



Evaluation des coûts des réseaux de télécommunications par la méthode paramétrique

1996

TERA Consultants
32, rue des Jeûneurs
75002 PARIS
Tél. + 33 (0) 1 55 04 87 10
Fax. +33 (0) 1 53 40 85 15

S.A.S. au capital de 200 000 €
RCS Paris B 394 948 731

Introduction

L'estimation des coûts des réseaux de télécommunications constitue un enjeu aussi bien pour les entreprises qui les exploitent que pour les autorités réglementaires en charge du contrôle de ces entreprises. Pour estimer ces coûts, le recours aux méthodes économétriques a souvent été privilégié. Dans ce contexte, les travaux se sont focalisés sur l'estimation de fonctions de coût de long-terme sous la forme d'une fonction trans-log (Ivaldi, 1991 ; Christensen, Cummings, Schoech, 1983 ; Kiss, Karabadjian, Lefebvre, 1983; Caves, Christensen, Thretaway, 1981 ; Nadiri, Schankerman, 1981; Vinod, 1976 ; Kiss, Lefebvre, 1987). Les conclusions divergentes obtenues quant à l'existence ou non d'économies d'échelle ou d'envergure dans les réseaux de télécommunications interrogent néanmoins sur la fiabilité des résultats.

Pour expliquer ces divergences, on peut bien sûr évoquer l'insuffisance des données¹ et leur hétérogénéité d'une étude à l'autre. Toutefois, il convient de soulever un problème plus fondamental tenant au processus de construction des variables qui interviennent dans la fonction de coût. En effet, des grandeurs telles que le prix du capital, le prix du travail ou la quantité d'output d'une entreprise multiproduit n'existent pas dans le système d'information des entreprises² ; il faut donc les construire. Or, pour ce faire non seulement les variables sont construites de façon *ad hoc*, mais en outre la procédure utilisée améliore arbitrairement les tests de validité des fonctions de coût recherchées³.

La méthode paramétrique permet de dépasser ces obstacles. Développée dans les années soixante-dix chez RCA par ? Freiman, cette méthode a pour objet l'estimation des fonctions de coût. Les développements de cette méthode ont débouché sur de nombreux modèles

¹ Rappelons qu'il n'est pas possible de valider statistiquement une fonction de XX variables à partir de XX observations annuelles, sauf si la forme de la fonction recherchée est prouvée par ailleurs, ce qui n'est pas le cas pour la fonction de coût des télécommunications.

² Derrières ces difficultés, on retrouve notamment le fameux débat ouvert par J. Robinson sur l'agrégation des différents biens capitaux participant à la production d'un même output .

³ Pour une discussion approfondie sur ce point, cf. Jeux, 1994, chapitre 1.

dont les plus généraux quant à leur champ d'application sont PRICE et FAST⁴. Par essence inductive, la performance de cette méthode repose, pour une bonne part, sur la qualité des bases de données qu'elle mobilise. Pour cette raison, les modèles paramétriques développés jusqu'à présent, qu'ils soient généraux ou dédiés⁵, ne nous semblent pas directement applicables aux télécommunications car les spécifications techniques des réseaux sortent du domaine de validité des bases de données utilisées par les modèles existants.

Dans cet article, partant d'une base de données originale sur le réseau de France Télécom, nous utiliserons la méthode paramétrique pour évaluer les coûts des réseaux régionaux de cet opérateur. Nous verrons ainsi que la fonction de coût obtenue par cette méthode ne présente pas d'économies d'échelle et que la séparabilité des coûts dans toute entreprise multiproduit ne peut être déduite des fonctions de coût estimées par les méthodes statistiques.

1. Principes de la méthode paramétrique

La méthode paramétrique est principalement utilisée dans l'évaluation économique de grands projets en phase de développement. Les institutions américaines de l'armement et de l'aérospatiale⁶ estiment par son intermédiaire les coûts de nombreux produits et sous-produits. La méthode paramétrique est dite "Top-down" car elle permet d'étudier le coût du projet dans son ensemble avant d'en étudier les parties. On utilise cette méthode aussi bien pour étudier le prix d'un avion de combat que celui de son moteur ou d'un missile qu'il devra transporter.

⁴ Ces deux modèles développés par Freiman permettent d'évaluer le coût de tout bien ou partie de bien requérant des fonctions mécaniques, électroniques ou logicielles (avion, automobile, satellite, etc.). Ils sont vendus respectivement par General Electric et FAST.

⁵ En dehors des modèles à vocation générale tels que PRICE et FAST, il existe des modèles dédiés comme celui de la RAND pour l'avionique, le modèle COCOMO pour les logiciels, etc.

⁶ On peut noter parmi les entreprises qui utilisent les méthodes paramétriques : Aerojet, Aerospace, Boeing, Hughes Aircraft, ITT, NASA, US Army, US Navy parmi bien d'autres. En France : Aerospatiale, CNES, Thomson.

Dans le cas d'un avion, on cherchera à connaître tout d'abord les caractéristiques de coût de l'ensemble du projet. Cette première caractérisation permet de préciser les parties dont le coût influencera davantage le coût total et les parties dont la méconnaissance demande une étude plus approfondie afin de préciser l'évaluation. Le découpage en modules vient donc naturellement préciser la première évaluation. Ce découpage doit avoir un sens au niveau technique de telle sorte que les éléments d'information soient disponibles, il doit aussi venir préciser les informations du niveau modulaire supérieur. La complémentarité entre la caractéristique top-down et la modularité est claire: le découpage en modules d'un projet n'a de sens que si l'évaluation des coûts vient préciser l'évaluation globale.

Dans le cas de l'avionique par exemple, RAND [1987], la recherche de la paramétrisation de l'avion montre que le poids à vide et la surface portante sont de bonnes variables explicatives du coût de l'avion. Des fonctions estimatrices de coût portant sur ces variables sont donc recherchées. Cependant, des irrégularités apparaissent dans les estimations, une étude plus approfondie montre la corrélation entre ces irrégularités et la puissance du moteur. Deux possibilités se présentent alors, tenter d'utiliser la puissance du moteur comme une variable explicative du coût de l'avion ou découper l'appareil en modules; dont le moteur. Ces modules évalués indépendamment avec leurs propres variables explicatives donnent une évaluation plus précise du coût de l'avion.

La décision de disséquer le projet en modules crée deux difficultés. Il est nécessaire de disposer des éléments d'analyse permettant d'évaluer les coûts de chaque module. Le coût du projet complet n'est pas nécessairement la somme des coûts des modules, une étude précise du coût de l'agrégation est donc nécessaire. L'étude du projet en modules se justifie lorsque la précision apportée est plus grande que celle obtenue en ajoutant des variables explicatives au modèle.

