

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 et Stanislas Francfort, France-Telecom Orange,¹
 Marie-Christine Costa et Alain Faye, CEDRIC (ENSTA ParisTech, ENSIIE),
 Cédric Hervet, France-Telecom Orange-CEDRIC et Mathieu Trampont ??

{matthieu.chardy,cedric.hervet,stanislas.francfort}@orange.com
 marie-christine.costa@ensta-paristech.fr, alain.faye@ensiie.fr

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 séparant 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 télécom 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 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.

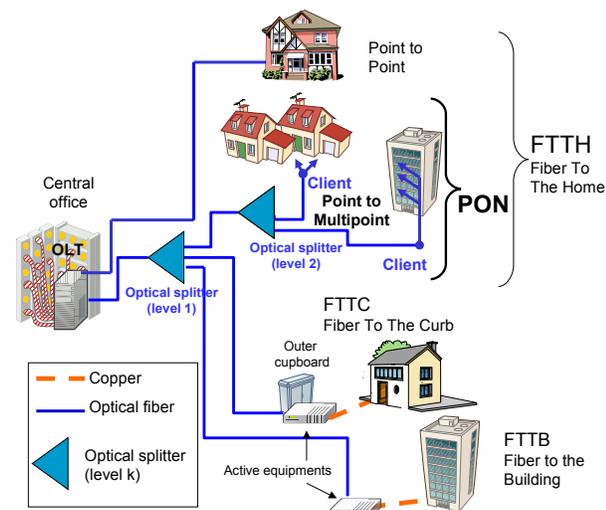


Fig 1 : Les architectures FTTH

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.

Les coûts de génie civil induits par le creusement de nouvelles tranchées pour la pose des câbles sont très élevés et l'utilisation de l'infrastructure existante utilisée par les fils de cuivre est de ce fait primordiale. Une étude faite par France-Télécom a montré qu'en secteur urbain l'infrastructure existante

1. 38-40 rue du Gal Leclerc, Issy-les-Moulineaux

tante était suffisante pour pouvoir y installer les fibres optiques. La conception de réseaux d'accès a été le sujet de nombreux travaux de recherche sur différentes versions du problème (mettre les surveys). 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 n'y a généralement qu'un niveau d'équipements intermédiaires entre le point d'entrée au réseau cœur et le client. Dans la littérature on peut distinguer trois classes de problèmes bien qu'elles ne soient pas toujours disjointes. Le modèle de base consiste en la localisation d'équipements sous une contrainte de connexité et le rattachement de clients à ces équipements. Cela donne un réseau à deux niveaux un arbre de Steiner pour le premier et une architecture en étoiles pour le second, les extrémités des étoiles étant les clients. (mettre les références) Le deuxième modèle consiste en le problème de conception de réseau d'accès (un seul point d'entrée) constitué d'un seul niveau. Il faut ici choisir les liens et les câbles installés sur ces liens pour connecter les clients au point d'accès du réseau cœur. (références) Dans le troisième modèle on considère un réseau d'accès où deux types de technologies cohabitent comme la liaison cuivre et la liaison fibre optique. Cela nécessite l'implantation d'équipements sur les nœuds du graphe qui permettent le passage d'une technologie à l'autre. Il y a un équipement au plus par nœud. (références) 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 langrangiennes. 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. (références)

2 Modélisation et résolution

Face à la complexité du problème à résoudre, 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'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 , $i = 0, \dots, n$, $k = 1, 2$.

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

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, appelé \mathcal{PON} (Passive Optical Network). On remarquera qu'il s'agit d'une généralisation du modèle classique de multiflot.

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

sous contraintes :

$$(1) \sum_{j|j \in \Gamma(i)} f_{ji}^1 = z_i^1 + \sum_{j|j \in \Gamma(i)} f_{ij}^1 \quad \forall i$$

$$(2) \sum_{j|j \in \Gamma(i)} f_{ji}^2 + m^1 z_i^1 = z_i^2 + \sum_{j|j \in \Gamma(i)} f_{ij}^2 + u_i^2 \quad \forall i$$

$$(3) \sum_{j|j \in \Gamma(i)} f_{ji}^3 + m^2 z_i^2 = a_i + \sum_{j|j \in \Gamma(i)} f_{ij}^3 + u_i^3 \quad \forall i$$

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

$$z_i^k \in \mathbb{N} \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad k = 1, 2; \quad z_0^k = 0 \quad \forall k = 1, 2$$

$$u_i^k \in \mathbb{N} \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad k = 2, 3; \quad u_0^k = 0 \quad \forall k = 2, 3$$

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

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 3276 nœuds et 3639 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 [5].

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 de Recherche ont été intégrés à un prototype de recherche permettant de faciliter et automatiser :

- les activités de budgétisation prévisionnelle des déploiements et de planification des déploiements réalisées en Unité de Pilotage Réseau,

- la conception de plans de déploiements de coût minimal tout en garantissant l'éligibilité des clients France-Telecom, 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 du prototype Intranet du logiciel 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).

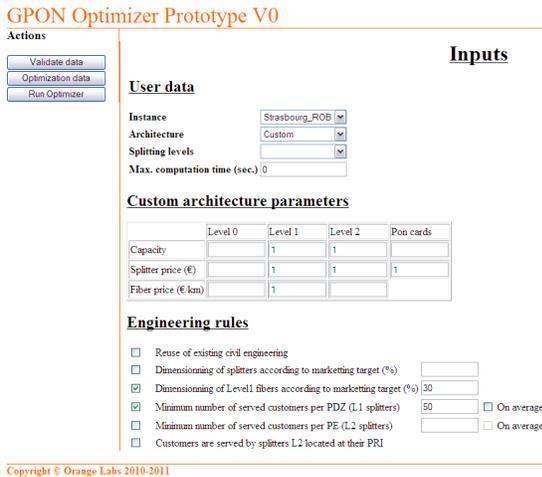


Fig 2 : Interface utilisateur du prototype ?

