

## Article invité

## La RO au cœur du déploiement du Fiber To The Home à France-Télécom Orange

*La RO récompensée par le prix Orange de l'Innovation 2012 (catégorie Réseaux)*

Matthieu Chardy<sup>1</sup>, Marie-Christine Costa<sup>2</sup>, Alain Faye<sup>3</sup>

matthieu.chardy@orange.com, marie-christine.costa@ensta-paristech.fr, alain.faye@ensiie.fr

Stanislas Francfort<sup>1</sup>, Cédric Hervet<sup>1,2</sup> et Mathieu Trampont<sup>1,2</sup>

{stanislas.francfort, cedric.hervet}@orange.com

### 1 Introduction

L'objectif actuel des opérateurs télécoms est de proposer et fournir des services à valeur ajoutée, toujours plus consommateurs en ressources réseaux. Longtemps situé dans le réseau dit « cœur » (i.e. la partie du réseau inter-connectant les grandes villes françaises ou internationales), le goulot d'étranglement en termes de capacité s'est aujourd'hui déplacé vers le réseau dit d'« accès » (i.e. les quelques kilomètres qui séparent les terminaux des clients du premier équipement intelligent : antenne, DSLAM, etc...).

Pour les réseaux d'accès mobile, les opérateurs ont depuis longtemps engagé le renouvellement de leurs infrastructures, avec l'apparition de la téléphonie mobile de deuxième génération (2G), puis celle de troisième génération (3G), et bientôt en France de celle de quatrième génération (4G) offrant des débits toujours plus élevés. En ce qui concerne le réseau d'accès fixe, cette nécessaire montée en débit s'est effectuée sans changer l'infrastructure physique cuivre, profitant d'une « simple » modulation de la fréquence des signaux transportés (bas-débit versus haut-débit). Mais aujourd'hui, le réseau cuivre montre ses limites à accompagner la bande passante toujours plus importante attendue par les utilisateurs. Et cette limite ne ferait que s'accroître dans le futur.

Face à ce constat, les opérateurs télécoms sont contraints d'engager un renouvellement de leur réseau d'accès fixe. La technologie fibre retenue par France-Télécom Orange est la Fiber To The Home (FTTH), et plus précisément l'architecture Passive Optical Network (PON) (cf Figure 1 pour une illustration des différentes technologies et architectures d'un réseau d'accès optique). Il s'agit d'une architecture dite Point à Multipoints, où chaque fibre

optique partant du cœur de réseau est démultipliée lors de son passage dans des équipements passifs appelés coupleurs optiques : une fibre dessert jusqu'à 64 clients qui ont, en bas de chez eux, une fibre optique individuelle.

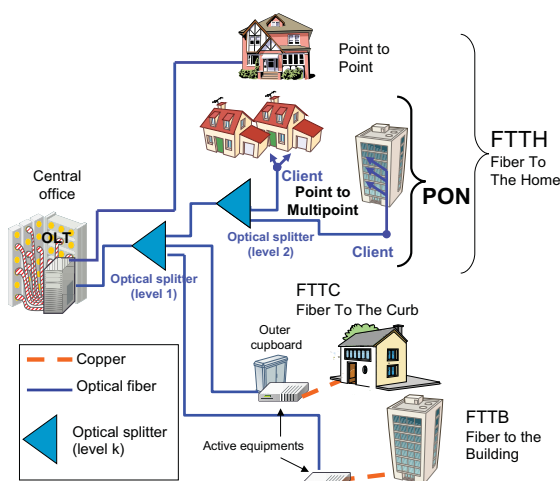


Fig 1 : Les architectures FTTx.

Ce renouvellement complet de l'infrastructure du réseau d'accès fixe s'effectue de manière progressive et nécessitera un investissement échelonné estimé à plusieurs dizaines de milliards d'euros d'ici sa fin prévue en 2020. Pour se faire une idée de l'ampleur d'un tel projet, il s'agira de déployer plusieurs dizaines de millions de kilomètres de fibre optique. Face à de tels enjeux financiers et à une telle complexité dans le choix du déploiement d'un réseau FTTH (pour une ville comme Brest il s'agit de déployer une telle architecture dans une infrastructure de plusieurs milliers de sites et tronçons de génie civil), un outil d'optimisation du design des réseaux FTTH PON apparaît crucial.