Principes de la recherche des Fonctions estimatrices de coûts (FEC)

L'évaluation paramétrique des coûts impose de disposer d'une base de données constituée d'**observations** sur un ensemble de **caractéristiques** des **individus** composant cette base. La base doit comporter au moins une vingtaine d'individus, seuil minimal permettant de rechercher une fonction de coût dépendant d'une seule variable. Le(s) coût(s) que l'on cherche à expliquer doit **impérativement** être une des caractéristiques de la base. Une caractéristique peut prétendre ultérieurement au statut de **variable explicative** d'une fonction de coût sous deux conditions :

- que la base contienne des observations sur ces caractéristiques pour 95% des individus ;

- que "la caractéristique doit être logiquement reliée aux coûts : il faut pouvoir rationaliser l'explication d'une influence de la caractéristique sur les coûts" (RAND, 1987). Il est clair qu'implicitement, le choix de ces caractéristiques s'effectue de façon discrétionnaire et requiert une expertise technique et organisationnelle dans le domaine où la méthode est appliquée.

On appelle **Fonction de Régression des Caractéristiques** (FRC) toute fonction obtenue par régression statistique entre une caractéristique de coût et une ou plusieurs caractéristiques de la base de données.

Contrairement à la démarche économétrique, la méthode paramétrique, de par sa nature inductive, va conduire à rechercher sans *a priori* un grand nombre de fonctions de coût. Cette procédure de recherche exhaustive des FRC présente l'avantage d'augmenter la possibilité de trouver des fonctions le plus fiable possible. En revanche, cette procédure présente l'inconvénient d'être potentiellement très lourde : primo, il n'est pas rare de recenser une cinquantaine de caractéristiques susceptibles d'influencer significativement le coût, secundo, la forme de la fonction liant des caractéristiques au coût n'est pas prédéterminée : il faut la chercher. Ainsi, il est rarement possible d'effectuer une recherche de FRC avec un maximum d'exhaustivité sur l'ensemble des caractéristiques ; restreindre le champ d'investigation s'avère nécessaire. Cette restriction se fait à trois niveaux : la forme des FRC recherchées, le nombre de variables explicatives prises en compte et les combinaisons de variables explicatives autorisées.

- On cherchera le plus souvent des FRC ayant la forme d'une combinaison linéaire ou log-linéaire des variables explicatives. Les fonctions linéaires sont les premiers termes du développement limité d'une fonction⁷. Les fonctions log-linéaires sont la partie linéaire du développement en éléments simples du logarithme de la fonction par rapport au logarithme des variables explicatives. Par exemple dans les études de la RAND (1986, 1987, 1989), les FRC obtenues sont toujours de type Cobb-Douglas (développement log-linéaire).

⁷ Sans tenir compte des effets purement probabilistes, les variations de la fonction réelle par rapport à la fonction approximée sont inférieures d'un ordre de grandeurs aux variations des variables.

- Le nombre de variables explicatives prises en compte dans les FRC dépend du nombre d'individus recensés dans la base de données. Le degré de liberté⁸ doit rester dans des proportions telles que l'approximation garde un sens du point de vue statistique. Ainsi, pour une base de données comportant trente deux individus, Hess et Romanoff [1987] préconisent la recherche d'une fonction de quatre variables explicatives au maximum. Pour un échantillon de dix à quinze observations, ils estiment devoir réduire le nombre de variables à trois, lorsque la taille de l'échantillon tombe en dessous de dix, le nombre de variables considérées simultanément doit se limiter à deux.

- Enfin, les caractéristiques doivent être regroupées par type. Par exemple pour les avions, on en distingue quatre types : les caractéristiques de taille (poids à vide, surface portante, etc.), celles de performances (vitesse de pointe, puissance développée, etc.), celles de construction (rapport de surface portante à taille des ailes, nombre de boîtes noires, etc.), celles de programme (nombre de tests de structure, indicateur de moteur nouveau, etc.). Les regroupements par type se justifient dans la mesure où l'on sait que deux caractéristiques d'un même type risquent d'être fortement corrélées, tandis que deux variables de type différent permettront d'expliquer des tendances complémentaires de l'évolution du coût. Ainsi dans le cas de l'avion, les FRC recherchées posséderont, au maximum, quatre variables explicatives puisque les caractéristiques sont regroupées en quatre type⁹. Chacune de ces variables relèvera nécessairement d'une caractéristique de type différent. On le perçoit bien, cette démarche permet de réduire considérablement le nombre de FRC à tester. Le regroupement par type des caractéristiques s'effectue en deux étapes : dans un premier temps, on calcule la matrice de corrélation des caractéristiques et on regroupe les caractéristiques fortement corrélées entre elles¹⁰, dans un second temps, on fait vérifier par des spécialistes du domaine la cohérence des types mis en évidence statistiquement. Une correction "manuelle" peut alors être

⁸ Le "degré de liberté" exprime le rapport entre le nombre de variables explicatives et le nombre d'individus.

⁹ Il reste parfois utile de tester des fonctions faisant intervenir des variables très corrélées, l'analyse doit garder en mémoire les effets artificiellement stabilisateurs de ce type d'association et la forte substituabilité des variables.

¹⁰ On peut choisir un seuil de coefficient de corrélation supérieur à 0,75.

envisagée afin de rendre la typologie plus conforme avec l'expérience des spécialistes.

Au total, le nombre de variables explicatives qui peuvent entrer dans la caractérisation d'une FRC restera petit par rapport au nombre d'observations qui permettent de déterminer la FRC. Les modèles paramétriques de la RAND dans l'aviation utilisent ainsi des échantillons de la même taille que la plupart des études économétriques menées sur les télécommunications ; cependant, les fonctions de coût obtenues par la Rand ne comportent que 3 ou 4 variables explicatives au lieu de la quinzaine généralement observées dans les modèles économétriques de coût des télécommunications.

De la FRC à la FEC

On appelle **Fonctions Estimatrices de Coûts** (FECs) les fonctions de régression des caractéristiques (FRC) qui expliquent le "mieux" la(les) caractéristique(s) de coût(s).

La notion de "mieux" renvoie uniquement à des critères statistiques sans restriction quant à la nature des variables explicatives ; celles-ci pouvant être aussi bien de nature physique (poids, taille, etc.), de nature technologique (matériaux utilisés, génération d'équipements, etc.), de nature organisationnelle (nombre d'employés nécessaires, qualifications requises, etc.), ou de nature financière. Les différentes FRC sont donc hiérarchisées selon leurs performances statistiques : certaines sont définitivement éliminées tandis que les meilleures, les FEC, seront celles utilisées, en fonction des données disponibles, pour les estimations futures des coûts.

Cette étape est particulièrement importante, aussi la RAND a-t-elle plus particulièrement formalisé les critères d'évaluation qui permettent le choix des FEC au sein des FRC. Neuf critères sont préconisés, distingués en "critères de qualité statistique" et "critères de pertinence".

- Les critères de qualité statistique utilisés sont : la valeur significative des variables évaluée grâce à un t-test,¹¹ le coefficient de détermination (R^2 ou R) qui est utilisé pour indiquer le pourcentage de variation expliqué par la régression, l'erreur standard

¹¹Ne sont retenues que les équations où toutes les variables sont significatives au niveau de 5% (RAND, 1987).

estimée¹², la F-statistique (celles pour lesquelles la neutralité présente une probabilité supérieur à 5% sont éliminées), la multicollinéarité¹³, la forme des résidus¹⁴, les données influentes¹⁵.

