

# **CHAPITRE IV. OPTIMISATION DE RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS**

Sommaire :

## **CHAPITRE IV. OPTIMISATION DE RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATIONS**

### **IV.1. CONTEXTE**

#### **IV.1.1. Environnement d'étude**

#### **IV.1.2. Champ d'étude et enjeux**

### **IV.2. PRINCIPAUX RÉSULTATS**

#### **IV.2.1. Apports en modélisation**

IV.2.1.1. Conception et planification de réseaux d'accès

IV.2.1.2. Qualité de service des réseaux maillés

IV.2.1.3. Optimisation du routage et réduction du nombre de chemins à qualité de service équivalente

IV.2.1.4. Recherche de solution équilibrée

#### **IV.2.2. Résultats théoriques**

IV.2.2.1. Qualité de service des réseaux maillés

IV.2.2.2. Optimisation du routage

IV.2.2.3. Réduction du nombre de chemins à qualité de service équivalente

IV.2.2.4. Recherche de solution équilibrée

IV.2.2.5. Conception et planification de réseaux d'accès

#### **IV.2.3. Résultats expérimentaux et retombées économiques**

IV.2.3.1. Conception et planification de réseaux d'accès

IV.2.3.2. Optimisation de la qualité de service dans le routage

### **IV.3. DIRECTIONS DE RECHERCHE FUTURES**

## IV.1. CONTEXTE

### IV.1.1. Environnement d'étude

Les premiers problèmes de réseaux de télécommunications que nous avons étudiés concernaient le réseau haut débit russe avec Eugene LEVNER, Jean-Marie PROTH et Vladimir VISHNEVSKY [3.2.5, 3.2.6]. Nous nous sommes intéressés dans ce cadre à la conception du réseau central maillé et à la localisation de concentrateurs. Evidemment, depuis mon arrivée à [Bouygues Telecom](#), nous avons poursuivi le travail sur ce sujet. Tout d'abord, j'ai eu la responsabilité du projet [METEOR-31](#), subventionné par le [RNRT](#) (Réseau National de Recherche en Télécommunications) avec [Alcatel](#), [Eurodecision](#), [Université d'Angers](#) <sup>23 24 25 26 27</sup> [6.1, 6.2, 6.3, 6.4]. Nous nous sommes concentrés sur la **planification de l'architecture et du dimensionnement du réseau d'accès mobile** prenant en compte l'évolution du trafic et l'introduction de nouvelles technologies. Eric JACQUET-LAGREZE et Laurent PAJOU d'[Eurodecision](#) [3.3.1, 3.4.4], Vincent BARICHARD et Jin-Kao HAO de l'[Université d'Angers](#), Thierry BENOIST <sup>28</sup>, François LABURTHE et Benoît ROTTEMBOURG [3.2.9, 3.2.13] du [e-lab](#), Frédéric DUIGOU [3.5.5] de [Bouygues Telecom](#) sont les personnes avec lesquelles j'ai le plus travaillé sur le sujet. Ces travaux ont alimenté le support de cours que j'ai dispensés à l'[ENST](#) (Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications), à l'[Université d'Angers](#) et à l'Université Paris Sud d'Orsay.

En 2000, Bénédicte VATINLEN et moi avons abordé les problèmes **d'optimisation du routage dans un réseau maillé IP** (pour *Internet Protocol*) sous protocole *OSPF* (pour *Open Shortest Path First*) alors que le problème n'avait pas encore été adressé dans les études scientifiques <sup>29</sup>.

---

<sup>23</sup> MORNET F., BLAIZOT C. (2000), "Routage et allocation de longueurs d'ondes dans un réseau WDM", rapport Alcatel du projet *Migration and Evolution of Telecom Equipments through Operation Research* ([METEOR-31](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), pp. 28.

<sup>24</sup> LE GALL A., PAJOU L. (2000), "Catalogue d'applications - Partie A, Etude bibliographique, (DS\_GEN\_A)", rapport Bouygues Telecom du projet *Migration and Evolution of Telecom Equipments through Operation Research* ([METEOR-31](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), pp. 29.

<sup>25</sup> LE GALL A. (2000), "Catalogue d'applications - Partie B, Applications (DS\_GEN\_B)", rapport Bouygues Telecom du projet *Migration and Evolution of Telecom Equipments through Operation Research* ([METEOR-31](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), pp. 34.

<sup>26</sup> JACQUET-LAGREZE E., PAJOU L. (2001), "Retour Expérience menées sur les classes d'applications (RE\_GEN)", rapport EuroDecision et annexes confidentielles du projet *Migration and Evolution of Telecom Equipments through Operation Research* ([METEOR-31](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), pp. 50 dont 35 d'annexes.

<sup>27</sup> PAJOU L., SAGER H. (2002), "Manuel Utilisateur du démonstrateur (BO\_MU)", rapport EuroDecision et annexes confidentielles du projet *Migration and Evolution of Telecom Equipments through Operation Research* ([METEOR-31](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), pp. 25.

<sup>28</sup> BENOIST T. (2004), "Relaxations et Décompositions combinatoires", thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon (France), 1<sup>er</sup> juin 2004.

<sup>29</sup> FORTZ B., THORUP M. (2000), "*Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights*", INFOCOM, 2000.

Ensuite nous avons étudié des problèmes de Plus Court Chemin [3.2.12, 3.4.5] avec Rabie NAIT-ABDALLAH. Il a également étudié les effets chaotiques des rafales de paquets sur le trafic de données tandis que Nicolas ENDERLE préparait sa thèse sur la qualité de service dans les réseaux avec émission des informations en paquets<sup>30</sup>. Bénédicte VATINLEN a débuté sa thèse CIFRE encadrée par Philippe CHRETIENNE du [LIP6](#) et moi sur l'optimisation de réseaux prenant en compte les contraintes de qualité de service<sup>31</sup>. Elle a soutenu sa thèse en septembre 2004. Nous sommes intéressés en particulier à la réduction du nombre de routes pour acheminer le trafic dans le réseau avec Philippe MAHEY [2.10, 3.2.16, 3.4.11, 3.4.13]. Des expérimentations ont été menées avec François CANTEAU ainsi que Laurent CHAUVIER et Arnaud RENAUD de la société [Artelys](#) [3.2.14, 3.4.7]. C'est dans ce contexte que nous avons démarré le projet [OPIUM](#), subventionné par le [RNRT](#), avec [Delta Partners](#), le [LAAS-CNRS](#) et le [LIMOS](#)<sup>32 33 34</sup> [6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10]. L'objet du projet était **d'évaluer la qualité de service et d'optimiser un réseau maillé IP** sous un protocole *MPLS (Multi-Protocol Label Switching)* et *DiffServ (Differentiated Services)*. Les principaux contributeurs ont été Pierre BACQUET de [Delta Partners](#), Charles BOCKSTAL, Olivier BRUN, Jean-Marie GARCIA et Anouar RACHDI [3.3.2] du [LAAS-CNRS](#), Christophe DUHAMEL et Philippe MAHEY [3.4.10] du [LIMOS](#), Simone FONTANA, Son NGUYEN-QUANG et Bénédicte VATINLEN de [Bouygues Telecom](#) [3.5.6].

Ces travaux ont été la source du programme d'enseignement intensif européen auquel j'ai participé sur l'acheminement de multiflots dans les réseaux télécoms [3.5.7]. En parallèle, nous avons proposé au [RNRT](#) un projet d'optimisation de la bande passante des réseaux mobiles en mode paquets avec Bruno BAYNAT et Guy PUJOLLE du [LIP6](#), Philippe NAIN de l'[INRIA](#), Jean-Marie GARCIA du [LAAS-CNRS](#), Alain JEAN-MARIE du [LIRMM](#), Pierre EISENMANN de [Nortel Networks](#), Jean-Michel PAROT de QoS-Design. J'ai aussi participé en tant que (seul) responsable industriel français d'activités de recherche à la proposition du réseau d'excellence européen *SAGA (Structural and AlGorithmic Aspects of communications networks)* mené par Afonso FERREIRA sur l'algorithmique et l'optimisation de réseaux de communications. En

---

<sup>30</sup> ENDERLE N. (2003), "La Qualité de Service (QoS) dans les réseaux paquets mobiles", thèse de doctorat, Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre [Bouygues Telecom](#) et l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunication ([ENST](#)), Paris (France), 2003.

<sup>31</sup> VATINLEN B. (2004), "Optimisation du routage dans les réseaux de télécommunications avec prise en compte de la qualité de service", thèse de doctorat, Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre [Bouygues Telecom](#) et le Laboratoire d'Informatique de Paris 6 ([LIP6](#)), Paris (France), 23 septembre 2004, pp. 254.

<sup>32</sup> GARCIA J.-M., BOCKSTAL C., BRUN O., GAUCHARD D. (2003), "Modélisation Différentielle du Trafic et Simulation Hybride distribuée (MD)", rapport public du projet Optimisation de la Planification des Infrastructures des réseaux Mobiles ([OPIUM-69](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), pp. 43.

<sup>33</sup> GARCIA J.-M., BOCKSTAL C., BRUN O. (2003), "Modélisation des mécanismes de gestion des priorités (MM)", rapport public du projet Optimisation de la Planification des Infrastructures des réseaux Mobiles ([OPIUM-69](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), juin 2003, pp. 20.

<sup>34</sup> DUHAMEL C., MAHEY P. (2003), "Rapport Intermédiaire 3 de Fin de Sous-Projet 4 (RI3). Descriptif des 3 prototypes des Algorithmes d'Optimisation (AO1, AO2, AO3) pour respectivement l'architecture, le dimensionnement et le routage", rapport public du projet Optimisation de la Planification des Infrastructures des réseaux Mobiles ([OPIUM-69](#)) du Réseau National de Recherche en Télécommunications ([RNRT](#)), pp. 18.

2003-2004, nous avons proposé une méthode pour reconstruire (dans un réseau maillé interconnecté) les volumétries de trafic en fonction des destinations avec Anthony MOISAN et Bénédicte VATINLEN. A partir de ce travail, nous avons, avec Alexandre MEYRIGNAC, développé un outil de prévision du trafic par ligne de marché, par région.

#### IV.1.2. Champ d'étude et enjeux

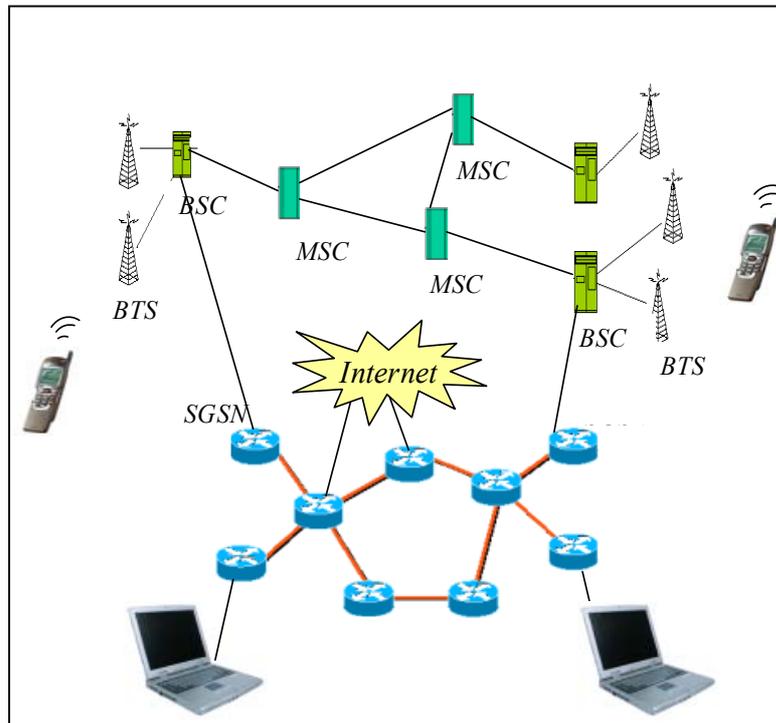


Figure IV.1 : Le réseau mobile

Le réseau d'un opérateur de téléphonie mobile comme [Bouygues Telecom](#)<sup>35</sup> est constitué de deux sous-réseaux principaux. Le premier sous-réseau est le **réseau d'accès** qui permet de drainer les communications à travers différents niveaux de concentrateurs successifs présentés sur la Figure IV.1. Ces équipements sont les *BTS* (*Base Transceiver Station*), les *BSC* (*Base Station Controller*), les *MSC* (*Mobile Switching Center*) reliés au cœur de réseau voix et les *SGSN* (*Service GPRS Support Node*) connectés aux réseaux de données. Sa structure est arborescente et a pour objet de couvrir au mieux le territoire à moindre coût.

Le second sous-réseau est un ensemble de **réseaux maillés**, qui sont aujourd'hui spécialisés par type de trafic (voix, données...) et sont interconnectés à d'autres réseaux (concurrents mobiles, fixes, étrangers...). Leur maillage permet d'offrir souplesse et robustesse pour pallier les risques de pannes et les pics de trafic. Pour mutualiser les coûts de d'infrastructure, les réseaux maillés, spécialisés jusqu'alors, convergent vers une unique technologie celle d'*IP* (*Internet Protocol*) supportant les différents trafics (voix, données, image...). Ces trafics véhiculés entre des

---

<sup>35</sup> LAGRANGE X., GODLEWSKI P., TABBANE P. (1999), "Réseaux GSM – DCS", 4<sup>ème</sup> édition revue et augmentée, Hermès Science Publications.

équipements variés (téléphones, ordinateurs, serveurs...) sont d'usage divers (conversationnel, interactif, téléchargement, de fond). Afin d'offrir une qualité de service adaptée à chaque utilisation, il est nécessaire de différencier chaque classe de service dans le réseau, voire de les acheminer par des routes spécifiques (depuis leur entrée dans le réseau jusqu'à leur destination). Pour chaque besoin (ou demande), nous cherchons le routage optimisant sa qualité de service.

## **IV.2. PRINCIPAUX RESULTATS**

### **IV.2.1. Apports en modélisation**

#### **IV.2.1.1. Conception et planification de réseaux d'accès**

Dans le cadre de l'explosion de la téléphonie cellulaire et de l'avènement de nouveaux standards radio comme *GPRS (General Packet Radio Service)* et *UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)*, [Bouygues Telecom](#) doit planifier l'évolution de son réseau mobile de manière à supporter les évolutions futures du trafic et l'intégration des nouvelles technologies. Aussi pour superviser le réseau et avoir un outil d'aide à la gestion automatique du réseau nous avons cherché le jeu de modifications à apporter au réseau radio de telle sorte que :

- la qualité attendue de couverture du territoire et de transmission des appels soit garantie,
- les contraintes budgétaires et de charge de travail soient respectées,
- le coût induit soit le plus faible possible (incluant investissement, amortissement et fonctionnement).

#### **IV.2.1.2. Qualité de service des réseaux maillés**

L'intérêt principal de mailler des réseaux est de les rendre robustes aux aléas tout en évitant de dupliquer les infrastructures. Pour offrir la qualité de service attendue en toute circonstance, on ne peut plus appréhender le dimensionnement des réseaux en agrégeant l'ensemble des trafics. Il devient nécessaire de traiter chaque type de trafic de manière différenciée. Les 3 critères que nous avons retenus [\[3.3.2\]](#) pour optimiser le routage du trafic sont :

- **le *délai*** (i.e. temps de transfert d'un flux entre son entrée et sa sortie du réseau),
- **la *perte*** (i.e. proportion de flux non acheminée dans le réseau),
- **la *gigue*** (i.e. délai en sortie du réseau pour absorber les aléas et restituer un flux continu). La gigue est caractérisée par la variabilité du délai de transfert.

Les analyses faites sur le trafic *Internet* des réseaux filaires ont montré l'existence de corrélations sur de longues périodes de temps, et suggéré la présence d'autosimilarité (trafic dit " fractal ") ou de non-stationnarité. Quoi qu'il en soit en réalité, il est clair que le trafic réel résulte de la superposition de phénomènes agissant à différentes échelles de temps. D'autres résultats expérimentaux montrent que cette dépendance à long terme a une influence importante sur les mesures de qualité de service. Il est donc important de trouver des modèles de trafic capables de rendre compte fidèlement de ces phénomènes. Paradoxalement, peu d'études ont été réalisées sur

le trafic des réseaux d'accès et encore moins sur de tels réseaux mobiles. Or celui-ci est a priori très différent de celui de l'*Internet* fixe du fait de ses contraintes particulières : le débit pour l'utilisateur final est relativement faible, variable et imprédictible ; le temps de latence est élevé ; la tarification se fait généralement au volume ou au forfait basé sur des valeurs maximales de volumes ; enfin l'ergonomie des terminaux est particulière. Ainsi, il est probable qu'il ne se comporte pas comme le trafic *Internet* sur les réseaux filaires et qu'il soit de distribution à queue légère (i.e. par opposition aux trafics autocorrélés dits de distribution à queue lourde). Des analyses que nous avons réalisées en 2001 à [Bouygues Telecom](#) ont **montré que ces trafics ne comportaient pas de corrélations sur de longues périodes de temps**, en particulier le trafic *WAP* (i.e. *Wireless Application Protocol* qui définit une architecture applicative et des protocoles réseaux permettant à des dispositifs mobiles d'accéder à des réseaux *Internet*). C'est pourquoi nous avons fait l'hypothèse dans la suite de nos études que des **corrélations à long terme n'existaient pas** et que le trafic issu des réseaux mobiles suivait des lois générales indépendantes.

#### IV.2.1.3. Optimisation du routage et réduction du nombre de chemins à qualité de service équivalente

Certains protocoles *IP* comme *OSPF* ou *MPLS* (*Multi-Protocol Label Switching*) induisent des contraintes spécifiques sur les routes acheminant le trafic de leur origine à leur destination dans le réseau. En particulier nous considérons les situations où un nombre limité de routes est admis.

Tout d'abord, nous nous sommes intéressés aux situations de :

- **multiroutage**, où le nombre de routes pour acheminer le trafic n'est pas limité,
- **k-routage**, où pour acheminer le trafic de chaque origine à chaque destination, seulement  $k$  routes sont permises,
- **monoroutage**, où une unique route est admise pour acheminer le trafic de chaque origine à chaque destination.