1. France-Télécom Orange, Issy-les-Moulineaux

2. Laboratoire CEDRIC, ENSTA-ParisTech, Palaiseau

3. Laboratoire CEDRIC, ENSIIE, Evry

La conception de réseaux d'accès a été le sujet de nombreux travaux de recherche sur différentes versions du problème (voir les surveys [4], [8] et [11]). Le trait commun de ces problèmes est la construction d'un réseau à partir d'une liste de nœuds et de liens potentiels. A un lien est associé un coût fixe (construction) et un coût variable dépendant de sa longueur et de la quantité de flot qu'il transporte. Il faut non seulement choisir les liens mais aussi les câbles installés sur ces liens pour connecter les clients au point d'accès du réseau cœur. Le prix des câbles dépend de leur capacité. Ils peuvent être regroupés de façon optimale (au sens des coûts d'installation) en modules de sorte que l'on met au plus un module par lien ([14], [10]). Une autre problématique intervient lorsque l'on considère un réseau d'accès où deux types de technologies cohabitent comme la liaison cuivre et la liaison fibre optique. Il faut dans ce cas implanter des équipements sur les nœuds du graphe pour permettre le passage d'une technologie à l'autre. Il y a un équipement au plus par nœud ([13], [5], [1], [3]). Les modèles mathématiques de ces problèmes sont basés sur des multiflots en nombres entiers. La complexité des problèmes résulte notamment d'un nombre de variables très importants. Ils sont souvent résolus de façon approchée par décomposition du problème ou à l'aide d'heuristiques lagrangiennes. Les réseaux optiques FTTH induisent de nouvelles difficultés. Les équipements installés sur les nœuds sont des coupleurs. Il peut y en avoir plusieurs par nœud (pas seulement un). Le rôle de ces coupleurs est de démultiplier les fibres entrantes. Ainsi une fibre entrant dans un nœud est démultipliée en plusieurs fibres si elle passe par un coupleur. Dans les modèles précédents les flots ne sont pas démultipliés et suivent simplement les lois de conservation en chaque nœud. De plus, il y peut y avoir plusieurs niveaux de coupleurs entre le point d'entrée du réseau cœur et un client ce qui conduit à des réseaux à plus de deux niveaux. Dans les références ([12], [9], [6], [7]) on pourra trouver diverses variantes de ce problème.

## 2 Modélisation et résolution

Face à la complexité du problème, la résolution se fait en deux étapes. La première concerne l'acheminement des fibres chez les clients et le placement des coupleurs optiques. La deuxième concerne le groupement des fibres dans des câbles. La première partie sera résolue à l'aide de la PLNE. L'aspect câblage sera traité ensuite par une méthode heuristique. France-Télécom Orange a décidé d'utiliser l'infrastructure existante qui est suffisante pour le

développement des nouvelles connexions optiques. L'infrastructure est modélisée par un graphe non orienté  $G = (V, E)$ . Les sommets ou nœuds sont numérotés de 0 à  $n$ , le sommet 0 représentant la position de l'Optical Line Termination (OLT), équipement permettant l'accès au réseau cœur. Les sommets représentent la position des clients et des chambres permettant d'accueillir les coupleurs, ou simplement le croisement de conduites. Il est possible de placer plusieurs coupleurs sur un nœud. Par contre au nœud de l'OLT, il n'y a ni client ni coupleur. Un nœud peut contenir plusieurs clients logés dans un immeuble ou une résidence pavillonnaire. Les arêtes du graphe représentent les conduites dans lesquelles sont acheminées les fibres. Les conduites ont une capacité limitée. De l'OLT partent des fibres de niveau 1. Pour chaque fibre de niveau  $k$  arrivant dans un coupleur correspondent  $m_k$  fibres de niveau  $k + 1$  sortant du coupleur.  $m_k$  étant une constante, il se peut que des fibres sortant d'un coupleur soient inutilisées. La demande au sommet  $i$  correspond au nombre de fibres de niveau 3 nécessaires pour servir les clients au sommet  $i$ . Le coût d'installation du réseau optique comprend les coûts des coupleurs (achat + installation) et le coût des fibres. Il y a au total deux niveaux de coupleurs et trois niveaux de fibres. Les coûts des coupleurs et des fibres sont dépendants de leur niveau mais les variations entre niveaux sont faibles pour les fibres alors qu'elles sont plus importantes pour les coupleurs. Le coût des fibres est proportionnel à la longueur. Le problème est donc de décider où placer les coupleurs et comment router les fibres en respectant les contraintes de capacité des conduites pour satisfaire la demande des clients au moindre coût. Le modèle proposé est un programme linéaire en nombres entiers. Les données sont les suivantes :