- Les critères de pertinence sont le signe de la relation¹⁶, la magnitude¹⁷ des coefficients et les propriétés prédictives¹⁸.

Passées à travers ce filtre analytique, les FRC sont donc triées, les seules fonctions retenues sont donc les Fonctions Estimatrices de coût.

Cadre d'une analyse paramétrique des coûts du réseau de France Télécom

Un réseau de télécommunications constitue une structure en perpétuelle transformation. A un moment donné du temps, il est possible de décrire l'état du réseau (figure 1).

¹² Elle indique l'ordre de grandeur de la différence entre les données et la forme réduite.

¹³ Les fonctions d'estimations utilisant des variables dont l'intercorrélation apparaît trop importante sont rejetées, le degré maximum de corrélation jugé acceptable par Hess et Romanov est de 0,7.

¹⁴ Elle comporte une analyse de la moyenne et de l'homoscédasticité. En particulier, si pour les estimations les plus récentes, l'espérance des valeurs prédites s'écarte de celle des valeurs données ou si la variance devient plus importante, la fonction doit être rejetée.

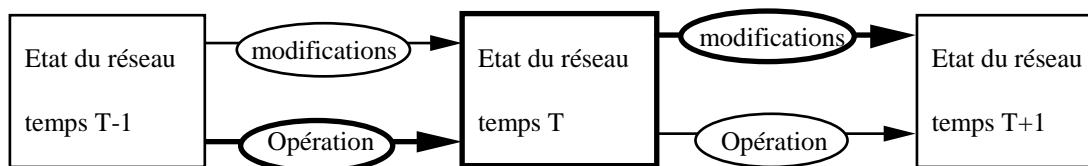
¹⁵ On appelle observations influentes, celles des données dont la suppression pour le calcul des formes réduites déplacerait l'estimation aux moindres carrés au delà d'un intervalle de confiance (de 10%) pour les coefficients. Ces observations ne sont pas systématiquement éliminées, bien au contraire, mais leur pertinence est tout particulièrement examinée. Si la justification de ces valeurs influentes ne paraît pas consistante, elles peuvent être rejetées.

¹⁶ Si le sens de variation de la fonction par rapport à une variable explicative est contraire à la compréhension qualitative de la variable, la fonction peut être rejetée. C'est le critère de signe de la relation entre variables.

¹⁷ Si l'ordre de grandeur de l'influence d'une variable semble exagéré ou au contraire sous-estimé, la fonction peut être rejetée.

¹⁸ Les propriétés prédictives des fonctions sont évaluées à partir d'un échantillon de données comportant des valeurs récentes n'ayant pas été inclus dans la régression. La comparaison pour ces données des écarts statistiques avec les évaluations représente un critère de stabilité des prédictions.

Figure 1
Représentation du réseau (perspective comptable)
 représentation quasistatique



Lorsque l'on passe d'une période T à une période T+1, le réseau supporte deux types d'actions : l'exploitation et l'investissement. L'exploitation du réseau regroupe tout ce qui assure le fonctionnement du réseau, en particulier sa maintenance. Les investissements représentent : le remplacement des matériels dont la technologie progresse toujours, les extensions du réseau liées à la croissance de la demande, les modifications de l'architecture du réseau liées au progrès technique.

L'amortissement constitue une image de la valeur du réseau au temps T+1, puisqu'il correspond à la perte de valeur subie par le réseau sur l'année en cours (définition juridique de l'amortissement), ou encore à la part des immobilisations que l'on désire voire rembourser sur cette période (définition économique de l'amortissement). Alors que l'évaluation des modifications apportées au réseau est un calcul des investissements en termes de flux, l'évaluation de l'état du réseau donne une image du stock d'investissements de l'entreprise.

Les fonctions de coûts proposées évaluent trois grandeurs : le coût du réseau existant, le coût d'exploitation du réseau et le coût d'investissement sur le réseau. Ces trois grandeurs sont effectivement celles qui intéressent l'opérateur puisqu'elles sont à la base d'une tarification des services en fonction des coûts mais aussi les grandeurs qui permettraient l'analyse complète des alternatives selon les technologies introduites.

La base de données nécessaire pour réaliser l'évaluation de telles fonctions doit donc comprendre des données de coûts de même nature que celles que l'on désire calculer. La recherche de FEC se fait par l'étude statistique de données de coût de même nature que celles que l'on désire expliquer. Or, le calcul de patrimoine que représente l'évaluation du réseau existant n'est pas disponible sous une forme fiable, nous ne disposons donc pas de la valeur du réseau à un instant T. Une base de données fiable et homogène a été choisie

bien qu'elle ne réponde que partiellement aux besoins. Il s'agit des statistiques annuelles de France Télécom entre 1983 et 1990¹⁹. Ces documents, outre des caractéristiques techniques ou commerciales du réseau de France Télécom, regroupent des données financières permettant de calculer les montants des charges d'exploitation, des amortissements et des investissements engagés chaque année. Les amortissements représentent la part de valeur perdue par le réseau, alors que les investissements annuels expriment la valeur ajoutée au réseau. Ces grandeurs, permettent d'évaluer le gain de valeur net d'un réseau sur une année. Nous ne nous engageons pas dans cette voie pour deux raisons. Les grandeurs investissement annuel et amortissement ne sont pas homogènes car il existe un différentiel d'inflation entre les deux, puisque les actions économiques leur correspondant ne sont pas simultanées. D'autre part, nous ne sommes pas en mesure de mettre en évidence une valeur de référence du réseau qui permettrait de calculer chaque année la valeur de chacun des réseaux évalués.

L'usage des statistiques annuelles est d'autant plus intéressant qu'il correspond à des publications équivalentes dans d'autres pays, ce qui laisse la possibilité d'étendre l'étude à des réseaux différents. En effet, l'un des défauts principaux des fonctions qui vont être décrites tient au fait qu'elles sont l'expression d'un fonctionnement planifié et ne permettent pas d'évaluer le biais introduit par la structure organisationnelle de France Télécom. Plusieurs variables dont on imagine logiquement l'influence sur les coûts d'investissement n'apparaissent pas corrélées de façon consistante avec les variables que l'on tente d'expliquer (nous y reviendrons en observant le phénomène). Cette limitation du modèle obtenu qui le rend impropre à l'analyse de l'introduction de la concurrence, est palliée par la parfaite homogénéité des variables explicatives et le bon comportement des fonctions obtenues qui autorisent une analyse fine de l'opération de réseau par les entités de France Télécom.

Le réseau commuté est une entité qui s'étend sur l'ensemble du territoire. Il existe plusieurs façons d'en considérer le découpage. Les deux principaux modes de partition sont d'une part un découpage technique tenant compte uniquement des niveaux hiérarchiques des nœuds et d'autre part un découpage suivant les niveaux de gestion du réseau. Le découpage technique consiste à considérer un niveau hiérarchique de nœuds et à isoler toutes les portions de réseaux issues de chacun de ces nœuds d'une part et le réseau reliant l'ensemble de ces nœuds d'autre part (il existe trois niveaux hiérarchiques possibles, ZAA,

¹⁹ Statistiques annuelles 83, 86, 87, 88, 89, 90.