La situation de multiroutage n'induit pas de contrainte spécifique au modèle de routage et est celle que l'on trouve le plus généralement dans les études scientifiques. Le monoroutage peut être abordé par un modèle linéaire en nombres entiers et est relativement abordé. Le  $k$ -routage<sup>36</sup> a été très peu abordé et nécessite des modèles spécifiques. Nous avons proposé de **réduire le nombre de chemins permettant d'acheminer le trafic** et ce, **sans modifier la qualité de service**. En effet, la qualité de service (telle que nous l'avons abordée) ne dépend que de la charge de chaque lien. Or pour une même répartition du flot sur les liens, il existe généralement une infinité de plans de routage possible. Aussi nous avons cherché à **décomposer chaque flot dans le réseau en un ensemble de chemins le plus réduit possible**.

Plusieurs intérêts opérationnels ont motivé ce travail. En réduisant le nombre de chemins, la gestion et l'administration du réseau s'en trouvent facilitées. De plus, moins le nombre de

---

<sup>36</sup> BAIER G., KOHLER E., SKUTELLA M. (2002), "On the  $k$ -splittable flow problem", *Lecture Notes in Computer Science*, 2461, Rome (Italie).

chemins est important, plus les tables de routage sont petites et plus la commutation des paquets est rapide en chaque *routeur*.

#### IV.2.1.4. Recherche de solution équilibrée

Pour prendre en compte la qualité de service, on fixe parfois des bornes sur les indicateurs de qualité de service. Ces contraintes qu'il faut satisfaire à tout prix sont trop fortes. En effet, l'administrateur du réseau voudra fournir une solution même si elle doit violer certaines contraintes. Aussi plutôt que de fixer des contraintes dures, les critères de qualité de service peuvent être pris en compte dans le critère d'optimisation plutôt que dans les contraintes.

On peut chercher à optimiser une valeur moyenne telle qu'une somme pondérée des valeurs de variables de décision. C'est le cas de la minimisation du délai moyen  $\sum_{p \in P} \pi_p D_p$ , où  $\pi_p$  et  $D_p$  représentent respectivement la proportion de trafic et le délai du chemin  $p$ . Le désavantage de tel **critère de sommation** est de permettre de compenser certaines décisions par d'autres et ainsi de donner la possibilité **de dégrader fortement la qualité de service de certaines parties du réseau**. Dans notre cas, le délai de certains chemins (en particulier ceux où la proportion de trafic est faible) va être dégradé pour que le délai moyen puisse être amélioré.

La relaxation lagrangienne des contraintes de qualité de service est également un critère de sommation. On essaie ainsi de réduire le dépassement des indicateurs de qualité de service par rapport aux bornes. Typiquement on utilise la fonction de Lagrange  $\sum_{p \in P} \lambda_p (D_p - d_{\max})$  où  $\lambda_p$  est le multiplicateur lagrangien qui pénalise le dépassement du délai  $D_p$  obtenu sur le chemin  $p$  par rapport au délai maximum  $d_{\max}$  autorisé. En plus du désavantage des critères de sommation, les **modèles de relaxation lagrangienne ne garantissent pas d'obtenir une solution réalisable** (i.e. qui satisfassent les contraintes de qualité de service).

Une autre approche consiste à minimiser la plus grande valeur induite sur des indicateurs par les variables de décision. Par exemple on minimise le délai maximum  $\max_{p \in P} (D_p)$  où  $D_p$  est le délai obtenu sur tout chemin  $p$ . L'inconvénient d'optimiser un tel critère basé sur un *extremum* est qu'il peut exister de nombreuses solutions optimales. Pour autant toutes **ces solutions ne sont pas équivalentes du point de vue de la qualité de service délivrée aux utilisateurs**. En effet, seules certaines variables de décision ne peuvent être modifiées sans dégrader la valeur de l'*extremum* (dans notre exemple celles des chemins dont le délai est maximal). Elles sont dites *critiques*.

**Pour remédier à cet inconvénient et profiter de la flexibilité restante sur les variables de décision, nous avons utilisé la notion de solution équilibrée**<sup>37</sup>. L'idée consiste simplement à appliquer de nouveau le critère basé sur un *extremum* aux variables de décision encore libres. Aussi au lieu de chercher une solution optimale, nous recherchons une solution *équilibrée*. Nous définissons comme une solution équilibrée par rapport au critère de délai maximum d'un chemin,

---

<sup>37</sup> KELLY F. (2003), "Fairness and stability of end-to-end congestion control", *European Journal of Control*, Vol. 9, pp. 159-176.

une solution pour laquelle le délai de tout chemin ne peut être diminué sans augmenter celui d'un chemin dont le délai est plus important. Cette notion d'équilibre est **générique** au sens où elle peut être utilisée pour des critères autres que le délai maximum. Elle garantit d'obtenir une solution réalisable si elle existe et, sinon, une solution qui viole le moins possible les indicateurs de qualité de service autorisés. **Elle évite de dégrader trop fortement certaines parties du réseau pour en améliorer d'autres où la qualité est déjà satisfaisante.** Enfin toutes les variables de décision d'une solution équilibrée sont *critiques* (i.e. leur valeur est unique).

### IV.2.2. Résultats théoriques

#### IV.2.2.1. Qualité de service des réseaux maillés

Un outil de simulation validé et calibré par des mesures sur des équipements réels a été développé par l'équipe du [LAAS-CNRS](#) pour mesurer de manière précise les indicateurs de qualité de service dans les réseaux. Pour éviter des temps de calcul prohibitifs, une méthode hybride <sup>38</sup> [3.3.2] de simulation combinant la simulation événementielle et des évaluations analytiques (d'équipements et de flux) a été réalisée.

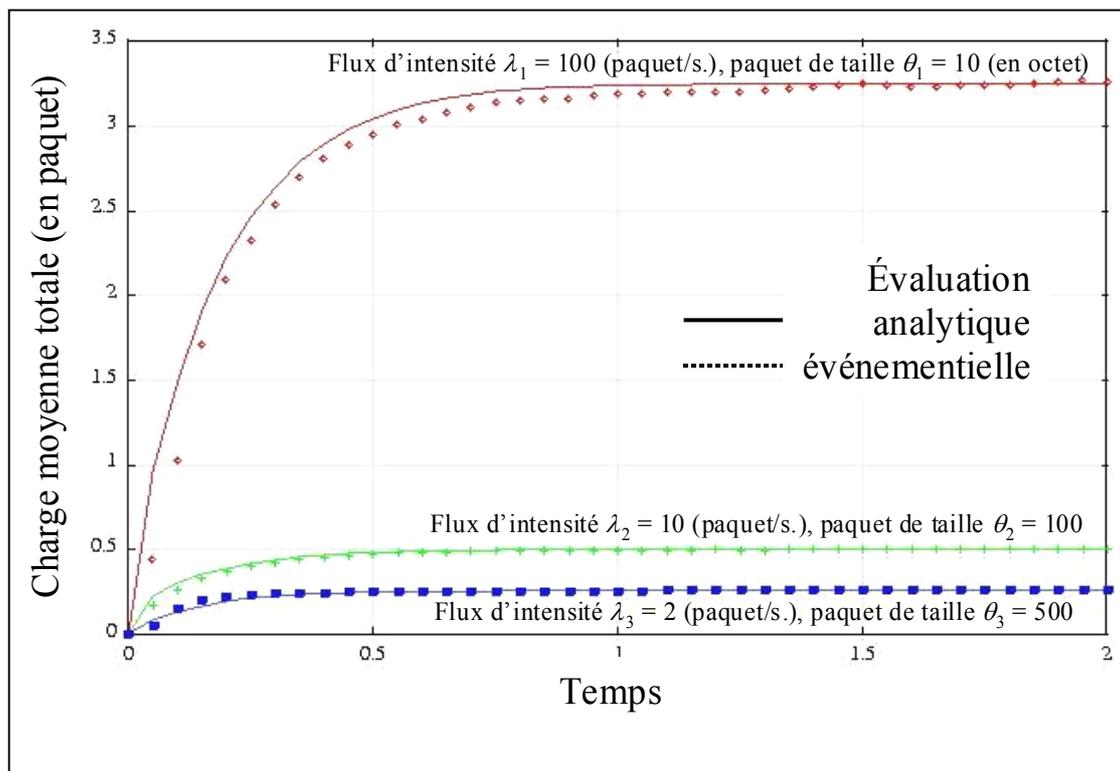


Figure IV.2 : Charge d'une file FIFO  $M^3/D^3/1$ , en régime stationnaire et transitoire

Afin d'optimiser le délai, la perte et la gigue, des évaluations analytiques des critères de qualité

<sup>38</sup> GAUCHARD D. (2003), "Simulation hybride *IP-DiffServ-MPLS* multiservices sur un environnement d'exécution distribué", thèse de doctorat, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du Centre National de la recherche Scientifique ([LAAS-CNRS](#)), Toulouse (France), 2003.

de service ont aussi été proposées par l'équipe du [LAAS-CNRS](#). Les formules obtenues sont exactes pour les équipements les plus simples et sont approchées pour les équipements les plus complexes. La Figure IV.2 présente la comparaison d'évaluation analytique et celle obtenue par simulation événementielle. L'évaluation présentée est la charge d'un système depuis une charge nulle jusqu'à un niveau établi, mettant en exergue la qualité des résultats analytiques tant en régime transitoire que permanent. L'expérimentation concerne une file où les paquets des 3 classes de service sont servis dans l'ordre d'arrivée. Les arrivées des 3 classes se font de manière indépendante du temps avec des intensités respectives  $\lambda_1 = 100$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 2$  paquets par seconde, chacun des paquets ayant pour taille respective  $\theta_1 = 10$ ,  $\theta_2 = 100$ ,  $\theta_3 = 500$  octets. Aussi les 3 flux représentent le même débit d'informations mais chacun est découpé en des paquets plus ou moins gros. Le taux de service est déterministe ( $\sigma_j = 0$ ) et de valeur  $\mu_1 = 4000$ ,  $\mu_2 = 400$  et  $\mu_3 = 200$  paquets par seconde, soit un taux constant de  $\mu = 40\,000$  bps (pour chacune des classes). L'approximation de la charge moyenne totale de la  $k$ -ième classe de service proposée

[3.3.2] est 
$$X_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k} + \lambda_k \frac{\sum_{j=1}^K \sigma_j^2 \lambda_j}{2 - 2\rho}$$
 avec  $\rho = \sum_{j=1}^K \frac{\lambda_j}{\mu_j}$ , à savoir  $X_1 = 3,25$ ,  $X_2 = 0,5$  et  $X_3 = 0,26$

paquet, tandis que les délais moyens induits sont  $T_k = X_k / \lambda_k$ , et dans notre cas  $T_1 = 0,0325$ ,  $T_2 = 0,05$ ,  $T_3 = 0,13$  s. Autrement dit, **les petits paquets s'écoulent plus vite que les gros**.

Ils permettent d'appréhender  $k$  trafics exponentiels différents arrivant dans un équipement. L'hypothèse d'indépendance par rapport au temps du trafic a été validée expérimentalement. Cette hypothèse est d'autant plus réaliste que le réseau est fortement maillé et que les trafics arrivant à un équipement proviennent d'équipements différents. Le traitement des flux au niveau du serveur est différencié pour chaque type de trafic et se fait selon une loi générale. Les files de chaque flux ont des capacités limitées et la capacité totale  $N$  de l'équipement est partagée entre les flux. L'équipement permet de donner la priorité à certains flux sans préemption possible et de gérer les autres flux en partageant de manière pondérée la bande passante (suivant le système *Weighted Fair Queueing*). Aussi **les modèles les plus perfectionnés proposés correspondent à des files  $M^k / GI^k / 1 / N + N^k / \text{Prio} + WFQ$**  [3.3.2] (selon la notation de Kendall <sup>39 40</sup>).

Nous avons également proposé **des méthodes d'agrégation (en série et en parallèle) de ces indicateurs** dans chaque équipement. Elles permettent d'évaluer d'une part la qualité de service de bout en bout sur chaque route d'un flux acheminé dans le réseau <sup>31 (p : 3)</sup>. D'autre part elles permettent d'apprécier la qualité de service d'un flux (acheminé par plusieurs routes) ou du réseau. Nous avons démontré que **le modèle d'évaluation du délai moyen de bout en bout** des flux (par un modèle dit *arc / chemin*) était équivalent à un modèle où les estimations du délai sont réalisées **sur chaque équipement de manière agrégée pour tout le trafic** <sup>41</sup> qu'il supporte [3.2.14, 3.4.7] (par un modèle dit *arc / sommet*). Cette propriété nous a permis de réduire de manière drastique les modèles à une taille qui ne dépend que du nombre d'arcs et de nœuds du réseau. D'autres résultats d'équivalence entre différents critères ont été démontrés [3.2.14, 3.4.7].

<sup>39</sup> KLEINROCK L. (1975), "*Queueing Systems. Volume I: Theory*", Wiley - Interscience Publication.

<sup>40</sup> KLEINROCK L. (1976), "*Queueing Systems. Volume II: Computer applications*", Wiley-Interscience Publication.

<sup>41</sup> BERTSEKAS D. P., GALLAGER R. G. (1987), "*Data Networks*", Prentice Hall.

## IV.2.2.2. Optimisation du routage

Nous avons proposé un algorithme polynomial résolvant le problème classique de **Plus Court Chemin** (PCC) en présence de circuits et de coûts arbitraires. Cet algorithme de type *primal-dual* est basé sur les recherches successives de PCC dans des graphes où tous les coûts sont rendus positifs. Pour un graphe de  $n$  sommets et  $m$  arcs, l'algorithme est en  $O(m)$  si le graphe est acyclique, en  $O(m+n \log n)$  si tous les coûts sont positifs et en  $O(m n)$  pour des graphes arbitraires dont le nombre d'arcs est supérieur à  $O(m+n \log n)$ . De plus l'algorithme est particulièrement bien **adapté à des graphes ayant peu de circuits** contrairement à l'algorithme de Bellman-Ford-Moore <sup>21 (p.3)</sup> [3.2.12, 3.4.5].

Etant donné que nous voulions optimiser plusieurs indicateurs de qualité de service (délai, perte et gigue) qui ne sont a priori pas indépendants, nous avons recherché dans quel cadre l'optimisation d'un critère pouvait optimiser un autre critère. Nous avons démontré que **le plus court chemin au sens de deux fonctions de coûts  $c_e$  et  $d_e$  sur chaque arc  $e$  avec  $d_e = f(c_e)$  est le même pour tout graphe** si et seulement si **la fonction  $f$  est croissante et  $\forall c, \forall c', f(c + c') = f(c) + f(c')$** . Cette condition étant rarement vérifiée dans la pratique, l'optimisation simultanée de plusieurs critères de qualité de service n'est pas immédiate...

Pour déterminer le plan de routage minimisant le délai moyen dans un réseau, nous avons appliqué un algorithme de gradient étant donné que le modèle est convexe [3.2.14, 3.4.7]. Plus généralement, nous avons étudié la minimisation d'une fonction séparable sur les arcs définie comme une somme de fonctions dépendants du flux de chaque arc, formellement :

$$\text{Équation IV.1 : } \min \sum_{e \in E} f_e(\{x_e^u\}_{u \in U})$$

où  $x_e^u$  est la **quantité de la demande  $u$  supportée par l'arc  $e$**  ;  $\{x_e^u\}_{u \in U}$  représente l'ensemble des demandes supportées par l'arc  $e$  ;  $f_e$  désigne une **fonction à optimiser dépendant de l'arc  $e$**  définie sur l'ensemble des valeurs  $\{x_e^u\}_{u \in U}$ . Les contraintes de conservation de flots s'écrivent :

$$\text{Équation IV.2 : } \forall v \in V, \forall u \in U, \sum_{e \in v^+} x_e^u - \sum_{e \in v^-} x_e^u = q_u \delta_v^u$$

où  $V$  et  $U$  sont l'**ensemble des sommets du réseau et des demandes** à router dans le réseau ;  $q_u$  exprime la **quantité à router pour chaque demande  $u$**  ;  $\delta_v^u$  est l'**indicateur qui vaut 1 si le sommet  $v$  est l'origine de  $u$ , -1 si  $v$  est la destination de  $u$  et 0 sinon** ; les ensembles  $v^+$  et  $v^-$  représentent l'ensemble des arcs sortants et entrants dans le sommet  $v$ . La minimisation de l'Équation IV.1 sous la contrainte donnée par l'Équation IV.2 induit que :

$$\text{Équation IV.3 : } \frac{\partial L(x_e^u \geq 0; \lambda_v^u)}{\partial x_e^u} = \frac{\partial f_e}{\partial x_e^u}(x_e^u) + \lambda_{e^-}^u - \lambda_{e^+}^u = 0$$

où  $L(x_e^u \geq 0; \lambda_v^u) = \min \sum_{e \in E} [f_e(x_e^u)] + \sum_{u \in U} \sum_{v \in V} \left[ \lambda_v^u \left( \sum_{e \in v^+} x_e^u - \sum_{e \in v^-} x_e^u - q_u \delta_v^u \right) \right]$  est la **fonction de**

**Lagrange** ;  $\lambda_v^u$  représente le **multiplicateur de Lagrange** associé à la contrainte de conservation

du flot  $u$  au niveau du sommet  $v$  ;  $\frac{\partial f_e}{\partial x_e^u}(x_e^u)$  est la dérivée partielle de la fonction  $f_e$  par rapport à  $x_e^u$  ; les sommets  $e^-$  et  $e^+$  sont l'origine et la destination de l'arc  $e$ . L'Équation IV.3 implique que pour la solution minimale de l'Équation IV.1 vérifiant la contrainte de l'Équation IV.2, il existe des valeurs pour les multiplicateurs  $\lambda_{e^-}^u$  et  $\lambda_{e^+}^u$  telles que leur écart est égal au gradient  $\frac{\partial f_e}{\partial x_e^u}(x_e^u)$

de la fonction sur l'arc correspondant. De plus, **pour tout chemin  $p$  acheminant la demande  $u$  entre les sommets  $s$  à  $t$ , la somme des gradients sur chacun des arcs de  $p$  est constante** et vaut :  $\lambda_t^u - \lambda_s^u = \sum_{e \in p} \frac{\partial f_e}{\partial x_e^u}(x_e^u)$ . Dans le cas de minimisation du délai moyen, la fonction à optimiser

sur l'arc  $e$  est  $f_e(\{x_e^u\}_{u \in U}) = \frac{\sum_{u \in U} x_e^u}{C_e - \sum_{u \in U} x_e^u}$ . Par conséquent on a :  $\frac{\partial f_e}{\partial x_e^u}(x_e^u) = \frac{C_e}{\left(C_e - \sum_{u \in U} x_e^u\right)^2}$ , où  $C_e$

exprime la **capacité de l'arc  $e$** . Notons que, pour le délai moyen, la fonction  $f_e$  tend vers l'infini pour des valeurs proches de la capacité de l'arc :  $f_e(x) \rightarrow +\infty$  quand  $x \rightarrow C_e$ . Cette propriété induit que la contrainte de capacité de l'arc  $e$  n'est pas saturée :  $\forall e \in E, \sum_{u \in U} x_e^u < C_e$  pour le routage

optimal.