Le logiciel procède alors à l'optimisation du déploiement de l'architecture choisie sur la zone considérée et restitue les résultats sous forme de fichier Excel et Image dans un format SIG open source (cf Figure 3).

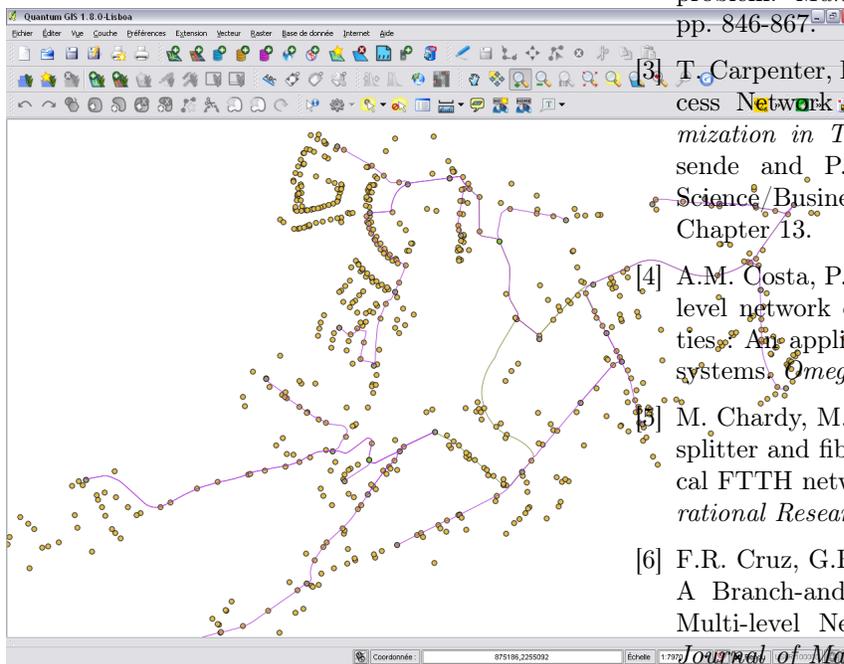


Fig 3 : Design de réseau FTTH PON.

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 versus automatisés/optimisés par l'outil ont montré que des économies importantes pourraient être réalisées grâce à un tel outil en termes de coûts de déploiement, sans compter le temps d'étude réduit.

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. Il est en cours d'industrialisation et d'intégration dans le système d'information. Un nouvel objectif est maintenant d'étendre le modèle de façon à prendre en compte l'incertitude des données.

Références

- [1] A. Balakrishnan, T.L. Magnanti, P. Mirchandani. A dual-based algorithm for multi-level network design. *Management Science*, 40(5)(1994), pp. 567-581.
- [2] A. Balakrishnan, T.L. Magnanti, P. Mirchandani. Modeling and heuristic worst-case performance analysis of the two-level network design problem. *Management Science*, 40(7)(1994), pp. 846-867.
- [3] T. Carpenter, H. Luss. Telecommunication Access Network Design, in *Handbook of Optimization in Telecommunication*, M.G.C. Resende and P.M. Pardalos (Eds), Springer Science/Business Media, New York. (2006), Chapter 13.
- [4] 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.
- [5] M. Chardy, M.-C. Costa, A. Faye. Optimizing splitter and fiber location in a multilevel optical FTTH network. *European Journal of Operational Research*, 222(3)(2012), pp. 430-440.
- [6] 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.
- [7] S. Gollowitzer, I. Ljubic. MIP models for connected facility location : a theoretical and computational study. *Computers and Operations Research*, 38 (2) (2011), pp. 435-449.
- [8] S. Gollowitzer, L. Gouveia, I. Ljubic. A node splitting technique for two level network design problems with transition nodes. INOC 2011 (Germany) (2011), pp. 57-70.

- [9] 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.
- [10] L. Gouveia, E. Janssen. Designing reliable tree networks with two cable technologies. *European Journal of Operational Research* 105 (1998), pp. 552-568.
- [11] S. Gualandi, F. Malucelli, D.L. Sozzi. On the Design of the Next Generation Access Networks. CPAIOR, *LNCS* 6140 (2010), pp. 162-175.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] M. Leitner, G.R. Raidl. Branch-and-Cut-and-Price for Capacitated Connected Facility Location. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 10-3, (2011), pp. 245-267.
- [15] 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.
- [16] I. Ljubic, P. Putz, J.-J. Salazar-Gonzalez. Exact Approaches to the Single-Source Network Loading Problem. *Networks*, 59-1, (2012), pp. 89-106.
- [17] G.R. Mateus, F.R.B. Cruz, H.P.L. Luna. An Algorithm for Hierarchical Network Design, *Location Science*, 2-3 (1994), pp. 149-164.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] C.D. Randazzo, H.P.L. Luna. A Comparison of Optimal Methods for Local Access Uncapacitated Network Design, *Annals of Operations Research*, 106 (2001), pp. 263-286.
- [21] 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.
- [22] 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,
- [23] H.D. Sherali, Y. Lee, T. Park. New modeling approaches for the design of local access transport area networks, *European Journal of Operational Research*, 127 (2000), pp. 94-108,