmes en termes de

construction. Certains réseaux de fibre actuellement utilisés traversent la Russie et la Sibérie en suivant le parcours des oléoducs.

¹⁰ <http://www.subtelforum.com/Issue%2018.pdf>, Marc Fullenbaum, "Secrets and lies in regional systems", Submarine Telecomforum, Issue 18, janvier 2005.

¹¹ Le dernier réseau longue distance sous-marin à avoir été mis en service est le réseau FALCON. Citation : « Le déploiement du réseau FALCON est en cours, certains segments sont déjà opérationnels ou sur le point d'être mis en service. Boucle du Golfe à autorétablissement, d'une capacité nominale maximale de 1.28 Tbit/s. Capacité initiale de 50 Gbit/s à la mise en service. Parcours comprenant quatre paires de fibres reliant le Golfe à l'Égypte et à l'Inde. Capacité nominale de 2.56 Tbit/s pour une capacité initiale de 90 Gbit/s à la mise en service. Longueur approximative : 10 300 km. » <http://www.flagtelecom.com/index.cfm?page=4023>.

¹² « Verizon to Build Trans-Pacific Express » : <http://www.officeroutlook.com/news/Services/1522.htm>.

¹³ « A View of the Submarine Systems Supply industry », Georges Krebs, *Submarine Telecoms Forum*, mai 2006, <http://www.subtelforum.com/Issue%2026.pdf>.

¹⁴ «ATM's Not Dead»!, 14 décembre 2006, http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=112852.

¹⁵ Les réseaux basés sur un cœur commun sont le réseau 21CN de BT, le réseau ALL-IP de KPN et le cœur de réseau commun proposé par Telstra.

¹⁶ « Internet traffic growth: Sources and implications », Andrew M. Odlyzko, Université du Minnesota, <http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/itcom.internet.growth.pdf>

¹⁷ « The Impact and Implications of the Growth in Residential User-to-User Traffic », Cho *et. al.* Sigcom'06. http://www.sigcomm.org/sigcomm2006/discussion/showpaper.php?paper_id=21. Ce document indique qu'au Japon, le trafic international ne représente que 30 % du trafic total.

¹⁸ <http://www.ams-ix.net/ttm/stats.php?sender=matrix&receiver=matrix&size=small&type=delay&time=now-24h&submit=submit>.

¹⁹ http://www.akamai.com/html/about/press/releases/2006/press_110606.html.

²⁰ Van de Meent cite des cas de figure dans lesquels les pics de débit calculés sur des intervalles de 100 ms étaient plusieurs fois supérieurs aux débits moyens calculés sur des intervalles de 5 min. « Network link dimensioning: a measurement and modeling based approach », R. van de Meent, 2006, thèse PhD CTIT n° 06-79, <http://wwwhome.cs.utwente.nl/~meentr/research/dl.php?thesis-rvdmeent-network-link-dimensioning.pdf>.

²¹ <http://www.xs4all.nl/uk/alldiensten/toegang/bdsl/specificatiessdsl.php>.

²² « The Impact and Implications of the Growth in Residential User-to-User Traffic », Cho *op. cit.*

²³ Un calcul similaire est présenté par Joel Goergen (Force10 Networks) et Mark Nowell (Cisco) pour justifier la nécessité de l'Ethernet 100 Gbit/s : http://grouper.ieee.org/groups/802/3/hssg/public/mar07/goergen_01_0307.pdf

²⁴ Les nouvelles caméras de sécurité numériques activées Internet possèdent des résolutions supérieures à celles des caméras analogiques et nécessitent des débits de l'ordre de 2 à 7 Mbit/s par caméra. Une entreprise de petite taille pourrait avoir besoin de six de ces caméras pour couvrir tous les angles.

http://www.axis.com/products/video/design_tool/calculator.nl.htm, caméra Axis 2100, 30 images par seconde, résolution 704*576.

25 *Nieuwe generatie netwerken in Europa, Breedband in 2011 en daarna*. Arthur D. Little pour Liberty Global, 2006, http://www.vecai.nl/downloads/docs/ADL_Report.pdf.