En présence de la contrainte supplémentaire de *monoroutage* (i.e. où une seule route peut être utilisée pour chaque demande à acheminer dans le réseau), nous avons **développé une méthode d'arrondi aléatoire**<sup>42</sup> du plan de routage optimal en *multiroutage* (i.e. sans contrainte sur le nombre de routes). Nous avons également proposé **une méthode de déviation de flot intégrant la contrainte de limitation du nombre de routes acheminant le trafic** [3.4.10]. L'étude se base sur les propriétés liant le problème de *congestion minimale* (où la capacité des arcs est réduite uniformément le plus possible) avec le problème du *flot maximal concurrent* (où les demandes sont augmentées uniformément le plus possible). Enfin quand la qualité de service est bornée sur chaque chemin, nous avons proposé une méthode basée sur la relaxation lagrangienne des contraintes de qualité de service de bout en bout.

#### IV.2.2.3. Réduction du nombre de chemins à qualité de service équivalente

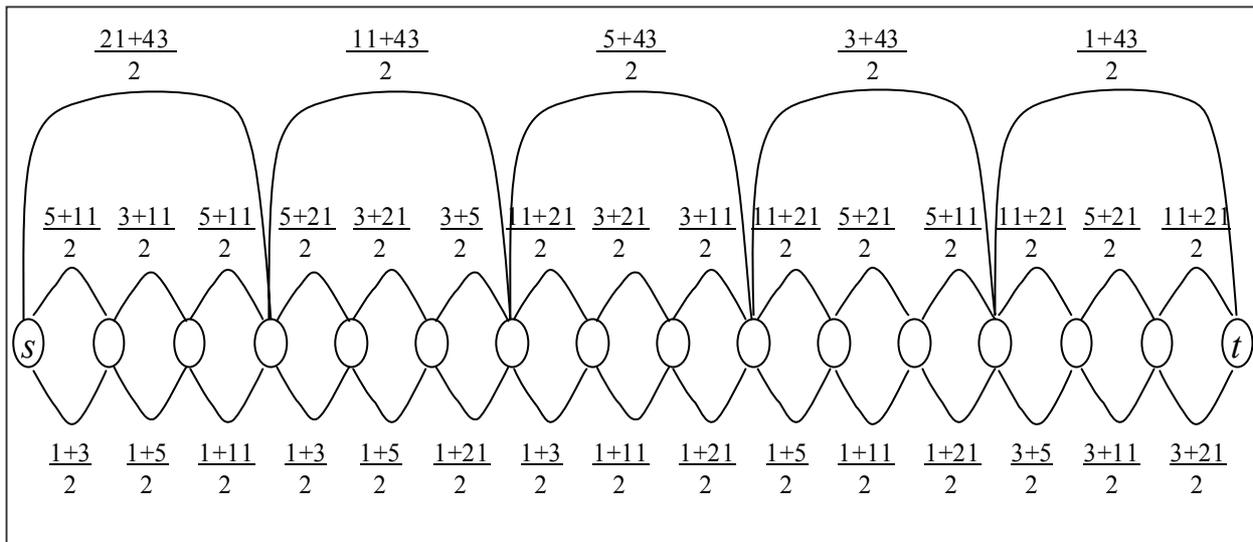
Nous avons **défini formellement le problème de décomposition d'un flot en un nombre minimal de chemins** désigné *MSPF*, *Minimal Set of Paths for a Flow* [2.10, 3.2.16, 3.4.11, 3.4.13]. Ce problème revient à déterminer, **pour un modèle arc/sommet** (i.e. où des contraintes en chacun des nœuds assurent la conservation de flot acheminé par les arcs du réseau), **le modèle arc/chemin correspondant** (i.e. où des contraintes assurent la répartition du flot sur les chemins définis explicitement par les arcs les constituant) **le plus compact** (ayant le moins de chemins). Nous avons prouvé que ***MSPF* est NP-difficile au sens fort**, à partir du problème *3-partition*

<sup>42</sup> RAGHAVAN P. (1994), "Randomized Approximation Algorithms in Combinatorial Optimization", research report, IBM Research Division, Yorktown (Etats-Unis), RC 19707 (87324) 8/8/94, pp. 25.

(i.e. qui consiste à déterminer si on peut répartir des 3  $m$  éléments en  $m$  ensembles disjoints de même taille <sup>4 (p:3)</sup>). Ce résultat est également vrai même si les routes par lesquelles le trafic peut être acheminé sont données.

Nous avons caractérisé certaines propriétés relatives à l'énoncé de *MSPF*. Nous avons démontré que **si le critère d'optimisation est strictement croissant par rapport au flot porté par chaque arc, alors aucune décomposition du flot ne contient de circuit** [2.10, 3.2.16, 3.4.11, 3.4.13]. A partir de ce résultat, nous avons défini la notion de *flot (s-t)-dirigé*, comme un flot entre les sommets  $s$  et  $t$  pour lequel le graphe support est sans circuit. Les flots  $(s-t)$ -dirigés (et seulement ceux-là) ne peuvent être décomposés que par des chemins entre les sommets  $s$  et  $t$ .

Nous avons recherché des propriétés pour caractériser un ensemble minimal de chemins. Nous avons prouvé que **les chemins d'un plan de routage minimal sont indépendants** [2.10, 3.2.16, 3.4.11, 3.4.13]. Le plan de routage minimal reste optimal si on multiplie toutes les valeurs de flot sur les arcs par une valeur positive non nulle. Un plan de routage où tous les **chemins sont indépendants est, au pire, à  $(nm - m - n^2 + 3n - 2) / m$  fois le nombre minimal de chemins** (pour un flot comportant  $m$  arcs et  $n$  nœuds).



**Figure IV.3 : Ensemble minimal de chemins non entiers et non saturants**

Nous avons étudié les plans de routage obtenus par la décomposition de flot <sup>21 (p:3)</sup> en une succession de chemins *élémentaires* (i.e. ne passant qu'une seule fois par chaque nœud) *saturants* (i.e. occupant totalement) chacun la capacité résiduelle d'un nouvel arc. Un tel plan de routage est dit *saturant*. **Les chemins d'un plan de routage saturant sont indépendants**. De manière contre intuitive, nous avons démontré que **le plan de routage minimal n'est pas nécessairement saturant** (comme le montre le contre-exemple de la Figure IV.3) [2.10, 3.2.16, 3.4.11, 3.4.13]. Sur la Figure IV.3, la somme de valeurs données sur chaque arc correspond à l'addition des flux des chemins qui traversent cet arc. Par exemple, sur le premier arc, la valeur  $\frac{21+43}{2}$  signifie qu'il est traversé par les chemins de valeurs  $\frac{21}{2}$  et  $\frac{43}{2}$ .

Nous avons étudié les chemins décomposant un flot de valeurs entières sur tous les arcs et de plus grand diviseur commun égal à 1. De manière contre intuitive, nous avons démontré que dans cette situation, **les chemins d'un plan de routage minimal ne sont pas nécessairement tous entiers** (comme le contre-exemple de la Figure IV.3) [2.10, 3.2.16, 3.4.11, 3.4.13]. Un plan de routage où tous les **chemins sont entiers se monte, au pire, à  $R$  fois** le nombre minimal de chemins (où l'arc de plus grande valeur vaut  $R$ ).

Nous avons également cherché à encadrer par des bornes  $N^*$ , le nombre minimal de chemins décomposant un flot. Nous avons :  $N^* \leq m - n + 2$  (pour un flot comportant  $m$  arcs et  $n$  nœuds) et  $N^* \leq 1 + F - r$  (pour un flot de valeur  $F$  et où l'arc de plus petite valeur vaut  $r$ ). A l'opposé, le nombre minimal de chemins est supérieur au nombre minimal de chemins couvrant les arcs du flot. Nous avons :  $N^* \geq \lceil m / (n - 1) \rceil$  et  $N^* \geq 1 + \lceil (F - r) / R \rceil$  (où l'arc de plus grande valeur vaut  $R$ ). **Toutes ces bornes sont atteintes.**

Nous avons montré que les algorithmes classiques (comme ceux générant des chemins améliorants pour maximiser le flot <sup>21 (p: 3)</sup>) ne génèrent pas systématiquement des chemins indépendants. Aussi nous avons proposé des heuristiques décomposant le flot en une succession de chemins élémentaires saturant chacun la capacité résiduelle d'un nouvel arc. Les chemins obtenus sont indépendants et même entiers quand le flot sur tous les arcs est de valeur entière. **Les algorithmes nécessitent  $O(mn)$  calculs élémentaires** quand les chemins successifs générés sont **les plus courts chemins** et  **$O(m^2)$  calculs élémentaires** sont **de flux maximal**.

#### IV.2.2.4. Recherche de solution équilibrée

Nous nous sommes intéressés aux plans de routages *équilibrés* par rapport au critère de bande passante relative maximum d'un arc, i.e. un plan de routage pour lequel la bande passante relative de tout arc ne peut être diminuée sans augmenter celle d'un arc dont la bande passante est plus importante. Nous avons proposé un **algorithme polynomial permettant de déterminer un tel plan de routage équilibré** <sup>31 (p: 3)</sup>. Il consiste tour à tour à minimiser la bande passante relative la plus importante des arcs encore libres et à déterminer les arcs *critiques* (i.e. dont la bande passante ne peut plus être réduite en deçà) qui doivent être fixés. Par construction, tous les arcs d'un plan de routage équilibré sont critiques et la bande passante relative maximale obtenue sur le réseau ne peut être réduite.

Nous avons prouvé récemment que dans un tel plan de routage équilibré, **les bandes passantes relatives maximales obtenues sur les chemins sont identiques pour tous les chemins acheminant une même demande**. Cette propriété très forte illustre l'équilibre atteint. En particulier, cette propriété permet de définir la notion de *demandes goulet*, qui sont les demandes routées via les arcs de bande passante relative maximale. En effet, ces demandes n'utilisent que des routes empruntant un arc dont la bande passante est maximale. Les propriétés ci-dessus ont été étendues à d'autres critères tels que la minimisation de la bande passante maximale, la maximisation de la bande passante *résiduelle* minimale (i.e. bande passante non occupée).

Nous avons démontré qu'un **plan de routage équilibré reste équilibré pour toute augmentation uniforme du trafic** (i.e. dans la même proportion pour toutes les demandes). Cette propriété amène au plan de routage une grande robustesse vis-à-vis des variations uniformes du trafic que l'on observe au cours du temps.

## IV.2.2.5. Conception et planification de réseaux d'accès

Nous avons proposé de concevoir et de dimensionner l'ensemble du réseau d'accès mobile par un **modèle de localisation de concentrateurs multi-niveaux**<sup>43</sup>. Ce problème est NP-difficile au sens fort car il contient en particulier les problématiques d'*arbres de Steiner*<sup>4 (p: 3)</sup> (i.e. déterminer l'arbre de poids minimum couvrant un ensemble de sommets donnés). Nous l'avons abordé par la relaxation lagrangienne avec le **e-lab** [3.2.9, 3.2.13, 3.3.1, 3.4.4] inspirée de celle proposée par Beasley pour les arbres de Steiner<sup>44</sup>.

Notre modèle consiste tout d'abord à ajouter des liens fictifs entre la racine  $s$  qu'est le cœur de réseau et tous les équipements. Les contraintes (similaires à celles proposées par Beasley<sup>44</sup>) assurent qu'un lien fictif n'est utilisé que si l'équipement n'est pas installé. Par exemple, si le *BSC*  $b$  n'est pas installé, alors le lien fictif entre la racine  $s$  et le *BSC*  $b$  existe et le booléen correspondant  $y_{s,b}$  vaut 1. Inversement si cet équipement  $b$  est installé, il est connecté à un et un seul *MSC* de ceux à proximité  $M_b$ ; un des booléens correspondants vaut alors  $\sum_{m \in M_b} y_{m,b} = 1$ . Aussi

la contrainte de Beasley  $y_{s,b} + \sum_{m \in M_b} y_{m,b} \leq 1$  (du fait que l'on cherche à minimiser les coûts d'infrastructure) induit qu'une seule de ces deux situations est possible.

Ensuite nous avons relâché et pénalisé par des multiplicateurs lagrangiens, différentes contraintes : les contraintes de Beasley, les contraintes interdisant que le trafic capté par le réseau soit supérieur à la demande issue de chaque zone, les contraintes assurant que la configuration des équipements choisie est compatible avec la structure du réseau... Ainsi nous avons rendu indépendants les sous-problèmes faciles à résoudre qui suivent :

- problème de ***couverture minimale d'arborescence*** définissant la **topologie du réseau**,
- problème de ***sac à dos*** permettant de **déterminer la meilleure configuration** de chaque équipement et de **répartir le trafic issu des zones aux antennes**.

Cette décomposition par les prix nous a permis d'aborder le problème de conception et de dimensionnement du réseau d'accès [3.2.9, 3.2.13, 3.3.1, 3.4.4]. Sur la base de cette relaxation lagrangienne, nous avons développé **une recherche arborescente dite de *Relax and regret***. Les branchements correspondent aux choix les moins regrettables et la borne lagrangienne permet d'éviter d'explorer explicitement toutes les solutions. La propagation par contraintes a été utilisée pour renforcer la borne lagrangienne et réduire les domaines finis de variables [3.2.9].

Par ailleurs nous avons également proposé deux méthodes pour planifier l'évolution des équipements du réseau. Nous nous sommes concentrés sur les équipements les plus nombreux du réseau, les antennes, en cherchant à planifier leurs installations et leurs modifications. Après

<sup>43</sup> EDWARDS N., SHMOYS D. (2000), "Approximation algorithms for multi-level facility location and  $k$ -median problems", 17th International Symposium on Mathematical Programming (ISMP'2000), Atlanta (Etats-Unis), 7-11 août 2000.

<sup>44</sup> BEASLEY J. E. (1984), "An SST-based algorithm for the Steiner problem in graphs", *Networks*, Vol. 19, n 1, pp. 1-16.

quoi, nous répercutons les décisions prises à ce niveau aux niveaux hiérarchiques supérieurs (ceux des *BSC* et des *MSC*). Les approches par génération de colonnes et relaxation lagrangienne proposées cherchent à optimiser d'abord **séparément chacune des antennes**, puis à **coordonner l'ensemble des décisions prises** [3.3.1, 3.4.4]. L'optimisation de la *vie* de chaque antenne consiste à déterminer toutes les modifications faites sur l'antenne et les dates de ces modifications (installation, changement de configuration, dimensionnement, suppression éventuelle...). Nous devons minimiser les coûts générés par les modifications et l'utilisation des installations tout en respectant les contraintes (telle l'obsolescence des composants).

Les contraintes qui rendent dépendantes la vie de chaque équipement sont relâchées. D'une part ces contraintes (dites *couplantes*) ont trait à la qualité de service : contrainte de couverture de zones, de dimensionnement des équipements vis-à-vis de l'évolution du trafic... D'autre part, elles concernent la planification : contraintes budgétaires, de charge de travail... En génération de colonnes, des coûts réduits (associés à ces contraintes couplant la vie des équipements) sont mis à jour par le programme maître de manière à respecter ces contraintes. En relaxation lagrangienne, les multiplicateurs sont eux mis à jour pour tendre à ce que les équipements satisfassent ces contraintes [3.2.9, 3.2.13, 3.3.1, 3.4.4].

### IV.2.3. Résultats expérimentaux et retombées économiques

#### IV.2.3.1. Conception et planification de réseaux d'accès

Les enjeux de la planification du réseau d'accès sont très importants. L'implantation des seules antennes du réseau radio **en 2000 a nécessité plusieurs milliards d'Euros** et, l'investissement prévu de 2000 à 2002 correspondait au doublement du réseau initial ! Les expérimentations que **nous avons réalisées montrent que l'optimisation de la localisation aurait permis d'économiser 20% des sites installés en 2000** sur l'Île de France en maintenant une qualité de couverture comparable (en faisant abstraction d'autres aspects techniques comme le *handover*). Depuis un certain nombre de modifications ont été apportées au réseau lui permettant d'être devenu le meilleur selon l'enquête de l'[ART](#) (Autorité de Régulation des Télécoms).

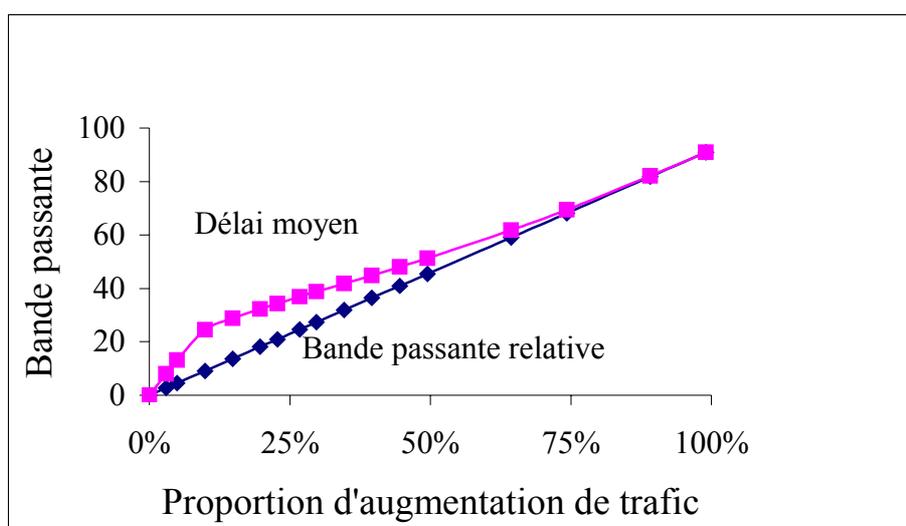


Figure IV.4 : Evolution de la bande passante en fonction du niveau de trafic

Le modèle de relaxation lagrangienne (que nous avons proposé pour planifier l'évolution de la vie des antennes [3.2.13]) a été utilisé par le [e-lab](#) du groupe [Bouygues](#) pour planifier l'évolution de réseaux routiers. Il a contribué à ce que la société Colas remporte le premier appel d'offres sur le sujet en Europe proposé par la ville de Portsmouth.