ZT, ZP²⁰). Le découpage organisationnel recouvre en partie le découpage technique mais comporte un grand nombre d'exception qui empêche la superposition des deux modes. Deux niveaux de gestion peuvent être isolés la DO ou la DR²¹.

Pour l'étude des coûts, c'est le découpage gestionnaire qui a été retenu puisque c'est le seul qui offrait des données en nombre suffisant pour permettre un traitement statistique. Le niveau choisi est la DO qui offre les deux avantages de représenter un véritable niveau de décision pour l'exploitation du réseau et de présenter une pérennité plus grande. Les DO sont en France métropolitaine au nombre de 48, ce qui permet (malgré le peu de données sur la région parisienne) de générer une solide base pluriannuelle.

L'exemple qui est développé reste très simpliste par rapport aux ambitions du modèle développé dans la première partie du chapitre. En effet, les données comptables renfermées par les statistiques annuelles de France Télécom ne distinguent pas de bloc de coûts joints interdisant toute différenciation verticale au travers d'une grille de coûts (cf première partie). Par ailleurs, les données financières n'étant pas désagrégées au niveau des D.O. pour France Télécom, nous ne sommes pas non plus en mesure d'évaluer des fonctions de coûts pour le cycle financier. Le développement de cet exemple n'en reste pas moins crucial pour démontrer la validité de la méthode proposée puisque les deux cycles principaux : le cycle d'exploitation et le cycle d'investissement, sont illustrés par des variables significatives. Certes, l'applicabilité de la méthode à son niveau le plus désagrégé ne pourra être induite de l'exemple développé ici, mais celui-ci donnera le degré de pertinence et le niveau de fiabilité que l'on pourra espérer.

Analyse des variables

La base de données se compose de 225 individus, caractérisant les D.O. sur les années 83, 86, 87, 88, 89, 90. Les statistiques annuelles sélectionnées présentent seules des données financières détaillées au niveau des DO²². Toutes les variables indépendantes, caractérisant

²⁰ La ZAA est une Zone à Autonomie d'Acheminement, la ZT une Zone de Transit et la ZP une Zone Principale.

²¹ La DO est une Direction Opérationnelle, sous la tutelle d'une DR Direction Régionale.

²² En particulier, les statistiques annuelles des années 81, 82, 84, 85, 91 et 92 ne présentent pas de données financières sur les DO.

le réseau dans son ensemble et présentes pour toutes les années que couvre l'analyse ont été sélectionnées. Chacun de ces individus est caractérisé par 27 caractéristiques :

Figure 2 :
Regroupement des variables suivant
leur caractéristique extensive ou intensive

Variables extensives	Variables intensives
2 superficie de la zone couverte	1 année en cours
3 population couverte	12 taux d'occupation des lignes sur le réseau primaire
4 nombre de lignes principales	13 taux d'occupation des lignes sur le réseau de distribution
5 main d'oeuvre utilisée (en homme par année)	14 longueur moyenne des lignes du réseau primaire
6 accroissement brut de lignes principales	15 longueur moyenne des lignes du réseau de distribution
7 équipement total utilisé	16 indice de qualité globale du réseau
8 équipement cross barr utilisé	17 indice de qualité du réseau intra ZAA
9 équipement électronique utilisé	18 indice de qualité du réseau extra ZAA
10 nombre de L.S.	23 taux d'équipement cross barr dans l'équipement utilisé
11 équipement installé	24 taux d'équipement électronique dans l'équipement utilisé.
19 taille du réseau primaire utilisé (en m)	
20 taille du réseau de distribution utilisé (en m)	
21 taille du réseau primaire installé	
22 taille du réseau de distribution installé	
25 charges d'exploitation	
26 amortissements sur investissement	
27 investissement prévus sur l'année n+1	

Les trois dernières variables ont été mises à part puisque ce sont celles que l'on désire expliquer. Alors que les charges d'exploitation (25) sont exactement ce que l'on se proposait d'expliquer, les amortissements sur les investissements (26) représentent la valeur du réseau avec un biais complexe lié à l'inflation ainsi qu'au processus de dépréciation du réseau; l'étude montrera cependant la pertinence de la méthode pour prédire la valeur d'un réseau. Quant à la valeur des investissements pour l'année n+1 (27), leur analyse se révèle plus complexe puisqu'elle nécessite une modification de la base de données afin de tenir compte des modifications subites par le réseau.

Les variables peuvent être regroupées selon leur valeur explicative. Le groupe le plus important rassemble les variables de poids. L'équipement total utilisé (7) est considéré comme la variable de poids exemplaire, les équations présentées l'utilisent. Des équations

complémentaires montrent comment elle peut être remplacée par d'autres variables : population (3), main d'œuvre (5), nombre de lignes (4), équipement installé (11), taille du réseau primaire (19, 21), taille du réseau de distribution (20, 22) et éventuellement, utilisée conjointement dans un modèle linéaire l'équipement électronique (9) et l'équipement cross-barr (8).

La matrice de corrélation de ces variables (figure 8) montre leur substituabilité dans les fonctions estimatrices de coûts.

Figure 3 :
Matrice de corrélations des variables de poids

var N	3	5	7	11	19	20	21	22	8	9
3	1									
5	0,81	1								
7	0,86	0,93	1							
11	0,85	0,94	0,99	1						
19	0,92	0,76	0,83	0,82	1					
20	0,72	0,65	0,7	0,68	0,75	1				
21	0,87	0,71	0,76	0,75	0,93	0,69	1			
22	0,68	0,62	0,65	0,65	0,69	0,93	0,76	1		
8	0,28	0,56	0,49	0,52	0,18	0,11	0,17	0,14	1	
9	0,85	0,8	0,91	0,88	0,87	0,74	0,79	0,68	0,08	1

La matrice de corrélation (figure 3) montre que la variable d'équipement électronique (9) a un comportement semblable à celui de l'équipement utilisé (7) contrairement à la variable d'équipement cross-barr (8), les coefficients de corrélation sont respectivement 0,91 et 0,49. Ceci s'observe bien que l'équipement utilisé (7) soit la somme de l'équipement cross-barr (8) et de l'équipement électronique (9). Cette mauvaise corrélation est causée par l'évolution temporelle de l'équipement cross-barr (8) qui décroît alors que l'équipement utilisé (7) croît. Par ailleurs la non corrélation entre l'équipement électronique (9) et cross-barr (8) (indice de corrélation 0,08) permet d'utiliser les deux variables simultanément dans l'évaluation des fonctions.

La main d'œuvre utilisée (5) est une variable de poids, elle influence logiquement la taille de l'entreprise ce qui transparait dans les fortes corrélations avec les variables d'équipement. Par ailleurs, il peut être instructif de construire une FEC pour expliciter la main d'œuvre employée (5). Cette possibilité est souvent proposée dans les modèles paramétriques.

Les variables restantes peuvent être classées en trois groupes (où l'on peut aussi introduire certaines variables de poids). Les caractéristiques exogènes, les caractéristiques techniques du réseau et les caractéristiques d'utilisation du réseau.