$d_{ij}^k$  : coût d'une fibre de niveau  $k$  routée sur l'arête  $[i, j]$ ,  $k = 1, 2, 3$ .

$C^k$  : coût d'un coupleur de niveau  $k$ ,  $k = 1, 2$ .

$m^k$  : nombre de fibres de niveau  $k + 1$  quittant un coupleur de niveau  $k$  pour chaque fibre de niveau  $k$  arrivant au coupleur,  $k = 1, 2$ ;  $m^k \geq 2$ .

$a_i$  : demande au nœud  $i$ , i.e. nombre de fibres de niveau 3 nécessaire au service des clients situés en  $i$ ;  $a_i \in \mathbb{N}$ ,  $i = 0, \dots, n$ .  $a_0 = 0$ .

$b_{ij}$  : capacité de l'arête  $[i, j]$ , i.e. nombre maximum de fibres pouvant être ajoutées dans la conduite  $[i, j]$ ,  $[i, j] \in E$  ( $b_{ij} \in \mathbb{N}$ ).

Les variables sont les suivantes :

$z_i^k$  : nombre de coupleurs de niveau  $k$  installés au nœud  $i$ ,  $i = 0, \dots, n$ ,  $k = 1, 2$ .

$\mathbf{f}_{ij}^k$  : nombre de fibres de niveau  $k$  routée sur l'arête  $[i, j]$  de  $i$  vers  $j$ ,  $[i, j] \in E$ ,  $k = 1, 2, 3$ .

$\mathbf{u}_i^k$  : nombre de fibres inutilisées de niveau  $k$  quittant un coupleur de niveau  $k - 1$  au nœud  $i$ ,  $i = 0, \dots, n$ ,  $k = 2, 3$ .

Le problème à résoudre est le PLNE suivant. On remarquera qu'il s'agit d'une généralisation du modèle classique de multiflot.

$$\min_{\mathbf{f}, \mathbf{z}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^2 C^k \mathbf{z}_i^k + \sum_{[i,j] \in E} \sum_{k=1}^3 d_{ij}^k (\mathbf{f}_{ij}^k + \mathbf{f}_{ji}^k)$$

sous contraintes :

$$(1) \sum_{j|j \in \Gamma(i)} \mathbf{f}_{ji}^1 = \mathbf{z}_i^1 + \sum_{j|j \in \Gamma(i)} \mathbf{f}_{ij}^1 \quad \forall i$$

$$(2) \sum_{j|j \in \Gamma(i)} \mathbf{f}_{ji}^2 + m^1 \mathbf{z}_i^1 = \mathbf{z}_i^2 + \sum_{j|j \in \Gamma(i)} \mathbf{f}_{ij}^2 + \mathbf{u}_i^2 \quad \forall i$$

$$(3) \sum_{j|j \in \Gamma(i)} \mathbf{f}_{ji}^3 + m^2 \mathbf{z}_i^2 = a_i + \sum_{j|j \in \Gamma(i)} \mathbf{f}_{ij}^3 + \mathbf{u}_i^3 \quad \forall i$$

$$(4) \sum_{k=1}^3 (\mathbf{f}_{ij}^k + \mathbf{f}_{ji}^k) \leq b_{ij} \quad \forall [i, j] \in E$$