#### IV.2.3.2. Optimisation de la qualité de service dans le routage

Nous avons proposé des méthodes pour optimiser la qualité de service (délai, perte et gigue) de manière différenciée pour chaque type de trafics véhiculés dans les réseaux. Nous voulions faire la preuve du concept suivant : **l'optimisation de la qualité de service mesurée explicitement apporte un gain significatif par rapport à une optimisation indirecte de la qualité de service**. Typiquement, les administrateurs des réseaux modifient le routage dans le réseau et tentent de réduire le plus possible la bande passante occupée. Implicitement en réduisant l'occupation relative du réseau, ils espèrent améliorer la qualité de service et en particulier le délai. Pour comparer les deux approches (i.e. optimisation explicite et implicite de la qualité de service), nous nous sommes placés dans la situation simple d'une seule classe de trafic. Nous avons étudié l'évolution de la bande passante et du délai en fonction du niveau de trafic. Plus précisément, dans les résultats expérimentaux présentés ci-contre, l'optimisation de la bande passante relative maximale est en plus équilibrée vis-à-vis de la bande passante relative maximale.

La Figure IV.4 donne la proportion de la bande passante utilisée en fonction du niveau de trafic. Quand on optimise la bande passante relative de l'équipement le plus chargé, la bande passante relative est bien sûr égale au niveau de trafic du réseau. Quand on optimise le délai moyen d'acheminement dans le réseau, la bande passante relative occupée est légèrement plus importante que le niveau de charge.

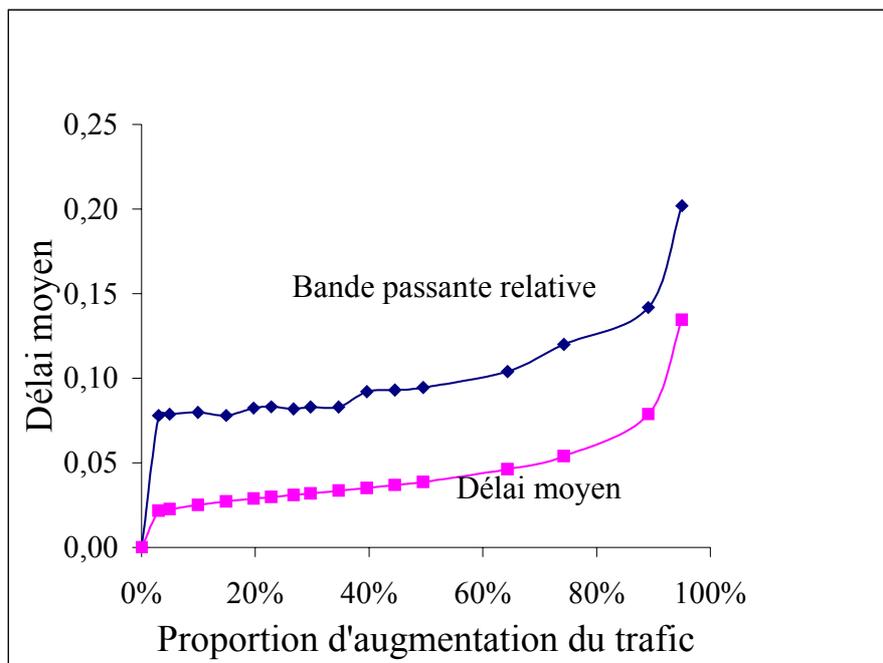


Figure IV.5: Evolution du délai moyen en fonction du niveau de trafic

La Figure IV.5 représente le délai moyen d'acheminement dans le trafic en fonction du niveau de trafic. Que l'on optimise la bande passante relative de l'équipement le plus chargé ou le délai moyen, le délai observé augmente avec le niveau de trafic du réseau. Mais quand on optimise le délai moyen d'acheminement dans le réseau, le délai est significativement plus faible que lorsqu'on optimise la bande passante relative occupée, et ce, quel que soit le niveau de trafic.

Les expérimentations que nous avons réalisées sur le réseau *IP* de [Bouygues Telecom](#) ont montré que **la perte en bande passante est de 17 % et le gain de délai est de 70 %** quand on minimise le délai (plutôt que d'optimiser la bande passante de l'équipement le plus chargé)<sup>31 (p. 3)</sup>. C'est ainsi que nous avons mis en évidence l'intérêt d'une approche explicite par rapport à une approche implicite. Un écart de cette importance dans les résultats nous a surpris nous-mêmes !

Par ailleurs, les heuristiques proposées pour optimiser le plan de routage *OSPF* en respectant les contraintes de qualité de service ont montré que nous pouvions transporter 5 % de trafic supplémentaire par rapport à l'algorithme *Pcalc* intégré de *Traffic Engineering* implémenté par Cisco Networks [\[3.3.2\]](#).

### IV.3. DIRECTIONS DE RECHERCHE FUTURES

Les évaluations analytiques qui existent permettent d'appréhender **de bout en bout** correctement **le délai**, plus approximativement **la perte**, et grossièrement **la gigue dans les situations où plusieurs classes de trafics** sont véhiculées dans le réseau : le champ d'investigation reste vaste.

Il peut même être mal aisé d'avoir un modèle réaliste de ces critères. En effet, considérons la perte et prenons un exemple extrême. Imaginons qu'entre deux sommets  $v$  et  $w$ , il existe un lien dont la bande passante est partagée par le trafic circulant dans les deux sens (situation dite de *full duplex*). Supposons que nous ayons une demande de 100 à véhiculer de  $v$  à  $w$  et autant de  $w$  à  $v$ . Si la capacité entre ces 2 points est limitée à 100, alors de multiples situations sont possibles. Soit seule la demande de  $v$  à  $w$  est totalement acheminée, soit la demande de  $w$  à  $v$  est totalement acheminée, soit la moitié de chacune des 2 demandes est acheminée, etc. Dans nos études, nous avons considéré le cas au pire et proposé des évaluations par excès de la perte.

Nous avons montré l'intérêt opérationnel d'optimiser (explicitement) les critères de qualité de service. Optimiser ces critères implique de résoudre de nouveaux problèmes difficiles pour lesquels les outils du marché ne sont pas (encore) adaptés. En particulier, il apparaît intéressant tant du point de vue appliqué que théorique de **rechercher des plans de routage équilibrés par rapport au critère de délai maximum d'un chemin** (i.e. une solution pour laquelle le délai de tout chemin ne peut être diminué sans augmenter celui d'un chemin dont le délai est plus important). Par exemple, le délai peut être évalué comme inversement proportionnel à la capacité résiduelle de l'équipement. Dans un tel plan de routage équilibré, **le délai obtenu sur les chemins sera identique pour tous les chemins acheminant une même demande**. Notons que cette propriété forte est une hypothèse qui est souvent faite dans les modèles de routage autoroutier. En effet pour répartir les voitures, il est souvent supposé que les conducteurs sont parfaitement informés de l'état autoroutier et qu'ils choisissent le chemin le plus court.

Le problème MSPF ouvre aussi un champ d'investigation tout autant théorique pour déterminer la solution optimale, ou caractériser la meilleure solution saturante, qu'appliqué pour proposer et expérimenter d'autres heuristiques.



# CHAPITRE V. OPTIMISATION DES CENTRES D'APPELS ET GESTION DE PERSONNEL

Sommaire :

## **CHAPITRE V. OPTIMISATION DES CENTRES D'APPELS ET GESTION DE PERSONNEL**

- V.1. CONTEXTE**
- V.1.1. Environnement d'étude**
- V.1.2. Champ d'étude et enjeux**
- V.2. PRINCIPAUX RÉSULTATS**
- V.2.1. Apports en modélisation**
- V.2.1.1. Rappels et appels frais
- V.2.1.2. Paradigme d'enchaînement d'activités
- V.2.1.3. Qualité de service dans la planification
- V.2.1.4. Appréciation et absorption en temps réel des aléas
- V.2.2. Résultats théoriques**
- V.2.2.1. Contraintes de planification
- V.2.2.2. Qualité de service dans la planification
- V.2.2.3. Planification d'activités
- V.2.2.4. Rappels et appels frais
- V.2.3. Résultats expérimentaux et retombées économiques**
- V.2.3.1. Rappels et appels frais
- V.2.3.2. Qualité de service dans la planification
- V.2.3.3. Appréciation et absorption en temps réel des aléas
- V.3. DIRECTIONS DE RECHERCHE FUTURES**

## V.1. CONTEXTE

### V.1.1. Environnement d'étude

Nous avons commencé à travailler sur les problèmes de gestion de personnel pour répondre aux besoins d'une entreprise mauritanienne définis avec Jean-Marie PROTH et Assane SOUMARE comme des problèmes de gestion de personnel [2.5, 4.11]. Dès mon arrivée à [Bouygues Telecom](#), au vu des enjeux, nous avons travaillé sur des problématiques liées aux centres d'appels qui représentent un tiers des effectifs de l'entreprise. Francis de VERICOURT (aujourd'hui à l'Université de Duke en Caroline du Nord), Rabie NAIT-ABDALLAH et moi avons été chacun responsable des projets d'optimisation des centres d'appels au sein de la Direction de la Recherche de [Bouygues Telecom](#). Dans le cadre de contrats de recherche avec l'ECP (Ecole Centrale de Paris) depuis 2000, nous avons réalisé une succession d'études améliorant le fonctionnement en temps réel du centre d'appels [2.9, 3.2.11, 3.4.9, 5.1, 5.2] et son architecture [5.4]. Fikri KARAESMEN, Zeynep AKSIN (tous deux maintenant à l'Université d'Istanbul), Yves DALLERY, Salah AGUIR<sup>45</sup> et Oualid JOUINI (actuellement en thèse), ont été les principaux contributeurs de ces travaux [3.2.11, 3.4.9, 5.1]. Alexandre MEYRIGNAC et Séverine PAUL au sein de mon équipe d'optimisation ont participé aux études d'amélioration de la prévision de la charge d'appels [5.3]. Outre son apport aux autres projets, Rabie NAIT-ABDALLAH développe dans le cadre d'une thèse que j'encadre des modèles visant à dimensionner les centres d'appels [3.2.15, 3.4.12], modèles auxquels Laurent CHAUVIER et Arnaud RENAUD de la société [Artelys](#) [3.1.5, 3.4.8] ont collaboré ainsi qu'Amine OTMANE.

### V.1.2. Champ d'étude et enjeux

Les enjeux de l'optimisation des centres d'appels sont importants pour [Bouygues Telecom](#). L'opérateur dispose du troisième plus grand centre d'appels en France : 2 500 conseillers de clientèle répondent chaque jour aux questions des clients. Aussi la charge salariale induite est considérable pour l'entreprise en regard de ses 7 000 collaborateurs. Outre les enjeux financiers, le centre d'appels est le lien principal d'échanges avec les clients et la qualité de service délivrée est primordiale dans l'offre faite par l'opérateur. Un autre enjeu concerne le fait qu'il s'agit de **gestion de personnel**, qui ne peut être abordée comme celle de ressources matérielles ! De plus, la gestion est encadrée par de nombreuses règles législatives et sociales (35 heures, jours de repos, desiderata des conseillers, etc.).

Nous sommes intervenus à plusieurs niveaux sur les centres d'appels de [Bouygues Telecom](#). Les enjeux cités concernent des aspects tactiques (à moyen terme) et stratégiques (à long terme). Nous avons ainsi traité les sujets de **négociation de la sous-traitance**, de **définition des profils de recrutements** (temps plein, mi-temps, etc.), de **dimensionnement du centre d'appels** en nombre de conseillers nécessaires... Au niveau opérationnel, nous avons traité des sujets de **prévision de la charge d'appel**, de **définition des vacances** pour la proposition des emplois du temps et de **planification de l'activité** des conseillers. Sur les aspects temps réel, nous avons travaillé sur **l'acheminement** et **l'allocation** aux conseillers des appels, **l'architecture** du centre...

---

<sup>45</sup> AGUIR M. S. (2004), "Optimisation des Centres d'Appels", thèse de doctorat, Laboratoire de Productique et de Logistique, Ecole Centrale de Paris (ECP), Châtenay-Malabry (France), Toulouse (France), février 2004.

## V.2. PRINCIPAUX RESULTATS

### V.2.1. Apports en modélisation

#### V.2.1.1. Rappels et appels frais

La prévision de la charge et la planification de l'activité des conseillers sont habituellement réalisés à partir de l'historique des appels reçus aux centres d'appels. Or, ces historiques sont en fait biaisés. En effet, plusieurs situations peuvent se produire quand un client appelle le centre de clientèle. Tout d'abord, si un conseiller (apte à répondre à sa question) est libre, le client est directement **mis en relation** avec le conseiller. Si tous les conseillers sont occupés, le client est **mis en attente** dans une file. Enfin, si tous les conseillers sont occupés, et que déjà un grand nombre d'autres clients sont en attente dans les files, alors le nouveau client est invité à rappeler ultérieurement et il est **déconnecté**. Dans ce cas, le client renouvelle souvent immédiatement son appel. Ainsi parmi les appels reçus au centre d'appels, une part est constituée par les **rappels des clients après déconnexion ou abandon** en file d'attente. Les appels reçus qui ne sont pas des rappels sont désignés par **appels frais et correspondent à de véritables intentions d'appels** différentes. Nous avons mis en évidence l'importance du phénomène ignoré auparavant et quantifié ses effets autant sur la prévision que sur la planification [2.9, 3.2.11, 3.4.9, 5.3].

#### V.2.1.2. Paradigme d'enchaînement d'activités

La construction de vacation pour les centres d'appels consiste à définir la suite des activités des conseillers (prise d'appels, télémarketing, courrier, pauses, réunions, etc.) pendant leurs différentes journées de travail. Les études qui traitent de la planification d'activité se cantonnent souvent à une unique activité, et au maximum à deux activités, la deuxième étant la pause<sup>46 47 48</sup><sup>49 50</sup>. Dans le cadre des centres d'appels de [Bouygues Telecom](#), nous avons dû planifier l'ensemble des activités des conseillers.

Nous avons proposé d'utiliser des concepts issus de graphes *potentiel étapes*<sup>10 (p : 3)</sup> et PERT<sup>11 (p : 3)</sup> en ordonnancement pour modéliser ces vacations. Ainsi nous avons proposé de définir *l'enchaînement des activités* comme une suite ordonnée des  $m$  occupations d'un conseiller telle que sur la Figure V.1. Le début et la fin de ces activités sont des *étapes*. La fin d'une activité est

---

<sup>46</sup> DANTZIG G. B. (1954), "A comment on Edie's " Traffic delays at toll booths """, *Operations Research*, Vol. 2, N°2, pp. 339-341.

<sup>47</sup> MOONDRA S. L. (1976), "An L.P. model for work force scheduling for Banks", *Journal of Bank Research*, Vol. 6, pp. 299-301.

<sup>48</sup> BECHTOLD S. E., JACOBS L. W. (1990), "Implicit modeling of flexible break assignments in optimal shift scheduling", *Management Science*, Vol. 36, N°11, pp. 1339-1351.

<sup>49</sup> THOMPSON G. M. (1995), "Improved implicit optimal modeling of the labor shift scheduling problem", *Management Science*, Vol. 41, pp. 595-607.

<sup>50</sup> AYKIN T. (2000), "A comparative evaluation of modeling approaches to the labor shift scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 125, pp. 381-397.

le début de l'activité suivante. Les étapes sont numérotées de 0 à  $m$ , l'étape 0 étant le début de la première activité et l'étape  $m$  la fin de la dernière activité. La date à laquelle est fixée l'étape  $i$  est notée  $T_i$ . Les contraintes principales qui intéressent le responsable d'une planification de personnel et que l'on veut visualiser sont de deux types [3.1.5, 3.4.8] :

- **l'intervalle de temps sur lequel le début d'une activité peut être positionné** ; il est identifié par  $[a_i ; b_i]$  où  $a_i$  et  $b_i$  désignent respectivement la date au plus tôt et au plus tard à laquelle l'étape  $i$  peut être fixée ; on a :  $T_i \in [a_i ; b_i]$ ,
- **la plage de temps pouvant s'écouler entre deux étapes** ; elle est définie par  $[l_{i,j} ; u_{i,j}]$  où  $l_{i,j}$  et  $u_{i,j}$  sont les durées minimale et maximale  $u_{i,j}$  séparant les deux étapes  $i$  et  $j$  ; ceci implique que :  $(T_j - T_i) \in [l_{i,j} ; u_{i,j}]$ .

Ces contraintes permettent d'appréhender les contraintes des modèles classiques <sup>46 47 48 49 50 (p : 3)</sup> de planification qu'elles soient légales (du type la présence pendant une journée ne peut dépasser 10h), contractuelles (comme la pause déjeuner doit durer au moins 45 minutes et ne peut être positionnée moins de 2 heures après le début d'une journée de travail, etc.), organisationnelles (comme le déjeuner ne doit s'effectuer qu'entre 11h30 et 14h)... Le paradigme d'enchaînement d'activités permet de représenter et d'échanger sur ces contraintes sans autre formalisme mathématique. Un ensemble de conseillers partageant les mêmes contraintes de planification constitue pour nous un même *profil* de conseillers. Enfin, **certaines activités définies dans l'enchaînement peuvent être facultatives**. Dans ce cas, une activité  $i$  facultative a une durée minimale nulle, i.e.  $l_{i-1,i} = 0$ . Ceci offre une grande souplesse au paradigme. Si une telle activité facultative est proposée à un conseiller alors elle doit l'être pendant une tranche horaire entière pour éviter des changements intempestifs et dérangeants d'activité.