Parmi les variables citées, les caractéristiques exogènes sont l'année en cours (1), la superficie (2) et la population couverte (3). Il s'est avéré que superficie (2) et population (3) sont fortement corrélées aux autres variables de poids ce qui leur réserve cet usage au détriment d'une utilisation plus fine dans la caractérisation des fonctions. L'année en cours (1) qui est dans la littérature économique la variable privilégiée pour caractériser le niveau technique d'un projet, apparaît très peu significative pour expliquer les coûts d'exploitation ou d'investissement du réseau. Finalement, cette variable ne figure dans aucune des FEC proposées.

Les caractéristiques techniques du réseau sont l'accroissement brut de lignes (6), la longueur moyenne des lignes (14,15) et les taux d'équipement en cross-barr (23) et électronique (24). Les variables qui apparaissent dans cette rubrique se révèlent de nature différente. Alors que l'accroissement de ligne (6) est une variable de nature extensive, les taux d'équipement (14,15) et les longueurs moyennes (23,24) sont des variables intensives.

Les variables extensives sont les grandeurs dont on observe l'augmentation proportionnelle aux variables de poids. C'est en fait une définition généralisée, on appelle variable extensive ou variable de poids toute variable qui caractérise l'état global d'un système à l'équilibre. Réciproquement, on appelle variables intensives, les variables qui caractérisent l'état local d'un système à l'équilibre. La figure 9 regroupe les 27 variables étudiées en deux rubriques, variables intensives et variables extensives.

Remarquons que les trois variables que l'on cherche à expliquer sont extensives : charges d'exploitation (25), amortissements sur investissement (26) et investissement prévu sur l'année $n+1$ (27). La présence de variables intensives dans une fonction linéaire caractérisant une grandeur extensive exprime un coût fixe. Dans une fonction log-linéaire au contraire, la présence de ces variables intensives caractérise le coût variable et le coût marginal. Si les variables extensives représentent toujours des coûts variables, il est surtout intéressant de remarquer que la somme des coefficients qui leur sont assujettis donne une idée des économies d'échelles existantes. En effet, la production de l'entreprise est toujours une variable extensive, c'est la variable qui caractérise traditionnellement la taille de l'entreprise. Nous avons vu ici, que toutes les variables extensives présentaient de fortes corrélations, donc une forte substituabilité dans les fonctions trouvées. La valeur des

économies d'échelle qui caractérisent l'entreprise se calcule par conséquent en additionnant les coefficients associés aux variables extensives pour une caractérisation log-linéaire.

Enfin, les caractéristiques d'utilisation du réseau sont le nombre de LS (10), les taux d'occupation et les indices de qualité. La variable nombre de LS (10) pose problème dans le cadre de l'étude log-linéaire car elle est nulle pour un grand nombre d'individus. Afin de résoudre l'indétermination, on la pose égale à 1 dans ce cas, ce qui rend nul le logarithme de la variable. Cet artifice ne devrait pas introduire de biais dans les calculs puisque les LS sont en nombre entier (l'ajout ou le retrait arbitraire d'une LS n'est pas significatif au regard des échelles utilisées). Malgré cela, cette variable très significative dans le cadre linéaire ne semble pas relevante dans le cadre log-linéaire.

Le taux d'occupation des lignes installées (12,13) devrait intuitivement influencer les coûts d'autant plus que la variable extensive présente dans la fonction est généralement l'équipement utilisé (7). Pourtant, cette variable semble peu significative. La planification au niveau national des caractéristiques du réseau qui régit spécifiquement les variations de cette grandeur et l'homogénéise sur des bases non-économique, enlève à l'échantillon toute légitimité pour prédire la forme de l'introduction de cette variable dans une fonction de coût. Un échantillon plus vaste enveloppant des principes de planification variés ou des réseaux dans des situations de concurrence révélerait certainement un impact de ces variables sur les coûts.

Le mode de calcul des indices de qualité (16, 17, 18) a changé en 1987 ce qui introduit un manque d'homogénéité dans la base de données. Lorsque l'on désire introduire ces variables dans le calcul de fonction de coût, il est nécessaire de choisir entre les deux périodes : avant 1987 ou depuis 1987. La base de données ne comportant que les individus depuis 1987 contient 156 individus ce qui est largement suffisant pour légitimer les calculs statistiques.

Analyse des individus (Réseaux)

L'analyse des individus est primordiale pour prendre conscience des éventuelles faiblesses de la base de données, des biais statistiques qu'elle peut introduire dans l'analyse du problème. Dans le cas de France Télécom, il peut apparaître peu recommandable d'utiliser conjointement des données caractérisant la même entité (ici la DO) au cours de plusieurs années consécutives. Si les DO ne connaissent pas d'évolutions caractéristiques, dans une représentation spatiale des individus (ici les DO) selon leurs variables caractéristiques (sans

introduire la variable année), une même DO reste dans une petite région de l'espace décrit par l'échantillon. Dans une analyse statistique, l'influence de cette région sur le résultat final de la régression est augmentée. Introduire la même DO pour plusieurs années revient à donner un poids plus important à un individu dans l'analyse statistique, ce qui crée un biais. Pour légitimer cette démarche, il est important d'observer comment évolue les DO dans l'espace qui les caractérise.

Afin d'affiner la connaissance des relations entre les différentes variables, une étude en composantes principales des variables représentatives²³ est menée. Les variables sélectionnées pour la recherche des valeurs propres sont : l'équipement utilisé (7), le nombre de LS, les taux d'occupation des lignes (12,13), les longueurs moyennes des lignes (14,15), la qualité globale du réseau (16) et le taux d'équipement en électronique (24).

L'autocorrélation entre deux de ces variables ne dépassent pas 0,5 ce qui laisse présager des modes d'explication spécifiques à chacune d'entre elles (voir tableau de corrélation en annexe C). Dans l'espace des variables sélectionnées, on recherche des directions significatives. Les trois directions les plus caractéristiques sont nettement différenciées pour les intervalles laplaciens d'Anderson²⁴, ce qui indique une quasi-orthogonalité des vecteurs correspondants. Les trois principales directions explicatives forment des modes de représentation indépendants.

²³ Cette sélection de variables représentatives ne correspond pas à une discrimination a priori de variables "plus intéressantes". Au contraire, elle permet d'isoler les effets indésirables dus à de fortes corrélations simples et révèle les liens qui relient les variables. L'observation de la matrice des corrélations des variables choisie montre que la corrélation de deux quelconques de ces variables reste inférieur à 0,5, alors que toutes les autres variables sont reliées à au moins une des variables sélectionnées par une corrélation supérieur à 0,7.

²⁴ Les vecteurs propres calculés sont des grandeurs statistiques dont on peut donner la moyenne mais dont la réalité est une densité de probabilité. En particulier, ces grandeurs sont aussi caractérisées par une variance. Les intervalles laplaciens d'Anderson sont calculés à partir d'une forme bilinéaire de l'espace des vecteurs propre dans R. A chaque vecteur est associé un intervalle, son centre indique la norme du vecteur propre, et la taille de l'intervalle l'angle solide de la variance du vecteur. Lorsque deux intervalles Laplaciens d'Anderson sont totalement séparés, les deux vecteurs propres qu'ils représentent sont effectivement distincts avec une probabilité supérieure à 95%. Plus deux intervalles Laplaciens d'Anderson se recourent, plus les vecteurs représentés ont une probabilité d'être un même vecteur propre.