26 Les informations fournies par Clearmind Consultancy estiment qu'une PME peut économiser de EUR 10 000 à 30 000/an en frais TIC (technologies de l'information et de la communication) si elle remplace son système de communication actuel par une connexion haut débit de 100 Mbit/s.

27 « HSDPA and beyond », document de présentation technique, Nortel : http://www.nortel.com/solutions/wireless/collateral/nn_110820.01-28-05.pdf.

28 « Backhaul Packs 'em in », 13 décembre 2006, http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=112773.

29 Wireless Last Mile, rapport final SES-2006-9, Steve Methley, Plextek, rapport pour l'Ofcom, 20 novembre 2006, <http://www.ofcom.org.uk/research/technology/overview/ese/lastmile/>.

30 La bande de fréquences de 500 MHz à 2.5 GHz présente les meilleures propriétés pour les réseaux sans fil haut débit. Même si l'ensemble de ces 2000 MHz étaient libérés pour l'accès haut débit, le débit maximal ne dépasserait pas 6 000 à 8 000 Mbit/s (à 3 à 4 bits par Hz). Partagé entre 100 utilisateurs, il fournirait donc à chaque utilisateur 30 Mbit/s dans le sens montant et 30 Mbit/s dans le sens descendant. Il est très peu probable qu'une telle plage de fréquences soit disponible dans les décennies à venir. Seules les bandes de fréquences les plus hautes sont susceptibles d'être disponibles pour le haut débit et leurs performances sont fortement entravées par la pluie, les longues distances ou l'absence de visibilité directe.

31 Tannenbaum, 131.

32 Source : http://en.wikipedia.org/wiki/Image:ADSL_Line_Rate_Reach.gif, des graphiques similaires sont également disponibles dans des sources telles que : Tanenbaum, Alcatel Lucent, etc.

33 Les distances exactes varient en fonction de plusieurs facteurs, comme l'ancienneté et la qualité de la ligne, le blindage, le nombre de lignes d'un faisceau et d'autres paramètres ayant une incidence sur la qualité de la ligne.

34 « UK's Broadband Local Loop Lengths », <http://www.ispreview.co.uk/cgi-bin/news/viewnews.cgi?id=EEFplFyZEkrNkluWdw>, et « Loop Lengths and Architecture presentation » pour IEEE EFM, Raleigh, NC, du 14 au 16 janvier 2002, www.ieee802.org/3/efm/public/jan02/mickelsson_1_0102.pdf.

35 « Optical Access Networks: Is economics still the sticking point? », présentation de Roy Rubinstein pour l'Optical Network Europe 2006 : <http://fibers.org/dl/one/presentations/07.RoyRubenstein.ppt>.

36 « The business case for sub-loop unbundling in The Netherlands », Anaylys, 2006, rapport écrit pour l'OPTA. <http://www.opta.nl/download/Analysys+Final+Report%2Epdf>

37 Un foyer moyen (deux parents, deux enfants) possède souvent 2 ou 3 télévisions, 1 ou 2 ordinateurs personnels et un ou plusieurs appareils d'enregistrement. Dans certains pays de l'OCDE, on rencontre également un nombre non négligeable de foyers comptant plus de membres. Les utilisations combinées des télévisions, etc. peuvent induire une demande de flux TVHD supérieure aux 3 à 5 flux possibles.

38 Netwerkstructuur Hoofdnet, picture of the Essent @ Home
network :<http://www.corp.home.nl/NR/rdonlyres/CD94491F-9967-411A-81DF-717747D4F116/0/hoofdnetekc.gif>.

39 « Data Over Cable Service Interface Specifications, Docsis 3.0», Cable Television Laboratories Inc.
<http://www.cablemodem.com/downloads/specs/CM-SP-PHYv3.0-I02-061222.pdf>

40 « Cable Confronts Bandwidth Crunch », 24 janvier 2007,
http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=115344&site=cdn

41 « The Technology of Broadband», Peter Darling, pag. 14, Telecommunications Journal of Australia,
Volume 56 No/3/4, et <http://tprc.org/papers/2003/246/Tongia-PLC.pdf>

42 Au taux de change euro/dollar début 2007.

43 La télévision analogique est un moyen peu coûteux d'acheminer les canaux de télévision jusqu'à une
habitation. Avec la télévision numérique, tous les téléviseurs d'un foyer nécessitent un décodeur spécialisé,
d'où un coût de déploiement plus élevé.