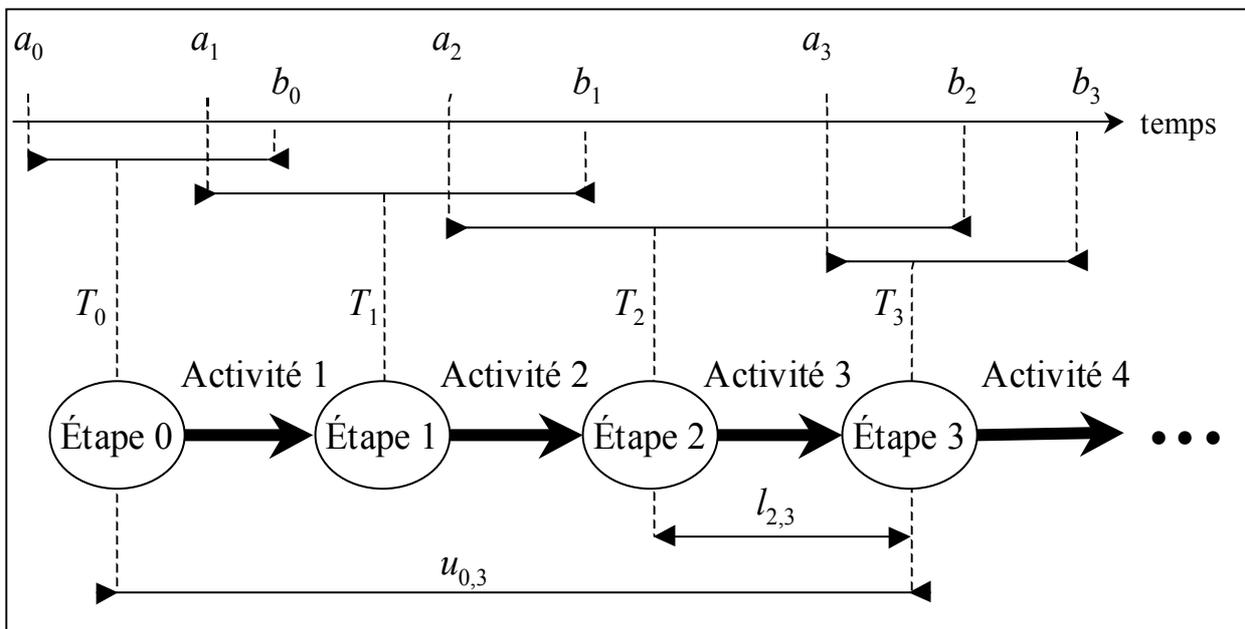


Figure V.1 : Graphe d'enchaînement d'activités

### V.2.1.3. Qualité de service dans la planification

Pour assurer la qualité de service en temps réel, il est nécessaire de planifier un nombre de conseillers suffisants. Aussi la grande majorité des approches de planification<sup>46 47 48 49 50 (p: 3)</sup> consiste à déterminer le nombre de personnes nécessaires pour absorber le nombre d'appels prévus par tranche horaire. A partir d'un objectif de qualité de service par période (par exemple, un temps d'attente moyen inférieur à 3 minutes), on déduit un nombre de conseillers nécessaires pour garantir l'objectif. Nous avons exploité cette approche pour **déterminer les recrutements nécessaires quelques mois à l'avance, négocier la sous-traitance d'appels...**

Cependant une telle approche n'est pas satisfaisante pour **planifier l'activité des conseillers quelques semaines à l'avance**. En effet, même si le nombre de conseillers est insuffisant pour atteindre le niveau de service objectif, il faudra malgré tout ouvrir le centre de clientèle et donc planifier au mieux les conseillers présents. A l'inverse si le nombre de conseillers dépasse celui nécessaire, les conseillers en sus peuvent être planifiés de manière à anticiper les aléas (de prévision de la charge, de l'arrivée des appels, de l'absentéisme, etc.). C'est pourquoi l'approche que nous avons privilégiée, dans ce cas, consiste à optimiser la qualité de service en **minimisant le temps d'attente des clients ou le nombre de renouvellements d'appels** [3.2.15, 3.4.12].

Dans cet esprit nous avons abordé par relaxation lagrangienne des contraintes de qualité de service par tranche horaire. Ainsi nous avons abordé les problématiques **tactico-stratégiques du centre d'appel d'un point de vue économique**. Les multiplicateurs lagrangiens pénalisant les contraintes de qualité de service nous ont permis d'apprécier les coûts pour :

- proposer **les vacances** pour la construction des emplois du temps des conseillers : combien de conseillers doit-on positionner en tout début de journée ou en fin de journée ? Quelles horaires d'ouverture du centre d'appels et de présence des conseillers doit-on privilégier ? Quelle prime d'encouragement peut être proposée aux conseillers d'astreinte ?
- déterminer une base de **négociation de la sous-traitance d'appels** : quelle proportion d'appels et à quel coût unitaire peut-on déléguer en externe la réponse aux appels des clients sachant les coûts de gestion interne et la variabilité de la courbe de charge au cours de la journée ?
- définir les **profils des recrutements** à effectuer : combien de contrats à temps plein ou à mi-temps doit-on prévoir sachant les contraintes spécifiques liés à chaque contrat de travail et la variabilité de la courbe de charge au cours de la journée ?

Jusqu'à présent nous avons essentiellement cherché à **améliorer la qualité de service moyenne** sur une journée. Evidemment, nous allons aussi chercher à **nous écarter le moins possible d'une qualité de service cible au cours de la journée**. Pour ce faire, nous utiliserons la notion de solution équilibrée (définie dans la section IV.2.1.4) par rapport au critère d'écart maximum à la qualité de service cible d'une tranche horaire, c'est-à-dire une solution pour laquelle l'écart par rapport à la qualité de service cible d'une tranche horaire ne peut être diminué sans augmenter celui d'une tranche horaire dont l'écart est plus important. **Elle évite de dégrader trop fortement certaines parties de la journée pour en améliorer d'autres où la qualité est déjà satisfaisante.**

#### V.2.1.4. Appréciation et absorption en temps réel des aléas

Les aléas sont un élément prépondérant dans les centres d'appels. Plus les centres ont une taille importante, moins ces effets sont importants. Aussi il est essentiel de mutualiser les ressources du centre pour offrir une qualité de service à un coût compétitif. Les études que nous avons menées ont consisté à apprécier ces aléas en temps réel [2.9, 3.2.11, 3.4.9, 5.1, 5.2].

Si concentrer les appels et mutualiser les ressources du centre permettent d'absorber les aléas, cette mutualisation "déshumanise" le centre d'appels. Aussi, la gestion par portefeuille a été retenue par Gilles Péliçon comme l'une des 5 priorités de Bouygues Telecom en 2004. On entend par *gestion par portefeuille*, le fait de dédier un ensemble de conseillers de clientèle à un segment de clients appelé aussi *portefeuille de clients*. Un pilote a été organisé afin de mettre en évidence les avantages d'une telle gestion par portefeuille :

- améliorer la qualité de la réponse par une responsabilisation des conseillers de clientèle,
- réduire les transferts d'appels clients pour une prise en charge plus rapide des clients,
- réduire la proportion de rappels pour le même motif (grâce à des réponses de meilleure qualité).

En marge de ces avantages, il existe un certain nombre de risques que nous avons identifiés. En particulier, celui lié au **surcoût de dimensionnement** de la gestion par portefeuille. En effet, le fait de subdiviser le centre d'appels en équipes dédiées à des portefeuilles augmente les risques d'avoir des clients en attente sur un portefeuille alors que des conseillers sont disponibles sur un autre. Ceci conduit mécaniquement à une augmentation du **temps d'attente global des clients**.

Ce phénomène est d'autant plus important lorsque la taille des portefeuilles est réduite. Ainsi, la gestion par portefeuille impliquerait (si on ne prenait pas en compte la réduction du nombre de rappels et de transferts qu'elle induit) une augmentation du nombre de conseillers pour garder la même qualité de service. Nous sommes intervenus pour alerter sur les risques, quantifier les impacts de la gestion par portefeuille sur le coût et la qualité de service offerte aux clients, **proposer des architectures et un dimensionnement optimisés** [5.4].

### V.2.2. Résultats théoriques

#### V.2.2.1. Contraintes de planification

Un ensemble de contraintes régit le temps de travail des conseillers. Dans les premiers modèles proposés<sup>46 (p : 3)</sup>, toutes les combinaisons d'horaires induites par ces contraintes étaient exprimées explicitement sur chaque tranche horaire. On parle alors de modélisation *explicite* des vacations possibles. L'inconvénient dans ce cas est que la taille du modèle augmente considérablement en fonction des possibilités d'horaires réalisables.

Pour y remédier, des approches dites *implicites* ont été proposées<sup>47 48 49 50 (p : 3)</sup>. L'idée, consiste à formuler les règles de gestion du temps de travail à l'aide de contraintes dans le modèle sans avoir à énumérer toutes les combinaisons d'horaires possibles. Ceci a pour effet de réduire la taille du modèle ainsi que le temps de résolution. Nous avons ainsi proposé un modèle implicite permettant de prendre en compte **toutes les contraintes induites par le paradigme**

d'enchaînement des activités [3.1.5, 3.4.8], et ainsi de généraliser les approches antérieures<sup>47 48</sup>  
<sup>49 50 (p : 3)</sup>. La variable de décision que nous utilisons est  $X_{t,i}^p$  qui représente le nombre de conseillers du profil  $p$  qui ont terminé l'activité  $i$  avant la date  $t$  comme sur la Figure V.2. De cette variable de cumul, on déduit  $N_{t,i}^p$ , le nombre de conseillers d'un profil  $p$  dans l'activité  $i$  à la date  $t$  par :  $N_{t,i}^p = X_{t,i}^p - X_{t,i-1}^p$ .

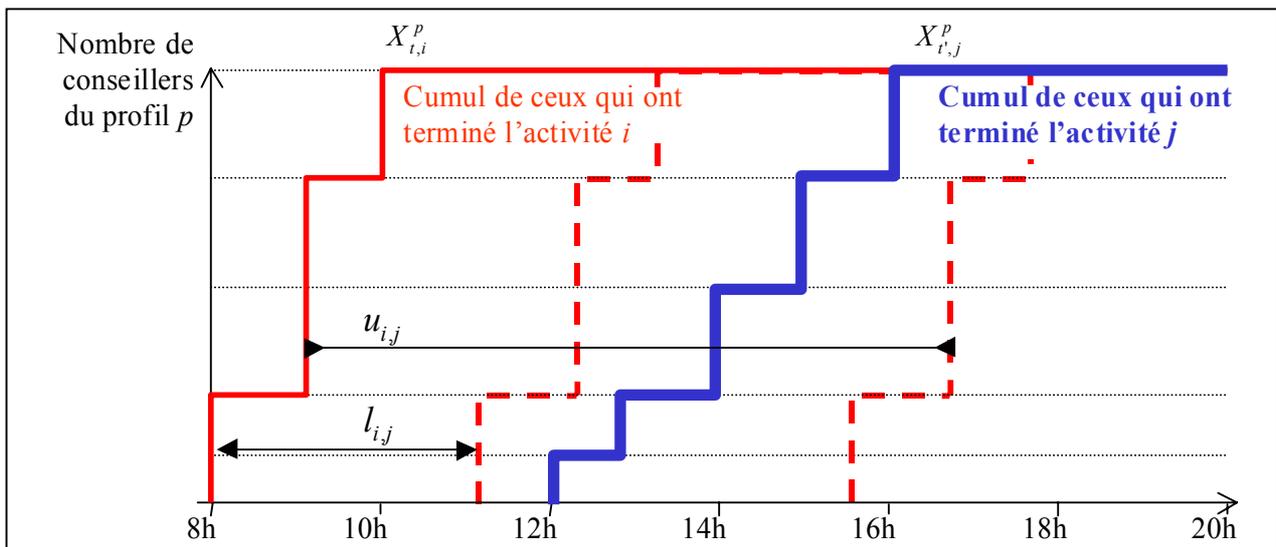


Figure V.2 : Contraintes de planification sur les variables de cumul

Le nombre de variables et de contraintes de notre modèle dépend du nombre de profils, du nombre de tranches horaires et d'activités. Nous avons démontré que **notre modèle implicite est équivalent à un modèle explicite** (dont le nombre de variables dépend du nombre de conseillers) [3.1.5, 3.4.8]. En particulier, nous obtenons une planification individuelle à partir des variables de cumul en appliquant la règle simple : le premier conseiller d'un profil à commencer une activité est également le premier à la terminer.

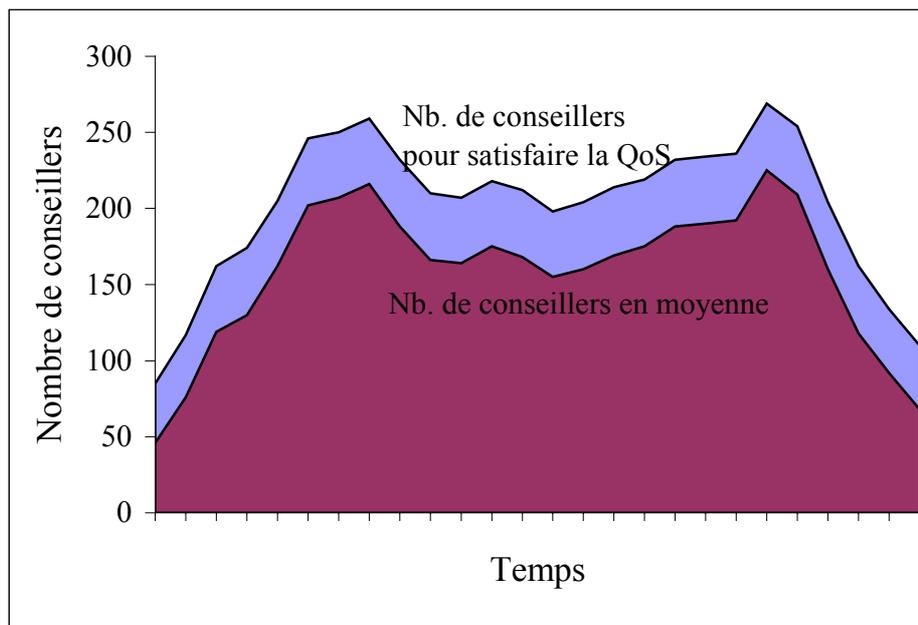
Toutes les contraintes de planification induites par le paradigme d'enchaînement des activités s'écrivent comme une différence entre les variables de décision d'un même profil du type  $X_{t,i}^p - X_{t,j}^p$  comme est celui sur la Figure V.2. Ce type de contraintes sont celles d'un problème dit *de tension*, dual des problèmes d'acheminant de flot à coût minimum. Aussi nous avons mis en évidence et démontré une propriété très forte des contraintes de planification du modèle. Nous avons démontré [3.2.15, 3.4.12] que **la matrice des contraintes est totalement unimodulaire**<sup>20</sup>  
<sup>(p : 3)</sup>. Cette propriété mathématique induit que les solutions extrémales du polyèdre formé par les contraintes de planification sont entières. Autrement dit, si on cherche une planification optimisant un (quelconque) critère linéaire, alors un programme linéaire (sans contrainte d'intégrité des variables) fournit pour toutes les variables de décision des valeurs entières. Cette propriété induit que **la planification de conseillers d'un profil unique avec des contraintes de cible de qualité de service par tranche horaire peut être obtenue par un programme linéaire et est résoluble en temps polynomial**. Ce même problème avec plusieurs profils est connu sous le nom de *shift scheduling problem* et est NP-difficile au sens fort<sup>46 (p : 3)</sup>. Nous avons aussi pu aborder, au moyen de la **relaxation lagrangienne des contraintes de qualité de service, le shift**

**scheduling problem** pour éclairer d'un point de vue économique les problématiques tactico-stratégiques.

Nous avons étendu les propriétés ci-dessous au cas où le nombre de conseillers total est fixé et que nous devons déterminer le nombre dans chaque profil.

#### V.2.2.2. Qualité de service dans la planification

Afin d'absorber les aléas (dus aux erreurs de prévision de la charge, de l'arrivée aléatoire des appels, de l'absentéisme et des retards, etc.), il est nécessaire de planifier un nombre plus important de conseillers que celui que l'on aurait prévu en moyenne. Nous avons évalué la qualité de service dans le système. Au niveau de la planification, il est supposé qu'on ne peut modifier ni le contenu, ni la durée des appels pour améliorer la qualité de service. Que cette qualité de service soit appréhendée par le temps d'attente des clients ou par le nombre d'appels servis, on observe que **plus la charge d'appels est faible, plus l'effet des aléas et plus la proportion de conseillers supplémentaires sont importants**. Cette observation est faite sur la Figure V.3 où sont comparés le nombre de conseillers évalués à partir de la charge moyenne (sans prise en compte des aléas) et le nombre qu'il faut pour satisfaire un niveau de qualité de service donné.

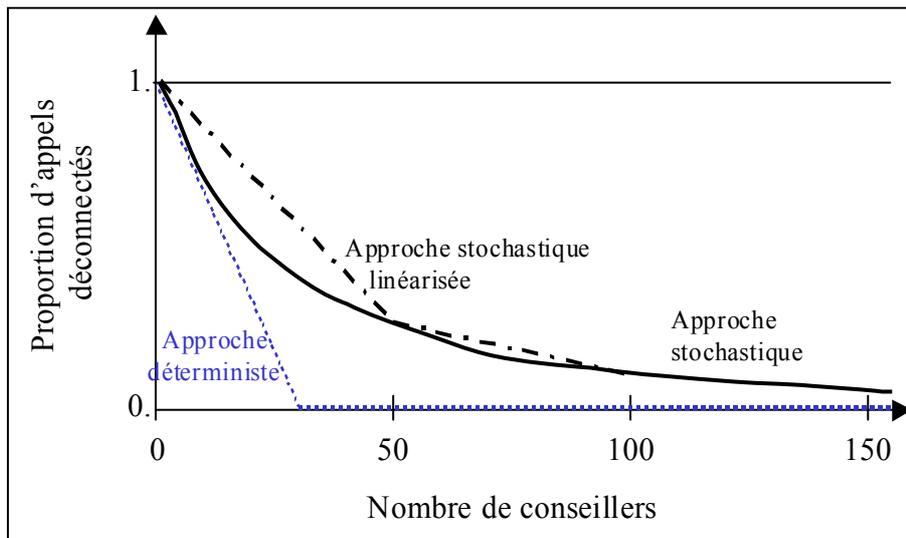


**Figure V.3 : Nombre de conseillers nécessaires pour satisfaire la Qualité de Service**

Très peu d'approches de planification prennent en compte la qualité de service <sup>51</sup>. Pour l'appréhender, nous avons fait l'hypothèse que l'arrivée des appels et la fin des appels sont indépendantes du temps. Ces hypothèses sont réalistes, en particulier en l'absence de renouvellements d'appels. Aussi nous avons abordé le centre d'appels comme une file  $M/M/C/K$

<sup>51</sup> KOOLE G., VAN DER SLUIS E. (2003), "Optimal shift scheduling with a global service level constraint", *IIE Transactions*", Vol. 35, pp. 1049-1055.

selon la notation de Kendall <sup>39 40 (p: 3)</sup>, où  $K$  est la taille de la file d'attente et  $C$  le nombre de conseillers. Afin d'obtenir des évaluations continues nous l'avons approchée par une file  $M/M/1/K$  avec un taux de service  $C$  fois plus important. Nous avons ensuite évalué la proportion d'appels déconnectés donnée par la probabilité de blocage de la file d'attente. L'approche souvent utilisée par les praticiens consiste à l'évaluer de manière *déterministe* (i.e. sans prendre en compte les aléas). La Figure V.4 fait apparaître clairement que **l'approche déterministe sous-estime la proportion d'appels déconnectés par rapport à l'approche stochastique que nous avons utilisée** [3.2.15, 3.4.12]. Contrairement au cas stochastique, la proportion évaluée sans aléas s'annule si la capacité de service correspond à la charge moyenne d'appels.