Les coordonnées des variables suivant les vecteurs significatifs permettent de déterminer la signification de chacun des modes représentatifs (figure 4).

Figure 4 :
Coordonnées des variables dans l'espace des vecteurs propres

variables \ Directions	première	seconde	troisième
équipement utilisé (7)	0,37	0,59	0,41
LS (10)	0,86	0,12	0
taux occup primaire (12)	0,12	0,69	-0,48
taux occup distribution (13)	-0,24	0,64	-0,48
Lg moyenne primaire (14)	-0,74	-0,14	-0,1
Lg moyenne distribu. (15)	-0,57	-0,25	-0,34
qualité globale (16)	-0,46	0,71	0,31
% équi. électronique (24)	-0,70	0,24	0,5
qualité inter ZAA (17)	0,19	-0,74	-0,12
qualité intra ZAA (18)	0,27	-0,45	-0,04

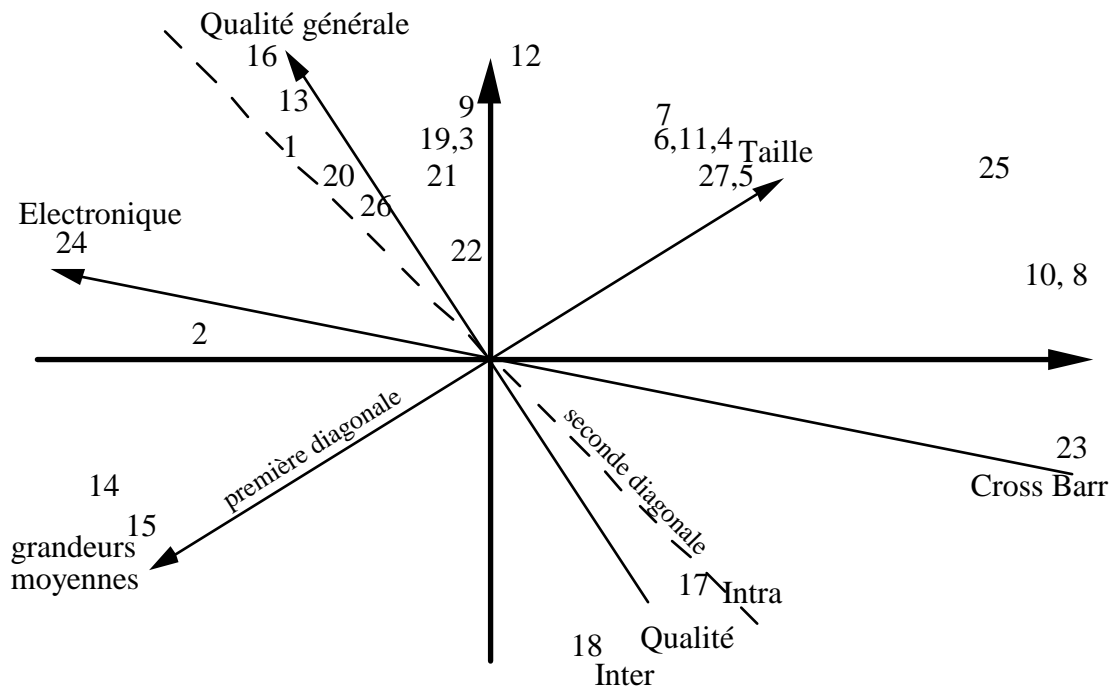
Une étude en composantes principales (figure 5) montre que la première direction indique dans le sens des x décroissants le taux d'électronisation (24) ainsi que la longueur moyenne des lignes primaires (14) du réseau, et dans le sens des x croissants la quantité de LS (10) utilisées. Cette première direction indique bien de caractéristiques techniques des réseaux. Cette caractéristiques qui représentent le mode de différenciation principal des réseaux, montre que ceux-ci se distingue mieux par leur caractéristiques techniques que par leur taille.

La deuxième direction indique dans le sens des y croissants la qualité globale (16) et dans le sens des y décroissants la qualité inter ZAA (18). Cette opposition entre qualité globale du réseau et qualité des éléments de réseau semble indiquer une certaine antinomie dans la capacité des opérateurs à faire progresser l'ensemble des indices du réseau. Ainsi, la recherche des objectifs partiels peut nuire à l'objectif collectif. Il est surtout primordial de prendre conscience que le deuxième mode de différenciation des réseaux est la qualité.

Dans l'espace obtenu, la taille du réseau n'est plus une direction privilégiée, comme c'est le cas pour un choix de variables ou la majorité d'entre-elles sont extensives. Les deux directions principales obtenues, sont une dimension technique et une dimension de qualité (figure 4). La troisième direction bien que significative n'offre pas d'explication évidente.

Dans une représentation où les deux axes principaux sont les directions trouvées, les variables caractérisant les individus sont placées (figure 5). La direction horizontale est celle du premier vecteur propre, elle représente les caractéristiques techniques des réseaux. La direction verticale est celle du deuxième vecteur propre, elle correspond aux caractéristiques de qualité.

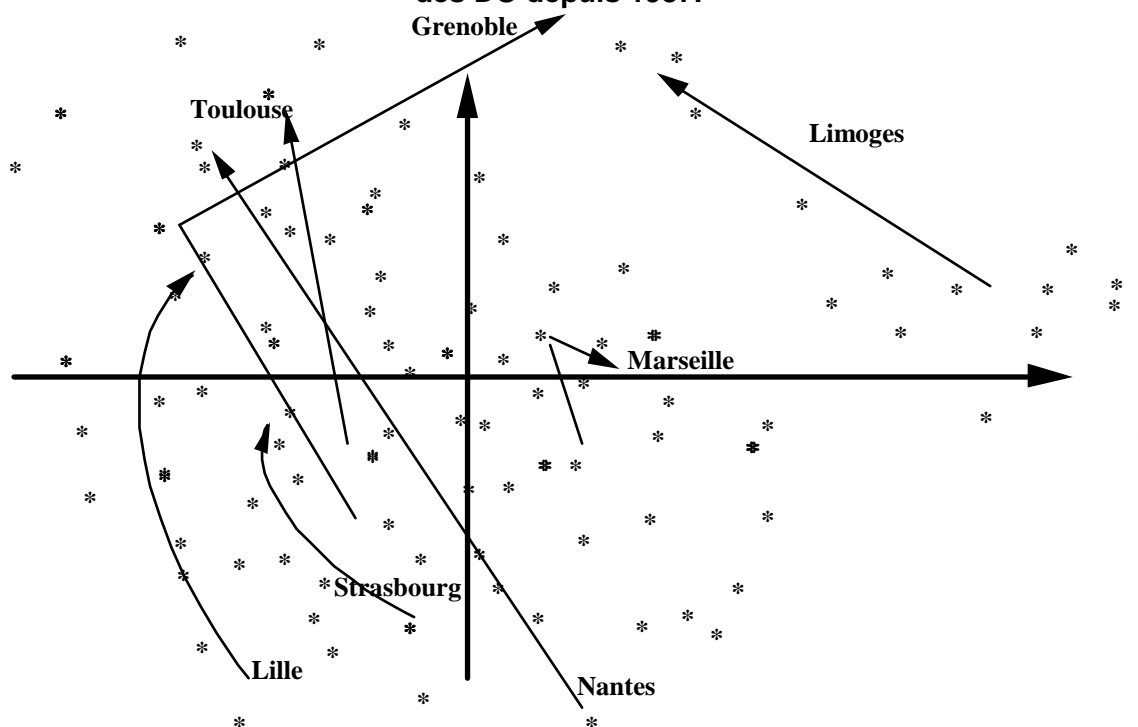
**Figure 5 :
POSITIONNEMENT DES VARIABLES
DANS LE PLAN DES COMPOSANTES PRINCIPALES**