$$\mathbf{z}_i^k \in \mathbb{N} \quad \forall i = 1, \dots, n, k = 1, 2; \quad \mathbf{z}_0^k = 0 \quad \forall k = 1, 2$$

$$\mathbf{u}_i^k \in \mathbb{N} \quad \forall i = 1, \dots, n, k = 2, 3; \quad \mathbf{u}_0^k = 0 \quad \forall k = 2, 3$$

$$\mathbf{f}_{ij}^k \in \mathbb{N} \quad \forall [i, j] \in E, k = 1, 2, 3$$

Les contraintes (1) modélisent les fibres de niveau 1 entrantes dans un sommet  $i$  et leur utilisation ( $i = 1, \dots, n$ ). Elles vont soit alimenter les coupleurs installés sur le nœud soit traverser simplement le nœud. Les contraintes (2) modélisent ce qui se passe au niveau 2. En un nœud  $i$  ( $i = 0, \dots, n$ ), il y a des fibres entrantes de niveau 2 et les fibres de niveau 2 sortant des coupleurs de niveau 1 installés au nœud. Ces fibres vont soit alimenter d'autres coupleurs, de niveau 2 cette fois, soit simplement sortir du nœud. Certaines fibres peuvent être inutilisées. Les contraintes (3) modélisent le troisième et dernier niveau du réseau. En un nœud  $i$  ( $i = 0, \dots, n$ ), on trouve les fibres de niveau 3 entrantes et les fibres de niveau 3 sortant des coupleurs de niveau 2 installés au nœud. Ces fibres de niveau 3 vont soit alimenter des clients soit traverser le nœud. Ici encore certaines fibres peuvent être inutilisées. Les contraintes (4) représentent la limite en nombre de fibres de tous niveaux passant dans les conduites.

Le problème a été résolu à l'aide de Cplex. Toutefois, il a été nécessaire d'ajouter deux techniques qui ont permis de résoudre efficacement des instances réelles. Tout d'abord, diverses règles ont permis de réduire considérablement la taille du graphe sous-jacent, d'environ 60% pour des graphes allant jusqu'à plusieurs milliers de nœuds et d'arêtes. Il faut noter que ces réductions ont été possibles parce

que les coûts des fibres des différents niveaux diffèrent d'au plus un facteur 2. Par ailleurs, un certain nombre de coupes polyédrales ont été ajoutées au modèle. Ces coupes sont fondées sur l'agrégation de contraintes et de variables du modèle. Une technique d'arrondi est ensuite appliquée et permet d'obtenir de nouvelles inégalités valides. Pour plus de détails, voir [2].

Une fois le routage des fibres et le placement des coupleurs obtenus, une heuristique permet de déterminer le regroupement des fibres en paquets correspondant à des câbles.

### 3 Prototype de recherche et résultats

Ces résultats d'optimisation ont été intégrés à un prototype de recherche permettant de faciliter et d'automatiser :

- les activités de budgétisation prévisionnelle et de planification des déploiements,
- la conception de réseaux de coût minimal garantissant l'éligibilité des clients, et ainsi permettre d'économiser plusieurs millions sur les coûts des futurs déploiements (équipement et main d'œuvre).

La Figure 2 montre une copie d'écran de l'interface d'accueil Intranet du prototype d'aide à la décision développé. L'utilisateur est invité à choisir sa zone de déploiement et certains paramètres de l'architecture à déployer (niveau de couplage et coût des équipements).

**Actions**

- Validate data
- Optimization data
- Run Optimizer

**Inputs**

**User data**

Instance: Strasbourg\_ROB  
 Architecture: Custom  
 Splitting levels:   
 Max. computation time (sec.): 0

**Custom architecture parameters**

	Level 0	Level 1	Level 2	Pon cards
Capacity		1	1	
Splitter price (€)		1	1	1
Fiber price (€/km)		1		

**Engineering rules**

- Reuse of existing civil engineering
- Dimensioning of splitters according to marketing target (%)
- Dimensioning of Level1 fibers according to marketing target (%) 30
- Minimum number of served customers per PDZ (L1 splitters) 50  On average
- Minimum number of served customers per PE (L2 splitters)  On average
- Customers are served by splitters L2 located at their PRI

Copyright © Orange Labs 2010-2011

Fig 2 : Interface utilisateur du prototype.