**Figure V.4 : Différentes approches de prise en compte de la qualité de service**

L'évaluation de cette probabilité est une fonction non linéaire du nombre de conseillers. Afin de pouvoir utiliser cette évaluation dans une formulation en programme linéaire, il est nécessaire de *linéariser* cette fonction. La linéarisation consiste à approcher une fonction non-linéaire en introduisant un ensemble de contraintes linéaires. Dans le cadre d'une fonction non-linéaire à optimiser, il faut que la fonction soit décroissante et convexe pour que cette discrétisation n'impose d'utiliser des variables booléennes ou entières. Dans notre situation, la proportion de déconnectés est convexe <sup>52</sup> et découpée en segments linéaires dépendants du nombre de conseillers comme sur la Figure V.4. Si le nombre maximal de conseillers pour une tranche horaire est limité à  $N$ , nous avons montré qu'en **découpant la fonction en  $N$  morceaux, cette linéarisation ne modifiait pas la planification optimale** [3.2.15, 3.4.12]. Dans la pratique, nous avons obtenu d'excellents résultats avec seulement deux segments !

L'approche que nous avons développée consiste à optimiser une mesure de la qualité de service sur la journée [3.2.15, 3.4.12]. Si on utilise comme fonction d'évaluation de chaque tranche horaire une fonction déterministe telle qu'indiquée sur la Figure V.4, alors nous pouvons forcer

<sup>52</sup> NAGARAJAN R., TOWSLEY D. (1992), "A Note on the Convexity of the Probability of a Full Buffer in the  $M/M/1/K$  queue", *CMPSCI Technical Report*, TR 92-85, [ftp://gaia.cs.umass.edu/pub/Naga92:Mm1kConvex.ps.Z](http://gaia.cs.umass.edu/pub/Naga92:Mm1kConvex.ps.Z).

la planification à respecter les niveaux de qualité de service attendus sur chaque période. Ainsi **optimiser la fonction de qualité de service sur la journée revient à satisfaire chaque niveau de service par tranche horaire**. Aussi **optimiser la fonction de qualité de service sur la journée est NP-difficile au sens fort** comme le problème de *shift scheduling problem*. Mais tout en restant difficile, les critères de qualité de service comme la proportion d'appels déconnectés sont plus faciles à optimiser que les fonctions à seuil qui sont non différentiables. En fait les contraintes ajoutées pour discrétiser la fonction de qualité de service ne constituent pas une matrice *totalelement unimodulaire*.

Nous avons ainsi optimisé le modèle de qualité de service sur la journée comme un programme linéaire en nombres entiers avec un outil du marché [3.2.15, 3.4.12]. Nous avons également abordé les situations où il existe plusieurs types de service (réponse à des appels, réponse à des *e-mails*, télémarketing...) et plusieurs classes de clients (par exemple, or, argent, bronze). Chaque type de service et classe de client introduit une classe de service différente. Nous avons une qualité de service attendue pour chaque classe de service au nombre de  $K$ . Nous avons introduit une variable de décision supplémentaire  $R_{t,i,k}^p$  qui représente la part du temps que les conseillers du profil  $p$  pendant l'activité  $i$  et la période  $t$  consacre aux conseillers de la classe de service  $k$ . Certaines classes de service ne peuvent être servies pendant des activités. Dans ce cas des contraintes imposent que la part du temps que les conseillers accordent à cette classe est nulle. Evidemment le total de ces portions pour l'ensemble des classes de clients  $k$  vaut 100 %. Il existe aussi des contraintes induites par les priorités de service entre les classes...

### V.2.2.3. Planification d'activités

Mon premier travail sur les problèmes de gestion de personnel concernait le *Bottleneck Assignment Problem*<sup>53</sup> : il s'agit d'affecter à des employés (en nombre très élevé) des tâches (en nombre plus restreint) de manière à ce que la dernière tâche soit terminée le plus tôt possible. Dans le cas où chaque employé ne peut réaliser au plus qu'une tâche, nous avons proposé une **approche dichotomique optimale consistant en la résolution de problèmes d'affectation successifs** [2.5, 4.11]. Cet algorithme est polynomial. Si aucune contrainte n'est imposée sur le nombre d'opérations réalisées par un même employé, le problème devient NP-difficile au sens fort. Nous avons proposé pour ce problème une heuristique et une méthode arborescente.

Pour planifier l'activité des conseillers de clientèle, comme indiqué ci-dessus, nous avons proposé plusieurs techniques de résolution basées sur la relaxation lagrangienne, sur des problèmes linéaires en nombres entiers. Nous avons aussi proposé des heuristiques. Nous avons également montré qu'il est possible de construire une solution pour le *shift scheduling problem* à partir de la relaxation linéaire (i.e. sans contrainte d'intégrité) de notre modèle implicite. Mais les profils retenus dans la solution optimale de la relaxation linéaire ne sont pas nécessairement suffisants pour obtenir le solution optimal du *shift scheduling problem*. De plus, arrondir à l'entier supérieur les variables de cumul  $X_{t,i}^p$  (le nombre de conseillers du profil  $p$  qui ont terminé l'activité  $i$  avant la date  $t$ ) permet de construire des emplois du temps respectant les

---

<sup>53</sup> MAZZOLA J. B., NEEBE A. W. (1993), "An Algorithm for Bottleneck Generalized Assignment Problem", *Computers Operations Research*, Vol. 20, N°4, pp. 355-362.

contraintes de planification, mais ne garantit pas de couvrir la courbe de charge. Arrondir à l'entier supérieur les variables  $N_{t,i}^p$  (représentant le nombre de conseillers d'un profil  $p$  dans l'activité  $i$  à la date  $t$ ) permet de couvrir la courbe de charge, mais ne garantit pas de respecter les contraintes de planification. Arrondir à l'entier supérieur le nombre de personnes affectées à chaque emploi du temps généré permet d'obtenir une solution réalisable.

#### V.2.2.4. Rappels et appels frais

Nous avons analysé l'impact des renouvellements d'appels suite à un abandon ou une déconnexion [2.9, 3.2.11, 3.4.9]. Nous avons proposé un modèle markovien où les états sont définis par le nombre de clients dans le centre d'appel (soit qui sont en communication avec un conseiller, soit en attente dans la file) et par le nombre de clients en train de rappeler. Ces derniers sont mis dans une file fictive. Nous avons proposé différentes relations pour estimer le flux de rappels en régime permanent.

En régime stationnaire, nous avons établi [2.9, 3.4.9] que le **flux d'appels reçus**  $\lambda_0$  peut s'exprimer par l'Équation V.1 où les notations suivantes représentent :

- $A$ , le flux d'abandons *définitifs* (i.e. non suivis d'un rappel),
- $R$ , le flux des déconnexions sans rappel,
- $E[B]$ , le nombre moyen de conseillers occupés,
- $\mu$ , le taux de service du centre d'appels.

$$\text{Équation V.1 : } \lambda_0 = A + R + E[B] \mu$$

Nous avons démontré comment évaluer le **flux de rappels**  $T_r$  par l'Équation V.2 et par l'Équation V.3 à partir :

- $p$ , la proportion d'abandons et de déconnexions qui donnent lieu à un rappel,
- $\lambda$ , le flux d'appels frais définis par  $\lambda = \lambda_0 - T_r$ ,

$$\text{Équation V.2 : } T_r = p (A + R)$$

$$\text{Équation V.3: } T_r = p (\lambda - E[B] \mu) / (1 - p)$$

Nous avons également utilisé une approximation fluide du modèle qui fournit de très bonnes évaluations pour de grands centres d'appels ayant un niveau de charge important, ce qui est notre situation. Nous avons établi [2.9, 3.4.9] que l'**évaluation fluide du flux de rappels**  $T_r$  **ne dépend pas du taux d'abandon des clients en attente dans la file**. Il est défini par l'Équation V.4 où  $C$  désigne le nombre de conseillers de clientèle,

$$\text{Équation V.4 : } T_r = p (\lambda - C \mu) / (1 - p)$$

Nous avons aussi démontré que **cette approximation fluide est asymptotiquement identique à l'évaluation stochastique avec un accroissement de  $\lambda$** .

Récemment nous avons étudié des mécanismes de **priorité probabiliste**, qui permettent d'optimiser la qualité de service différenciée par flux (plutôt que des priorités absolues). Nous avons cherché à **atteindre les objectifs de temps d'attente dans la même proportion** pour chaque flux. L'objectif est qu'en cas de modification de la charge, le rapport entre le temps

d'attente réel d'un flux et l'objectif de son temps d'attente soit identique pour tous les flux.

### V.2.3. Résultats expérimentaux et retombées économiques

#### V.2.3.1. Rappels et appels frais

Nous avons mené plusieurs études pour améliorer le processus de planification de l'activité des conseillers de clientèle. Les progrès les plus significatifs ont été obtenus en affinant les modèles employés. En premier lieu, nous avons découvert l'importance des renouvellements d'appels des clients dans l'ensemble des appels reçus aux centres [3.2.11]. En effet une grande majorité des clients invités à rappeler ultérieurement renouvelle leurs appels sans attendre et génère une *bulle* d'appels. Sur la Figure V.5, les appels frais (ou intentions d'appels) ne peuvent être absorbés par la capacité de service ce qui génère des rappels qui s'ajoutent aux appels frais.

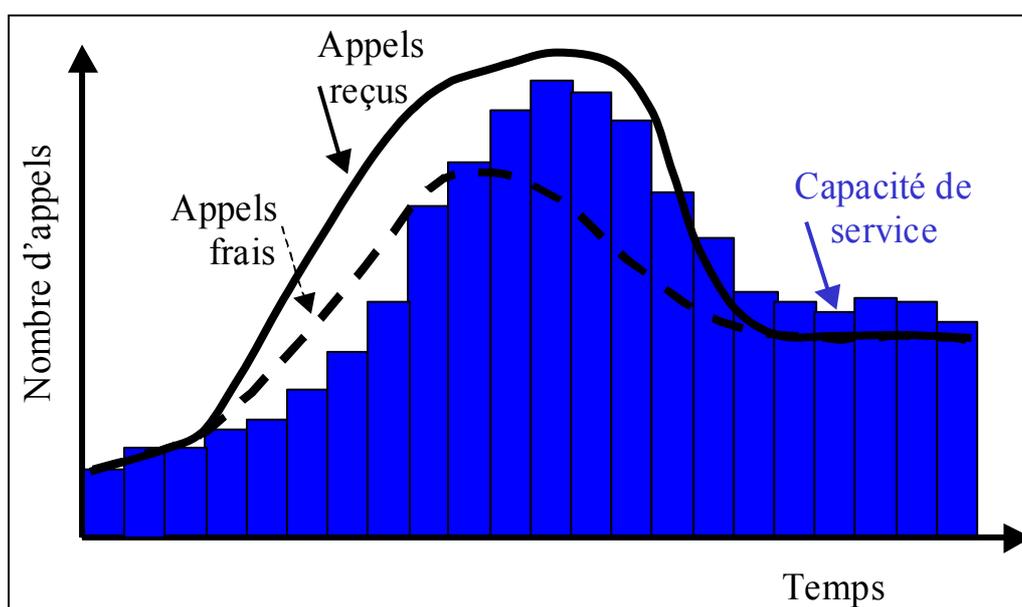


Figure V.5 : La bulle de rappels

Ces 30 % d'appels supplémentaires perturbent les historiques, biaisent les évaluations de qualité de service... Nous avons proposé une estimation très fiable de la proportion de rappels et d'appels frais en fonction du nombre d'appels reçus, de déconnexions et d'abandons [5.3]. Cette méthode permet ainsi de connaître le nombre d'appels frais sans avoir à suivre un à un les appels de chaque client au centre.

Nos premières études sur la prévision des appels reçus ont permis de diviser par 2 l'erreur de prévision apportant un **gain de 15 M€ par an** ! La prévision des appels reçus hors renouvellements a encore amélioré la prévision **diminuant d'un tiers supplémentaire l'erreur de prévision** (puisque les perturbations induites dans les historiques par les bulles d'appels sont supprimées). D'autres aspects peuvent être pris en compte : les reports dus aux jours fériés, les impacts d'une nouvelle offre ou d'une campagne publicitaire (dans les media, par SMS...), les questions spécifiques des nouveaux clients, les problèmes techniques...

### V.2.3.2. Qualité de service dans la planification

Nous avons montré qu'une planification prenant en compte les phénomènes de renouvellements permettrait **d'améliorer de 15 % la productivité du centre d'appels** et de réduire de 25 % la proportion d'appels non répondus [3.2.11, 3.4.9]. D'autre part, **la prise en compte des aléas permet de réduire de 40 % le nombre d'appels non répondus** par rapport à une approche déterministe [3.2.15, 3.4.12].

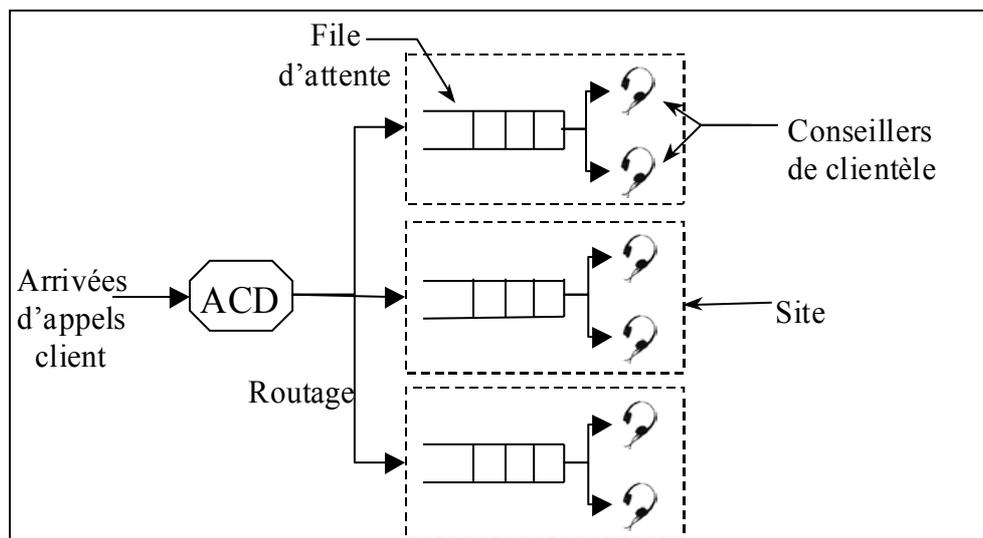


Figure V.6 : Schéma représentatif d'un centre d'appels multi-sites

### V.2.3.3. Appréciation et absorption en temps réel des aléas

Les aléas sont un élément prépondérant dans les centres d'appels. Des centres de grande taille en mutualisant les ressources du centre permettent d'offrir une qualité de service à un coût compétitif. Les études que nous avons menées sur les problématiques en temps réel ont consisté à apprécier l'effet des aléas [2.9, 3.2.11, 3.4.9, 5.1, 5.2].

Les 6 centres d'appels de [Bouygues Telecom](#) sont disséminés en France et lorsqu'un appel est acheminé sur un centre, l'infrastructure (représentée sur la Figure V.6) ne permet pas de le dérouter sur un autre centre où des conseillers seraient libres. Aussi l'algorithme de routage qui permet de déterminer sur quel site sera envoyé chacun des 70 000 appels par jour est fondamental. Nous avons proposé d'**évaluer le temps moyen d'attente [5.1] en prenant en compte les priorités de service entre clients**. L'ordre de grandeur de l'erreur produite est de 1 %. Le routage minimisant cette évaluation du temps moyen d'attente a permis de réduire de manière significative la proportion de rappels. Nous avons également cherché à **estimer avec intervalle de confiance le temps d'attente en vue de l'annoncer au client [5.2]**. Depuis nous avons aussi proposé plusieurs méthodes pour atteindre la qualité de service différenciée par classe de clients en jouant en temps réel seulement sur la taille des files d'attente de chaque classe de clients et sur l'ordre de service.

Nos études ont permis de montrer que la mise en place de la gestion par portefeuille induirait une augmentation de **10 % de la masse salariale, soit de l'ordre de 5 M€/an**, pour garder la même qualité de service qu'auparavant (voir Figure V.7). Aussi nous avons recherché et proposé une

architecture alternative à celle existante pour permettre de gérer les clients en portefeuille et annihiler le surcoût de dimensionnement [5.4]. Nous avons montré que **notre architecture permet d'offrir la même qualité de service tout en permettant que 85 % des appels soient traités par le portefeuille auquel ils ont été affectés**. Les résultats de ce travail sont à contre courant chacun cherchant à mutualiser les ressources d'un centre d'appels. En fait nos expérimentations montrent qu'il est possible d'atteindre les mêmes résultats qu'un regroupement total des ressources en ne " mutualisant " qu'une part faible des appels reçus...