Les valeurs prises par les vecteurs des deux axes, sur la figure 11, montrent bien que la direction qualité et la direction technique ne sont pas parfaitement isolées. Au contraire, elles contiennent toutes deux une part d'effet de taille (les coordonnées de l'équipement utilisé (7) sont respectivement 0,37 et 0,59 suivant la première et la seconde direction). Les deux diagonales sont ici très intéressantes. La deuxième diagonale correspond à la modernisation, combinée d'électronisation et de qualité. En effet, la figure 9 indique que la seconde diagonale est la combinaison d'un effet électronique (24) et d'un effet qualité (16), chacun de ces effets est une direction fléchée. La première diagonale nécessite une analyse plus subtile, elle correspond à l'arbitrage entre longueur moyenne des lignes (14,15) et taille du réseau (7,6,11,4,27,5). Ce qui signifie qu'à longueur de lignes constantes, les réseaux croissent dans le sens des x croissants, alors qu'à couverture constante, les réseaux s'étalent dans le sens des x décroissants. En particulier, la densité de population croît dans le sens des x croissants.

Dans cet espace où l'indépendance des variables est vérifiée, il est nécessaire de placer les individus afin de s'assurer de l'homogénéité du nuage de point obtenu (figure 5). L'évolution au cours du temps de certains réseaux représentatifs est représentée par un trait fléché.

Figure 6
Représentation en composantes principales`
des DO depuis 1987.



Même en composantes principales (figure 6), le nuage de points représentant l'échantillon d'étude est presque uniformément distribué. Cette constatation, inquiétante quand aux possibilités d'explications, assure leur fiabilité puisque l'espace est complètement couvert. L'échantillon ne présente pas de caractéristique topologique particulière qui introduise un biais dans l'analyse. Par ailleurs, les quelques DO dont l'évolution temporelle est fléchée indiquent des déplacements sur l'ensemble de l'espace décrit. Ainsi, l'utilisation d'une même DO sur plusieurs années ne donne pas un poids particulier à une zone de l'espace représenté²⁵.

A partir de cette analyse, il est possible de caractériser l'évolution des DO, ce qui a été fait sur le dessin pour quelques unes d'entre elles. La DO de Nantes connaît durant la période un développement harmonieux puisque la direction de son évolution montre une part d'électronique et une part de qualité équivalente. Cet effet est d'autant plus clair que dans la direction orthogonale qui marque les évolutions de structure géographique du réseau, l'augmentation de 14% du nombre de lignes utilisés est neutralisée par l'augmentation des longueurs de lignes en distribution.

²⁵ L'espace représenté est ici le plan des composantes principales.

Les cas de Lille ou Grenoble sont tout à fait typiques, une augmentation de la qualité rapide en première période stoppée en deuxième période par une augmentation soudaine du nombre de lignes. Marseille présente un profil plus anguleux puisqu'une augmentation du nombre de lignes sur la dernière année correspond à une baisse de la qualité.

Enfin, les cas de Limoges ou Toulouse sont d'une analyse plus difficile car les trois facteurs sont présents. Dans le cas de Limoges, une augmentation du nombre de lignes s'accompagne d'une baisse de la distance moyenne primaire, ce qui correspond à la direction haut/droite sur le schéma, le réseau évolue aussi vers une meilleure qualité et vers l'électronisation. La direction principale d'évolution indique cependant que pour ce réseau, la direction principale d'évolution a été l'électronisation. Toulouse voit le nombre de ses lignes augmenter de 10% sur la période alors que la longueur des lignes en distribution est réduite. Si l'électronique et la qualité s'apprécient, c'est cependant la qualité qui apparait le facteur prépondérant de l'évolution de cette portion de réseau.

Choix et analyse des FEC.

Un grand nombre de fonctions estimatrices de coûts ont été proposées, il est temps de limiter l'étude à un groupe de fonctions explicatives homogène. De nombreuses fonctions ont été présentées dans la partie III, d'autres encore sont exposées en annexe C, toutes ces fonctions ont été sélectionnées car elles présentaient des variables tests telles qu'elles sont utilisables pour des évaluations de coût. Le choix de la fonction utilisée dépend essentiellement des variables dont on dispose pour l'analyse. Deux grandes familles de fonctions sont présentes, des fonctions affines et des Cobb-Douglas.

Il est remarquable que pour chacune des fonctions recherchées, une forme fonctionnelle linéaire ou Cobb-Douglas peut être mise en évidence, sans qu'il soit possible de décider quel modèle est le plus fiable²⁶ :

$$\text{Charges} = 3,3 \cdot 10^8 - 6,5 \cdot 10^6 \text{ IQG} + 2,7 \cdot 10^3 \text{ ECB} + 2 \cdot 10^3 \text{ EEI} + 6,1 \cdot 10^4 \text{ LS}$$

²⁶IQG : Indice de qualité général (16), EU : Equipement utilisé (7), EI% : taux d'électronisation (24), ECB = EU*CB%, Equipement Cross Barr (8), EEL = EU*EI%, Equipement électronique (9), LMP : Longueur moyenne des lignes primaires (14), LMD : Longueur moyenne des lignes en distribution (15), LS : nombre de LS (10). R : pourcentage de variable expliquée par la fonction; SEE: erreur standard estimée; F : test de Fisher, doit rester supérieur à 2; N : nombre de degrés de liberté.

R	SEE	F	N	
0,966	0,13	525	151	0

$$\text{Charges} = 9,3 * \text{EU} * \text{LMP}^{-0,28} \text{LMD}^{-0,16} \text{IQG}^{-0,35} \text{EI\%}^{-0,46}$$

R	SEE	F	N
0,96	0,016	447	150

Les variables tests prennent des valeurs comparables dans les deux cas. Or une différence fondamentale existe entre les fonctions linéaires et les fonctions de Cobb-Douglas, dans le premier cas l'analyste est en mesure de séparer les variables et d'estimer la part de chacune dans la grandeur évaluée, dans le second cas cette analyse est impossible. Pour une fonction linéaire, le coût marginal de chaque variable explicative est une constante facile à analyser, pour une fonction de Cobb-Douglas, le coût marginal n'est pas vraiment significatif. Cette indécision des formes fonctionnelles montre que la séparation des coûts doit avoir lieu en amont de la recherche des fonctions sans quoi elle n'est pas possible. Le niveau de désagrégation des coûts, les blocs ou modules de coûts étudiés se déterminent dans cette perspective de séparation. La séparation des coûts doit être déterminée a priori, en amont de la recherche des fonctions de coût. Les fonctions de coûts peuvent donner des indications précieuses pour allouer les coûts, elles ne permettent pas d'extraire les coûts séparables, ou les blocs de coûts joints.