Le logiciel procède alors à l'optimisation du déploiement de l'architecture choisie sur la zone considérée et restitue les résultats sous forme de fichiers

Excel et Image dans un format SIG open source (cf Figure 3).



**Fig 3 : Design de réseau FTTH PON.**

Le logiciel a été testé sur des villes françaises où le déploiement du FTTH avait déjà été réalisé. La comparaison des coûts des réseaux obtenus manuellement et des réseaux optimisés, proposés par l'outil, ont montré que des économies importantes pourraient être réalisées grâce à un tel outil aussi bien sur les coûts de déploiement que sur les temps d'étude.

## 4 Conclusion

Ce prototype a mis la Recherche Opérationnelle à l'honneur car il a remporté le Prix de l'Innovation 2012 (compétition interne aux entités d'innovation du Groupe France-Télécom Orange) dans la catégorie Réseau. Un nouvel objectif est maintenant d'étendre le modèle de façon à prendre en compte l'incertitude des données.

## Références

- [1] A.M. Costa, P.M. França, C. Lyra Filho. Two-level network design with intermediate facilities : An application to electrical distribution systems. *Omega* 39 (2011), pp.3-13.
- [2] M. Chardy, M.-C. Costa, A. Faye, M. Trampont. Optimizing splitter and fiber location in a multilevel optical FTTH network. *European Journal of Operational Research*, 222(3)(2012), pp. 430-440.
- [3] F.R. Cruz, G.R. Mateus, J. Macgregor Smith. A Branch-and-Bound Algorithm to Solve a Multi-level Network Optimization Problem. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 1 (2003), pp. 37-56.
- [4] E. Gourdin, M. Labbé, H. Yaman. Telecommunication and Location, in Z. Drezner and H. Hamacher (Eds), *Facility Location : Applications and Theory*, Springer (2002), pp. 275-305.
- [5] L. Gouveia, E. Janssen. Designing reliable tree networks with two cable technologies. *European Journal of Operational Research* 105 (1998), pp. 552-568.
- [6] S. Gualandi, F. Malucelli, D.L. Sozzi. On the Design of the Next Generation Access Networks. CPAIOR, LNCS 6140 (2010), pp. 162-175.
- [7] Y. Kim, Y. Lee, J. Han. A splitter location-allocation problem in designing fiber optic access networks. *European Journal of Operational Research*, 210, (2011), pp. 425-435.
- [8] A. Koster, X.M. Muñoz (Eds), *Graphs and Algorithms in Communication Networks : Studies in Broadband, Optical, Wireless, and Ad Hoc Networks*. Springer,(2009), 426 p.
- [9] J. Li, G. Shen, G. Cost Minimization Planning for Greenfield Passive Optical Networks, *Journal of Optical Communications and Networking*, 1-1, (2009), pp. 17-29.
- [10] I. Ljubic, P. Putz, J.-J. Salazar-Gonzalez. Exact Approaches to the Single-Source Network Loading Problem. *Networks*, 59-1, (2012), pp. 89-106.
- [11] G.R. Mateus, Z.K.G. Patrocínio Jr. Optimization Issues in Distribution Network Design, in *Handbook of Optimization in Telecommunication*, Resende, M. G. C. & Pardalos P. M. (Eds), (2006), Chapter 14.
- [12] K.F. Poon, D.B. Mortimore, J. Mellis. Designing optimal FTTH and PON networks using new automatic methods. *Proceedings of the 2nd Institution of Engineering and Technology International Conference on Access Technologies*, (2006), pp. 45-48.
- [13] C. D. Randazzo, H. P. L. Luna, P. Mahey. Benders Decomposition for Local Access Network Design with Two Technologies, *Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, 4, (2001), pp. 235-246.
- [14] F.S. Salman, R. Ravi, J.N. Hooker. Solving the Capacitated Local Access Network Design Problem, *INFORMS Journal on Computing*, 20-2, (2008), pp. 243-254.