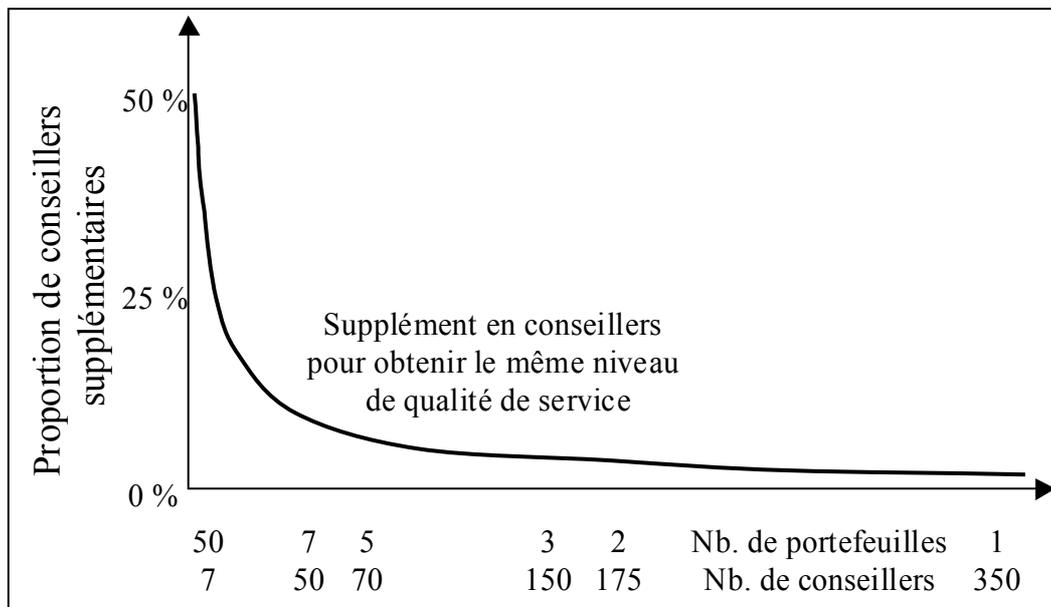


Figure V.7 : Coût de la gestion de portefeuille

### V.3. DIRECTIONS DE RECHERCHE FUTURES

Nous continuons à améliorer le processus de dimensionnement de manière à mieux appréhender les **effets des aléas** (dus aux erreurs de prévision de la charge, de l'arrivée aléatoire des appels, de l'absentéisme et des retards, etc.), **des règles de routage temps réel** (priorité entre clients...), **du process organisationnel** en place pour réaliser la planification et **du modèle de planification** (telle la granularité, i.e. la durée des tranches de planification, ou encore la longueur de l'horizon de planification, ou en environnement cyclique). Nous voulons améliorer la qualité de service en moyenne, mais aussi dans **le pire des cas sur la journée** grâce à des solutions dites équilibrées.

Nous cherchons aussi à proposer de nouvelles méthodes (approchées et exactes) pour mieux planifier le centre d'appels. A partir d'un ensemble de solutions obtenues à différentes étapes de la relaxation lagrangienne, nous voulons renforcer les bornes lagrangiennes (par des *additive bound*) et construire des solutions que nous espérons de qualité. En particulier nous allons développer des méthodes **d'arrondi aléatoire** des solutions relaxées <sup>42 (p : 3), 54</sup>.

<sup>54</sup> BARAHONA F., ANBIL R. (2000), "The Volume Algorithm: producing primal solutions with a subgradient algorithm", *Mathematical Programming*, Vol. 87, pp. 385-399.





# **CHAPITRE VI. APPLICATIONS MULTIPLES EN OPTIMISATION ET EN AIDE A LA DECISION**

Sommaire :

## **CHAPITRE VI. APPLICATIONS MULTIPLES EN OPTIMISATION ET EN AIDE À LA DÉCISION**

- VI.1. INTRODUCTION**
- VI.2. GESTION DE PRODUCTION**
  - VI.2.1. Gestion hiérarchique des systèmes de production**
  - VI.2.2. Gestion de grues et coffrages pour les chantiers de construction**
  - VI.2.3. Ordonnancement cyclique**
- VI.3. OPTIMISATION DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT, DITE DE *SUPPLY CHAINS***
  - VI.3.1. Approche fondamentale pour la productique et la logistique**
  - VI.3.2. Gestion de stock**
  - VI.3.3. Optimisation de découpe et des stocks**
- VI.4. MODÉLISATION, SIMULATION ET AIDE À LA DÉCISION**
  - VI.4.1. Simulation de phénomènes physiologiques et électromagnétiques**
  - VI.4.2. Conception automatique et optimisée**
  - VI.4.3. Sélection automatique multicritère**
  - VI.4.4. Prévision et modélisation économique**

## **VI.1. INTRODUCTION**

Ce chapitre rassemble des applications diverses en gestion et aide à la décision. Il concerne des travaux ponctuels qui n'ont pas donné lieu à une recherche organisée et systématique. Il illustre la variété des sujets abordés, en situant le contexte sans entrer très précisément dans les résultats. Aussi l'organisation de ce chapitre diffère de celle des précédents.

## **VI.2. GESTION DE PRODUCTION**

### **VI.2.1. Gestion hiérarchique des systèmes de production**

De 1996 à 1997, nous avons participé au contrat européen [Esprit HIMAC-8141](#) dont l'objet est le contrôle et la gestion hiérarchiques des systèmes de production. Dans le cadre de ce partenariat, Enrico CANUTO de [Turin](#), Barbara JANUSZ de [Karlsruhe](#), Jean-Marie PROTH et moi avons proposé une méthode unifiée [\[3.5.1\]](#). Nous avons également étudié la **constitution de lots de produits générant un coût minimal**. Le but est de déterminer les lots et la séquence dans laquelle les lots sont lancés en production de manière à minimiser la somme des coûts de fabrication, de changement de lot, de stockage des produits finis et de pénurie. Nous avons développé des heuristiques rapides inspirées de techniques de classification automatique et une méthode de recherche arborescente permettant de résoudre ce problème NP-difficile [\[3.2.2, 4.1\]](#).

### **VI.2.2. Gestion de grues et coffrages pour les chantiers de construction**

Lors de mes rencontres (quasi) hebdomadaires de 2000 à 2003 avec les membres de l'équipe [e-lab](#) (du groupe [Bouygues](#) dirigée aujourd'hui par Benoît ROTTEMBOURG), nous avons pu échanger et réfléchir sur des problématiques de [Bouygues Telecom](#) comme du groupe [Bouygues](#) : TF1, Colas... C'est dans ce cadre, par exemple, que Thierry BENOIST <sup>28 (p : 3)</sup> et moi avons pu établir la NP-complétude de différents problèmes d'existence de solutions pour la **gestion de grues et coffrages pour des chantiers de construction** [\[4.13\]](#) pour des applications dans le Bâtiment et les Travaux Publics de [Bouygues](#).

### **VI.2.3. Ordonnancement cyclique**

Jeffrey W. HERRMANN et Jean-Marie PROTH ont initié à l'Université du Maryland une étude de système de production cyclique, i.e. fabriquant indéfiniment la même séquence de produits. Pour ce type de système, il a été démontré que, quelque soit l'ordonnancement admissible choisi, il est toujours possible de saturer la machine goulot, et donc de maximiser la productivité du système. Aussi, en 1999, nous avons cherché l'**ordonnancement cyclique admissible qui tout en maintenant la productivité maximum** <sup>55</sup> **minimise les en-cours**. Nous avons proposé une heuristique basée sur les réseaux de Pétri <sup>56</sup> et une condition suffisante d'optimalité impliquant qu'un produit terminé pendant le cycle n'est disponible qu'à la fin du cycle... [\[2.8, 3.2.8, 4.10\]](#).

---

<sup>55</sup> LAFTIT S., PROTH J.-M., XIE X.-L. (1992), "Optimization of invariant criteria for event graphs", *IEEE Transactions Automation and Control*, Vol. 37, pp. 547-555.

<sup>56</sup> CHRETIENNE P. (1983), "Les réseaux de Pétri temporisés", thèse d'Etat, Université de Paris VI, Paris (France).

## VI.3. OPTIMISATION DE LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT, DITE DE SUPPLY CHAINS

### VI.3.1. Approche fondamentale pour la productique et la logistique

A l'occasion d'échanges au cours du programme franco-israélien [Arc-En-Ciel](#), Eugene LEVNER, Jean-Marie PROTH et moi avons introduit des graphes PERT avec alternatives. Cet outil de modélisation permet, par exemple, dans un problème de **gestion de projet de choisir des activités à exécuter parmi un ensemble d'activités équivalentes et alternatives**. Aussi deux types de nœuds sont considérés dans ces graphes : les nœuds *and* pour lesquels toutes les tâches y terminant doivent être achevées pour qu'une tâche y débutant puissent commencer et les nœuds *or* pour lesquels il suffit qu'une tâche y terminant soit achevée pour qu'une tâche y débutant puissent commencer<sup>57</sup>. Les nœuds *or* sont traditionnels pour les problèmes de plus long chemin des graphes PERT tandis que les autres correspondent à des nœuds de problèmes de plus court chemin... Ce modèle peut être utilisé comme outil de base pour résoudre des problèmes liant des aspects productiques et logistiques (de manière analogue à l'utilisation des graphes PERT pour aborder les problèmes d'ordonnancement et à celle des plus courts chemins pour les problèmes de routage).

Nous avons proposé des résultats fondamentaux [\[3.4.2, 4.7\]](#). En particulier, il existe **une et seule date au plus tôt pour chaque nœud *and* et *or***, ce qui permet de **minimiser le makespan**. Nous avons identifié des situations où cette **minimisation pouvait être réalisée en temps polynomial**. Ainsi nous avons développé des algorithmes nouveaux et rapides pour les cas où **les pondérations du graphe sont toutes de même signe**, où il n'y a pas plus d'un circuit... Nous avons également proposé une décomposition en *composantes fortement connexes*<sup>58</sup> (i.e. ensembles de nœuds pour lesquels il existe un chemin entre tout couple de nœuds) qui permet de combiner différentes situations. L'ensemble des situations que l'on peut résoudre en temps polynomial couvre les problématiques réelles de productique et de logistique.

Nous avons également proposé [\[3.2.10, 4.9\]](#) **une condition nécessaire et suffisante d'optimalité**. En fait, la solution optimale induit une arborescence d'arcs saturés couvrant l'ensemble des nœuds. Mais une arborescence d'arcs saturés n'est pas nécessairement optimale. Ces résultats ont permis de proposer **un algorithme pseudo polynomial performant permettant d'obtenir la solution optimale**. La problématique traitée ici est fondamentale : elle permet d'appréhender des aspects de routage et d'ordonnancement, mais aussi des systèmes dynamiques<sup>59</sup>, des problèmes issus de l'algèbre (Max, +) en discussion avec Stéphane GAUBERT de l'[INRIA](#)...

---

<sup>57</sup> DINIC E. A. (1990), "The fastest algorithm for the PERT problem with AND- and OR-nodes. (The New-Product-New-technology Problem)", *Proceedings of the Workshop on Combinatorial Optimization*, Waterloo, University of Waterloo Press, pp. 185-187.

<sup>58</sup> CORMEN T. H., LEISERSON C. E., RIVEST R. L. (1994), "Introduction to Algorithms", The MIT Press, Cambridge (Etats-Unis).

<sup>59</sup> SCHWIEGELSHOHN U., THIELE L. (1999), "Dynamic Min-Max Problem", *Discrete Event Dynamic Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 111-134

### **VI.3.2. Gestion de stock**

J'ai abordé les problématiques opérationnelles de **gestion des stocks** en 1995 lors de mon service national au 1<sup>er</sup> Régiment du Train, à Paris. En effet pendant 10 mois, j'ai été responsable du développement logiciel (sous Access) et de la gestion des stocks (d'habillement et mobilier) pour les 7 000 personnes du régiment. J'ai ensuite, à partir de 1997, encadré des Travaux Dirigés (33 heures) en gestion des stocks et en fiabilité à l'[EMN](#) (Ecole des Mines de Nancy). En 1998, l'entreprise Bergère de France située à Bar Le Duc (55), société renommée dans la vente par correspondance de produits fabriqués à partir de laine nous a fait appel pour **améliorer sa politique de gestion de stock**. Jean-Marie PROTH et moi sommes ainsi intervenus pour déterminer des niveaux de stocks optimaux de produits finis pour lesquels les ventes sont soumises à d'importantes fluctuations saisonnières.

### **VI.3.3. Optimisation de découpe et des stocks**

La thèse réalisée par Julien ANTONIO <sup>60</sup> sur les **problèmes de découpe** est très liée à la gestion de stock. En effet sa thèse aborde les problèmes de découpe non seulement en cherchant à minimiser les chutes, mais aussi en prenant en compte la **réutilisation des tombants** (i.e. des chutes des précédentes découpes). Aussi la gestion des stocks de tombants est intégrée aux problématiques de découpe. Son travail de thèse est issu de plusieurs contrats menés avec Chengbin CHU et Jean-Marie PROTH pour des sociétés de la sidérurgie françaises, belges et luxembourgeoises. C'est sur la base de ces expériences que nous avons proposé des heuristiques pour résoudre des problèmes de découpe NP-difficiles [\[2.2\]](#). Ces algorithmes utilisent **les principes de la programmation dynamique**. L'idée originale consiste à réduire le nombre d'états explorés et rendre la programmation dynamique opérationnelle : la fonction d'évaluation des états les plus prometteurs est calculée en priorité et les autres ne sont qu'estimés.

En parallèle de l'étude de problèmes d'ordonnancement [\[3.5.3\]](#), l'étude de l'optimisation de la découpe a été prolongée dans le cadre du contrat européen [Intas](#) entre l'[INRIA](#) et les Universités de [Graz](#), [Grenoble](#), [Minsk](#), [Omsk](#), [Sarrebruck](#), [Troyes](#). Nous avons également étudié une autre approche avec Ahmedou OULD HAOUBA, Doyen de l'Université de Nouakchott (Mauritanie) utilisant des modèles de **programmation linéaire et la génération de colonnes** [\[4.5\]](#).

## **VI.4. MODELISATION, SIMULATION ET AIDE A LA DECISION**

### **VI.4.1. Simulation de phénomènes physiologiques et électromagnétiques**

J'ai abordé la **simulation de phénomènes** physiologiques et de réseaux neuronaux lors d'un stage à l'[IBT](#) (Institut de Biologie Théorique), à Angers en 1993. En 1995, je me suis plongé dans un modèle caractérisant les phénomènes électromagnétiques dans le cadre d'un stage encadré par Jean-Baptiste ALBERTINI au [LETI](#) (Laboratoire d'Electronique, de Technologie et d'Instrumentation) du [CEA](#) (Commissariat à l'Energie Atomique), à Grenoble [\[1.1\]](#). Le modèle

---

<sup>60</sup> ANTONIO J. (1997), "Les problèmes de placement : étude et résolution de quelques problèmes réels", thèse de doctorat, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique ([INRIA](#)), TU-0450, Université de Metz, Metz (France), 14 février 1997, pp. 167.

sous-jacent issu des équations de Maxwell permet d'appréhender l'orientation du champ magnétique dans les têtes de lecture / écriture sur disque dur par sans avoir besoin de les réaliser. Mon rôle était d'obtenir une solution définissant l'orientation de l'aimantation dans un matériau mince minimisant l'énergie. Nous avons ainsi adapté et développé des méta heuristiques (telles que le recuit simulé et la méthode tabou) dans le but de sortir de minima locaux qui piègeaient les méthodes classiques de gradient <sup>61</sup>.

#### **VI.4.2. Conception automatique et optimisée**

Lors de ma thèse à l'[INRIA](#), j'ai été en charge d'un contrat pour la société [Sagem](#) à Argenteuil (95) sous la responsabilité de Jean-Marie PROTH. Elle développait une nouvelle technologie qu'elle souhaitait produire en masse. En vue de permettre son industrialisation, la [Sagem](#) cherchait à **évaluer et déterminer les coûts de fabrication** d'un tel produit. Nous avons développé des méthodes permettant de minimiser les coûts afférents à ce produit (coût de fabrication, coût d'investissement...) tout en préservant ses qualités. Les coûts d'utilisation du produit (consommation d'énergie...), et les coûts de retraitement en fin de vie devaient également être pris en compte par la [Sagem](#). L'ensemble des études réalisées est présenté dans différents documents dont les diffusions sont restreintes, vu la confidentialité du contrat.

#### **VI.4.3. Sélection automatique multicritère**

Depuis 2001, j'ai initié au sein de Bouygues Telecom plusieurs projets visant à mieux appréhender les problématiques stratégiques et à apporter une aide à la décision. C'est dans ce cadre qu'a été réalisé le projet SOPHIE permettant d'évaluer et de sélectionner automatiquement les services les plus prometteurs. Hamza BENGUEERAH et Francis de VERICOURT ont contribué à la bonne fin de ce projet. Une **méthode de choix multicritère** a été développée avec Sylvain DURAND de l'Université d'Avignon. L'originalité du travail résidait dans l'approche *axiomatique constructive*. Nous avons établi la liste des propriétés que notre méthode de sélection par agrégation devait vérifier (comme dans une approche axiomatique <sup>62</sup>) :

- axiome d'*ordinalité*, i.e. le classement final ne doit tenir compte que des positions relatives des services sur chaque critère,
- axiome de Condorcet, i.e. si la majorité des critères classe un service avant un autre, le choix final doit respecter ce classement,
- axiome de *monotonie*, i.e. l'amélioration de l'évaluation d'un service ne doit pas se traduire par une dégradation de son classement,
- axiome d'*indépendance*, i.e. l'ajout d'un service ne doit pas changer l'ordre des autres.

En plus de ces propriétés, il fallait que la méthode retenue soit discriminante (pour départager le plus possible les services), robuste (pour éviter que le résultat ne soit sensible à un seul critère), simple (pour pouvoir être facilement exposée et implémentée). Aucune méthode d'agrégation de choix ne vérifiait toutes les conditions <sup>62</sup> (p. 3) comme bien souvent ! Aussi nous avons

---

<sup>61</sup> AID M. (1993), "Simulation de la répartition en domaines des pièces polaires des têtes d'enregistrement magnétique en couches minces", thèse de l'Institut national Polytechnique de Grenoble, Grenoble (France).

<sup>62</sup> ARROW K., RAYNAUD H. (1986), "*Social choice and multicriterion decision-making*", MIT Press, Cambridge (Etats-Unis).

sélectionné des méthodes<sup>63 64</sup> qui vérifient quelques-uns des axiomes comme le score de Borda, le “ top cycle ”<sup>65</sup>, le “ choix prudent ”<sup>62 (p:3)</sup>... Nous avons ensuite cherché empiriquement celle qui respectait les propriétés identifiées avec la plus grande probabilité<sup>66 67</sup> (i.e. avec la plus grande proportion de profils) [\[3.4.6\]](#).

#### **VI.4.4. Prévision et modélisation économique**

Nous avons développé des **modèles markoviens** i.e. pour lesquels les clients sont dans un seul état à tout instant et les probabilités de transitions entre état sont supposés être invariantes ; nous avons étendu ce modèle pour que les probabilités de transition puissent **évoluer au cours du temps** (suivant une tendance et des saisons) et **en fonction d'événements** (promotionnels, concurrentiels, législatifs...) [\[5.5\]](#). Nous avons appliqué ce modèle aux différents états de la vie du client en vue de prévoir les actions (résiliation, migration d'offres...) des clients. Nous avons ainsi étudié l'impact de la forme des plans tarifaires sur la consommation et amélioré significativement la **prévision du nombre de résiliations** en prenant en compte le programme de fidélisation.