44 <http://www.ieee802.org/3/av/> et e-mail avec Glen Kramer, président du Groupe de travail IEEE 802.3av.

45 Actuellement, sur les 30 pays de l'OCDE, 28 ont mis en œuvre le dégroupage de la boucle locale dans le
cadre de leur politique réglementaire. Le Mexique étudie la possibilité d'imposer le dégroupage.

46 D'après une présentation du Prof. Sirbu à l'OCDE.

47 De plus en plus de fournisseurs d'accès Internet envisagent d'utiliser la technologie FON ou les
technologies basées sur le système FON, par exemple Time Warner aux États-Unis.

48 http://www.friedlnet.com/product_info.php?cPath=43_47&products_id=4075.

49 La partie hybride correspond aux 100 derniers mètres de ligne jusqu'à l'utilisateur final, ce qui permet
d'utiliser les câblages existants des bâtiments ou d'utiliser des équipements actifs moins coûteux.

50 « The business case for sub-loop unbundling in The Netherlands», Anaylys, 2006, rapport écrit pour
l'OPTA. <http://www.opta.nl/download/Analysys+Final+Report%2Epdf>.

51 Une part importante de ce pourcentage pourrait correspondre aux tarifs voix mobiles. Sur les réseaux de
lignes fixes, ce ratio est souvent inférieur. Cependant, la convergence des réseaux rendue possible par les
nouveaux réseaux haut débit et la concurrence sera aussi ressentie par les réseaux mobiles.

52 « An alternate strategy for FTTH», présentation de Bill St. Arnaud (CANARIE)
<http://www.sandelman.ca/tmp/Green-Broadband.pdf>.

53 Selon l'expérience de l'auteur, une connexion en fibre entre deux emplacements double de prix lorsqu'elle
passe de 34 Mbit/s à 155 Mbit/s et double encore de prix lorsqu'elle passe à 655 Mbit/s ou 1 Gbit/s, même
si ni l'un des composants actifs (commutateurs, etc.), ni la fibre elle-même ne doivent être changés.

54 Citons, à titre d'exemple de telles réductions, les négociations entre NFL aux États-Unis et les opérateurs
du câble et entre les maisons de disques et iTunes.

55 Les réseaux ayant indiqué qu'ils suivraient ce modèle économique sont Free en France et KPN aux Pays-
Bas.

- 56 « Wholesale Salvation , Retail-Wholesale split offers upside», décembre 2006, Bear Stearns, disponible à l'adresse http://www.ccc.asn.au/files/pressrelease/paper_17.pdf et « The Dumb Pipe Paradox », Bernstein Research, 27 février 2006.
- 57 Les coûts totaux semblent correspondre aux coûts observés ailleurs. Chungwha Telecom réserve environ USD 1000 par foyer pour investir dans la fibre jusqu'au domicile. http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=113797.
- 58 La ville de Sun City, en Arizona, aux États-Unis, possède une densité de logement de 7 habitations par hectare. Aux Pays-Bas, la moyenne est comprise entre 15 et 40 habitations par hectare.
- 59 Le caractère fixe ou variable du coût téléphonique des appels nationaux et internationaux dépend largement des conditions nationales. En France, il est souvent fixe. Aux Pays-Bas, il est souvent variable.
- 60 En outre, il n'existe aucune raison technique qui justifierait de proposer aux clients une bande passante moins large sur le réseau local, étant donné que les limites sur ce réseau sont fixées par les débits des lasers des équipements et que l'offre de débits plus ou moins élevés n'est associée à aucune différence de coût sur les réseaux locaux. Il est plus cher de proposer aux clients des débits plus faibles sur le réseau local, car cela nécessite des tâches administratives supplémentaires. Les débits proposés sur Internet peuvent être gérés, par exemple en définissant des limites de bandes passantes, en limitant la bande passante Internet ou en définissant des taux de contention différents.