Nous avons proposé des **modèles de diffusion d'usage et de technologies**. Ces modèles sont une autre extension de modèles markoviens où les changements d'états des clients (par exemple, le passage d'un client non utilisateur à utilisateur) dépendent de la répartition des clients dans les états. Typiquement, le nombre de clients adoptant l'usage ou la technologie à un instant donné est proportionnel au produit du nombre de clients non usagés (qu'il reste à convaincre) et au nombre d'usagers (susceptibles de convaincre les non usagers). Ce type de mécanisme peut être décrit par un système d'équations différentielles duquel le modèle découle. Nous avons ainsi prévu les évolutions rapides de l'envoi de *SMS* (i.e. messages courts envoyés entre téléphones mobiles). 1,5 milliards de *SMS* ont été acheminés sur le réseau de [Bouygues Telecom](#) en 2002, ce qui correspond à 32 *SMS* par client et par mois et à une augmentation de 85 % par rapport à 2001<sup>70</sup>. Les modèles proposés ont permis de **s'ajuster à seulement 3 % des historiques...** Nous avons également étudié l'assimilation de nouvelles technologies telle que l'i-mode<sup>TM</sup> qui a séduit 200 000<sup>70</sup> clients de son lancement en novembre 2002 à juin 2003.

Nous avons également développé des **modèles de survie**. Ces modèles s'appuient sur des distributions de Weibull, Fréchet ou Gumbel, d'après la loi des valeurs extrêmes<sup>68 69</sup>. Nous

---

<sup>63</sup> FISHBURN P. (1977), "Condorcet Social Choice Functions", *S.I.A.M. Journal on Applied Mathematics*, Vol. 38, pp 469-489.

<sup>64</sup> MARCHANT T. (1996), "Valued Relations Aggregation with the Borda Method", *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, Vol. 5, pp 127-132.

<sup>65</sup> SCHWARTZ T. (1972), "Rationality and the myth of the maximum", *Noûs*, Vol. 6, pp 97-117.

<sup>66</sup> DURAND S. (2000), "Sur quelques paradoxes en théorie du choix social et en décision multicritère", thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble (France), juin 2000.

<sup>67</sup> SAARI D. (1994), "Geometry of Voting", Springer-Verlag, Berlin (Allemagne).

<sup>68</sup> GNEDENKO B. (1943), "Sur la distribution limite du terme maximum d'une série aléatoire", *Annals of Mathematics*, Vol. 44, pp. 423-453.

<sup>69</sup> CASTILLO E. (1988), "Extreme value theory in engineering", *Statistical Modeling and Decision Science*, Academic Press, Inc.

avons utilisé ces modèles pour déterminer le délai de rechargement des cartes prépayées, le taux de résiliation des clients libres d'engagement, la durée d'appels d'un client...

Nous avons également développé des **modèles gravitaires** pour appréhender l'intensité des communications entre deux zones géographiques. Comme dans le modèle physique de gravitation, l'intensité des appels entre deux zones géographiques est proportionnelle au poids de chacune des deux zones géographiques et diminue avec la distance entre les zones. Nous avons ainsi lancé plusieurs études visant à modéliser et quantifier le marché de la téléphonie mobile. Le projet CAC36 a permis, grâce à Mickaël BOUVIER et Alexandre MEYRIGNAC, de modéliser le Chiffre d'Affaire de [Bouygues Telecom](#) et de prévoir la Consommation des clients à 36 mois. Les modèles originaux proposés ont permis de quantifier des phénomènes de consommation (comme les effets tribus, de palier de consommation, etc.) et de **diviser par 2 l'erreur de prévision sur le C.A. qui s'élevait à 2,95 milliards € en 2002** <sup>70</sup>. Certains des éléments ci-dessus ont contribué à la thèse de Vladimir BULATOVIC <sup>71</sup>.

Notre approche de modélisation est décrite plus en détail dans le paragraphe I.2.2 (p : 3). Elle consiste à identifier **des hypothèses réalistes** et à en déduire le modèle (i.e. l'ensemble des équations que doivent vérifier les informations). Ensuite les paramètres inconnus du modèle sont ajustés sur les historiques d'informations. Le modèle est extrapolé pour prévoir l'évolution future. Ces travaux s'appuient sur différents modèles connus que nous avons enrichis et développés pour nos applications spécifiques.

---

<sup>70</sup> Communiqués de presse des 13/01/03, 23/01/03 et 18/06/03 de Bouygues Telecom.

<sup>71</sup> BULATOVIC V. (2004), "Les enjeux économiques de l'interconnexion des réseaux de télécommunications", thèse de doctorat, Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre Bouygues Telecom et l'Université d'Orléans, Orléans (France), 2004.



## **CHAPITRE VII. PERSPECTIVES**

Sommaire :

### **CHAPITRE VII.      PERSPECTIVES**

**VII.1. DOMAINES D'APPLICATION**

**VII.2. DOMAINES DE RECHERCHE**

**VII.3. LA MODÉLISATION**

**VII.4. UNE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE**

**VII.4.1. Une Recherche Opérationnelle orientée par les besoins**

**VII.4.2. Pratique de la Recherche Opérationnelle**

**VII.4.3. Vivre d'une Recherche Opérationnelle**

En conclusion de ce mémoire, je propose dans ce chapitre de faire le point sur mes activités et de proposer différentes directions de travail en ce qui concerne les domaines d'application et de recherche, la modélisation et la recherche opérationnelle.

## VII.1. DOMAINES D'APPLICATION

J'ai saisi l'opportunité d'aborder des domaines d'application particulièrement variés. Je me suis confronté, tout d'abord à l'[INRIA](#), aux problématiques de **productique** en particulier l'ordonnancement en temps réel (voir chapitre II), et de **logistique** sur la gestion de voitures en libre-service (voir chapitre III). Puis, chez [Bouygues Telecom](#), j'ai tenté d'optimiser les **réseaux** et plus spécifiquement le routage dans les réseaux de télécommunications (voir chapitre IV). J'ai développé l'activité de l'équipe que j'animais au-delà des domaines cités ci-dessus, domaines traditionnels de la recherche opérationnelle. Les applications qui m'ont intéressé sont celles où les décisions à prendre représentent des enjeux importants pour l'entreprise. C'est ainsi que j'ai appréhendé des problématiques nouvelles de **centre d'appels** (voir chapitre V), et de **marketing** (voir dans le chapitre VI le paragraphe sur la Prévision et la modélisation économique).

Je reste particulièrement intéressé par les applications de niveaux **tactico-stratégiques** (plutôt que de niveaux très opérationnels) du fait de leurs enjeux et de leur positionnement. Je souhaiterais, pour cette raison, me consacrer à des problématiques davantage liées à **la stratégie et à l'économie**. Cette préférence explique, pour une part, mes choix professionnels du moment. Du reste, de telles problématiques devraient être au centre des préoccupations de toute notre communauté française de recherche opérationnelle. Au contraire de ce qui apparaît, les études en recherche opérationnelle devraient aussi abonder sur les **thèmes d'enjeux importants pour les organisations et la société** comme " la loi sur les 35 heures ", " la réforme de la sécurité sociale ", " la politique de logements ", " la décentralisation "...

## VII.2. DOMAINES DE RECHERCHE

La curiosité et les problématiques auxquelles j'ai été confronté m'ont poussé à aborder des techniques variées issues de la recherche opérationnelle et des mathématiques appliquées. En effet, ma démarche (qui se veut opérationnelle) ne consiste pas à appliquer exclusivement les techniques que je maîtrise, mais aussi à rechercher les techniques adaptées aux problématiques que je dois résoudre. Ceci implique d'adopter une approche pluridisciplinaire.

Les résultats auxquels j'ai contribué ont concerné **l'optimisation** (modélisations et résolutions de problèmes d'optimisation linéaires, non-linéaires et en nombres entiers, calcul de bornes), **l'algorithmique** (nouveaux algorithmes, preuves de complexité) et **la théorie des graphes** (extension des graphes PERT). J'ai également participé à des recherches dans d'autres domaines : évaluation de performance, théorie des files d'attente, processus stochastiques, statistiques, contrôle optimal, simulation, économétrie... Même si ces domaines restent dans le cadre des mathématiques appliquées, le manque de connaissance pointue de la bibliographie ne m'a pas permis de valoriser les résultats obtenus par des publications scientifiques de haut niveau.

Dans le domaine de l'optimisation, la prise en compte des aspects aléatoires a été prépondérante dans mon travail et celui de mon équipe chez [Bouygues Telecom](#) ces dernières années

(notamment en ce qui concerne la qualité de service dans les centres d'appels et les réseaux). J'ai proposé des modèles intégrant des aspects **stochastiques et combinatoires**. De telles problématiques suscitent un véritable intérêt tant du point de vue des applications que de la recherche en optimisation. En effet du fait de la non-linéarité introduite par les phénomènes stochastiques, il n'existe pas aujourd'hui d'outils d'optimisation sur le marché pour les appréhender.

De gros efforts ont été réalisés par les éditeurs pour rendre les outils d'optimisation conviviaux et interactifs, et même pour les intégrer aux outils bureautiques (comme à *Microsoft Excel*). De plus l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs permet d'appréhender facilement de nombreuses problématiques réelles. Pour que les recherches algorithmiques de la recherche opérationnelle conservent un intérêt opérationnel, les études ne doivent pas se cantonner à la résolution des modèles "traditionnels". Au contraire, les chercheurs intéressés par le développement d'algorithmes doivent s'orienter **vers l'optimisation de modèles mathématiques où les outils du marché ne sont pas suffisamment pertinents**. C'est pourquoi en ce qui concerne la résolution de modèles, la recherche opérationnelle doit concerner des modèles toujours plus complexes pour des problématiques de plus en plus spécifiques.

### VII.3. LA MODELISATION

**Le développement de modèles pertinents** (voir définition au paragraphe I.2.2) est fondamental dans ma démarche et dans la manière dont je conçois la recherche opérationnelle. Au premier chapitre, j'ai pris le risque d'exposer ma méthodologie pour élaborer de nouveaux modèles, formalisant ainsi notre savoir-faire. Le principe de base en est de déduire le modèle à partir d'hypothèses préalablement identifiées. J'ai tenté, dans les autres chapitres, d'éclairer les apports qu'ont engendrés nos travaux en terme de modélisation.

Aujourd'hui **le modèle est le prisme à travers lequel j'appréhende la réalité**. Cette déformation permet de mettre en exergue les éléments les plus saillants des problématiques que je rencontre. Le modèle offre aussi la possibilité de se projeter en dehors des situations existantes. C'est autant un résultat qu'une méthodologie pour comprendre, analyser et trouver des solutions ! La recherche d'un modèle pertinent m'apparaît souvent plus importante que l'optimisation qui peut être faite une fois le modèle posé. Les modèles ont contribué à nos succès chez [Bouygues Telecom](#) engendrant de meilleures compréhensions, des résultats plus fiables, des prévisions plus précises et finalement de réelles optimisations !

Les outils informatiques du marché permettent d'appréhender des modèles toujours plus complexes. C'est pourquoi la valeur ajoutée du chercheur qui se veut opérationnel consiste aujourd'hui à proposer des modèles pertinents en s'appuyant sur les outils existants. Pourtant les modèles me paraissent insuffisamment mis en avant par la communauté scientifique. C'est pourquoi je pense que notre communauté de recherche opérationnelle devrait valoriser davantage le développement et la validation de modèles pertinents.

### VII.4. UNE RECHERCHE OPERATIONNELLE

J'aimerais continuer à **allier le résultat opérationnel à la démarche scientifique**, car c'est cela qui, selon moi, constitue une recherche opérationnelle.

#### VII.4.1. Une Recherche Opérationnelle orientée par les besoins

La compétitivité entre les entreprises leur impose de toujours innover, de proposer de nouveaux produits ou services de meilleure qualité à un moindre coût... Ceci génère naturellement de nouvelles problématiques concrètes que les sociétés industrielles doivent appréhender (comme les chaînes d'approvisionnement, désignées en anglais par *supply chains* en vogue ces dernières années). Pour que le résultat d'une recherche opérationnelle soit une vraie réponse à de réelles préoccupations, cette recherche doit être orientée par le besoin. Notre communauté de recherche opérationnelle devrait donc se laisser davantage guider par les préoccupations simples et pratiques des entreprises et, plus généralement, des organisations.

#### VII.4.2. Pratique de la Recherche Opérationnelle

**L'activité d'optimisation** proprement dite **d'un praticien** de la recherche opérationnelle est **relativement réduite**. Tout d'abord les attentes industrielles en optimisation se révèlent souvent simples. Elles se limitent fréquemment à obtenir une solution réalisable et ne requièrent pas un spécialiste des techniques d'optimisation. Ensuite il existe un certain nombre de pré requis à l'application d'outil d'optimisation. Par exemple, il faut disposer des données pour calibrer les modèles (voir Annexe IX.3.1 Outils d'aide à la décision). En fait, comme je l'ai détaillé précédemment, **la définition d'un modèle pertinent apparaît comme fondamentale** dans la pratique d'une recherche opérationnelle. En dehors de ces aspects que je qualifierais de techniques et scientifiques, le praticien doit s'organiser pour mener à bien son projet d'optimisation. La bonne gestion du projet est indispensable pour que les résultats de sa recherche soient utilisés de manière opérationnelle (voir Annexe IX.3.2 Conseil dans le cadre de projets). Finalement pour mettre en œuvre les solutions qu'il préconise, le praticien de la recherche opérationnelle doit s'impliquer dans la conduite du changement des *process*, des organisations et des hommes.

La recherche opérationnelle réclame très peu de ressources par rapport à celles utiles aux projets dans lesquels elle s'intègre. Pour l'exemple, l'architecture de gestion par portefeuille du centre d'appels que nous avons proposée, a requis de notre part une énergie réduite (moins d'un demi homme / an) par rapport à celle nécessaire au déploiement au sein de l'entreprise de la gestion par portefeuille auprès des 2 500 conseillers de clientèle. Dans une entreprise comme [Bouygues Telecom](#), l'activité en recherche opérationnelle (au sens large) n'occupe pas plus d'une personne pour 1 000 salariés.

#### VII.4.3. Vivre d'une Recherche Opérationnelle

Schématiquement, je perçois deux voies qui permettent de **subsister grâce à une recherche opérationnelle, soit développer des outils logiciels, soit apporter un conseil** en réponse aux attentes opérationnelles. Sans vouloir dénigrer l'une ou l'autre, ce sont ces deux voies qui distinguent aujourd'hui, selon moi, le positionnement de la société [Eurodecision](#) [3.3.1, 3.4.4] de celui d'[Artelys](#) [3.1.5, 3.2.14, 3.4.7, 3.4.8]. Depuis 2000, nous pouvons noter une tendance à la rationalisation des moyens des centres de Recherche & Développement. Même dans les grands groupes (y compris à France Telecom et IBM), les équipes de R&D en recherche opérationnelle sont fortement orientées sur des objectifs opérationnels de développement logiciel ou de conseil (quand elles ne sont pas tout simplement supprimées).

Les **logiciels** sont la plupart du temps destinés à un **usage opérationnel** tel que planifier l'activité des conseillers de clientèle. Leur développement nécessite des compétences informatiques et algorithmiques. A moyen terme, ils permettent de dégager des marges financières, d'une part en **assurant la maintenance des logiciels**, d'autre part en **réutilisant les codes informatiques** pour d'autres applications. Le développement d'applications informatiques correspond au positionnement initial de notre équipe au sein de la R&D de [Bouygues Telecom](#) ou encore à l'activité du [e-lab](#) au sein du groupe Bouygues. Les applications que nous avons développées et qui sont encore utilisées régulièrement à [Bouygues Telecom](#) sont essentiellement des outils de prévision et de simulation :

- prévision d'appels aux centres de clientèle,
- estimation, prévision et simulation des flux d'appels entre équipements du réseau d'accès,
- prévision et simulation de la consommation des clients et du Chiffre d'Affaire de l'entreprise,
- prévision de la diffusion de technologies et d'usages des SMS, MMS, i-mode™,
- prévision et simulation des résiliations de contrats [\[5.5\]](#).

Nous avons voulu, gage d'un transfert technologique réussi, que tous ces logiciels soient délivrés et que leurs utilisateurs se les approprient.

Nous avons également développé des **composants logiciels** incorporés à des outils et qui sont utilisés constamment :

- évaluation du temps d'attente des clients pour le routage vers le centre d'appels où l'attente sera la plus réduite [\[5.1\]](#),
- estimation des intentions d'appels et des rappels parmi ceux reçus au centre de clientèle [\[5.3\]](#),
- détection automatique des incidents et des fraudes dans le trafic interconnecté [\[5.6\]](#).

Le **conseil** répond généralement à des **questions d'ordre tactique ou stratégique** comme mesurer les impacts de la qualité de service sur le dimensionnement des réseaux de télécommunications. Le conseil est souvent le résultat d'une étude et peut éventuellement s'appuyer sur le développement d'outils spécifiques. Répondant à des préoccupations de plus hauts niveaux que les outils opérationnels, les études et le conseil sont plus **faciles à valoriser à court terme**. Depuis 2002, j'ai souhaité faire évoluer le positionnement de notre équipe au sein de [Bouygues Telecom](#) vers une telle activité de conseil. Les sujets les plus notables que nous avons étudiés sont les suivants :

- les phénomènes de renouvellement d'appels et la planification des emplois du temps avec prise en compte des reports d'appels [\[3.2.11, 3.4.9, 5.3\]](#),
- la gestion en portefeuille de clients du centre d'appels et proposition d'architecture [\[5.4\]](#),
- le routage avec objectifs de qualité de service différenciés par classe d'appels,
- la mesure de l'impact des forfaits sur la consommation,
- la mesure de l'impact du programme de fidélisation sur les résiliations.

Les outils logiciels du marché offrent de plus en plus de fonctionnalités. C'est pourquoi il est difficile, pour une équipe de R&D, d'offrir des outils industriels à un prix compétitif. Conséquemment, les outils du marché nécessitent une expertise de plus en plus grande et les rendent inappropriés pour aborder des problématiques tactico-stratégiques (dont le besoin ne se fait sentir que ponctuellement). C'est la voie du conseil que nous avons privilégiée au sein de notre équipe à [Bouygues Telecom](#). C'est également dans cette voie que chaque membre a été reconnu et poursuit aujourd'hui son parcours professionnel.