Nous sélectionnons pour la suite des fonctions Cobb-Douglas, car elles présentent une information sur les économies d'échelles que génèrent les réseaux. Nous devons par ailleurs faire le choix d'une variable extensive particulière pour les fonctions que nous analysons; étant entendu que l'analyse resterait valable avec les autres variables extensives que nous avons mises en évidence. La variable extensive considérée est le nombre de lignes utilisées. La qualité globale et le ratio de liaisons électroniques sont les principales grandeurs intensives qui apparaissent dans les différentes fonctions de coût, les longueurs moyennes des lignes interviennent aussi pour l'évaluation des charges²⁷.

$$\text{Charges} = 9,3 \text{EU} \text{LMP}^{-0,27} \text{LMD}^{-0,19} \text{IQG}^{-0,35} \text{EI\%}^{-0,46}$$

²⁷ EU : Equipement utilisé (7), LMP : Longueur moyenne des lignes primaires (14), IQG : Indice de qualité général (16), EI% : taux d'électronisation (24).

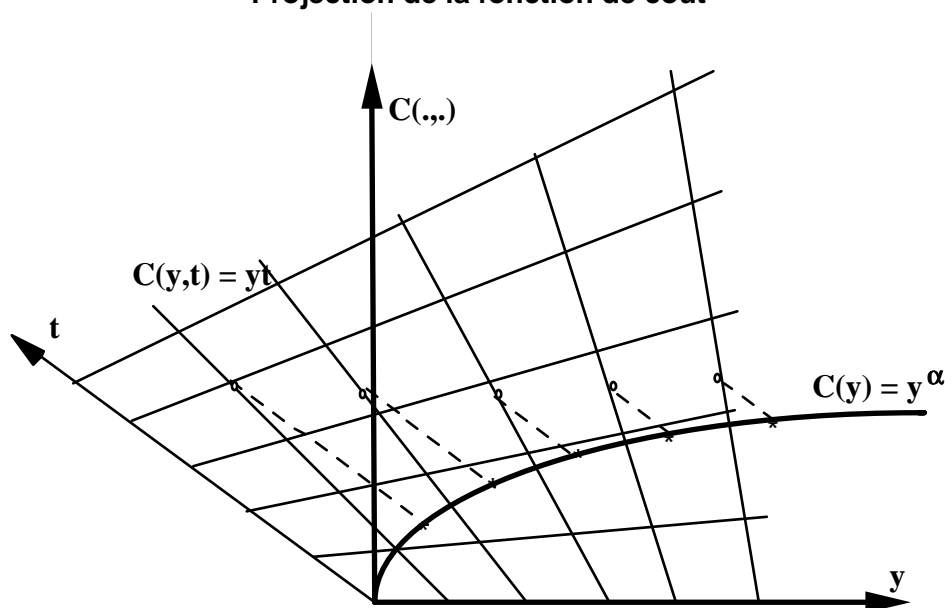
Amortissement = $6,2 \text{ EU IQG}^{-0,6} \text{ EI}\%^2$

Investissements = $7,9 \text{ EU}^{0,91} \text{ LMP}^{-0,4} \text{ IQG}^{-0,23} \text{ EI}\%^{0,39}$

Les charges et l'amortissement évoluent linéairement suivant l'équipement utilisé (EU, 7), il n'y a donc aucune économie d'échelle dans la production de lignes. Cette analyse est complétée par les fonctions tenant compte de la production d'unités téléphoniques, les charges sont une fonction linéaire de cette production. Comment expliquer la présence récurrente d'économies d'échelles dans les fonctions de coût de long terme économétriques. Cette analyse s'explique aisément par le manque de données et de spécifications des individus dans l'étude des fonctions de coût de long-terme.

Perspective sur les économies d'échelles

Figure 7 :
Projection de la fonction de coût



Le choix des variables explicatives dans un modèle statistique n'est pas neutre pour l'analyse. Dès lors que l'on introduit des variables technologiques dans la fonction de coût, toutes les formes d'économies d'échelles peuvent être expliquées. En effet, lorsque les économies d'échelle proviennent de modifications dans la production, la l'introduction dans la fonction de variables technologiques expliquant le changement de système productif transfère la part d'économies d'échelles correspondante de la variable de production (variable extensive) à la variable technologique (le plus souvent une variable intensive). La figure 7 illustre ce phénomène. Le coût peut être expliqué par le volume de production, y (les points sont représentés par des étoiles sur la figure, ils sont dans le plan $[C, y]$), ou par un couple

de variables : la production et une variable technologique, t (les points sont représentés par des ronds sur la figure). On peut observer une production de type $C(y) = y^\alpha$ (y produit, $0 < \alpha < 1$), qui est en fait la réduction d'une fonction $C(y,t) = yt$ par projection sur un plan $[C, y]$. La variable t est une variable technologique, avec, pour les valeurs observées, $t \propto y^{\alpha-1}$.

Examinons la fonction de charge sélectionnée dans cette perspective. La production de l'entreprise est ici la ligne principale utilisée, (EU, 7). La fonction de coût n'établit pas d'économies d'échelle, mais des variables explicatives technologiques sont présentes au côté de la variable équipement utilisé (EU, 7). Examinons le résultat d'une fonction où la variable qualité générale (IQG, 16) n'intervient pas. La fonction trouvée est tout à fait significative; les variables tests présentent des valeurs à peine moins bonnes que celles de la fonction choisie²⁸. Cette fonction²⁹ possède un intérêt particulier puisqu'elle met en évidence des économies d'échelles en production; le coefficient associé à l'équipement utilisé, 0,92, bien que proche de 1 est sans équivoque. Cette tendance aux économies d'échelle peut être davantage mise en évidence en éliminant de la fonction la variable électronique (EI%), le coefficient associé à l'équipement utilisé devient alors : 0,88. Cette disparition d'une variable se fait au détriment de la précision du calcul des coûts³⁰.

Le phénomène théorique proposé correspond parfaitement à l'analyse statistique. On observe une substituabilité des variables. Une caractéristique de l'entreprise qui en première approche, par manque d'information, apparaissait comme un phénomène mécanique d'augmentation de volume, se révèle plus complexe, et fait intervenir des particularités de la technologie du réseau. L'évolution technologique en partie corrélée à l'augmentation de volume est la cause véritable des gains de productivité. Cette distinction n'est pas une subtilité, elle montre qu'il n'y a pas de gains de productivité à espérer par une augmentation de volume, mais que ceux-ci proviennent d'une action volontaire au sein de l'entreprise.

Nous rejoignons ici l'analyse de la sous-additivité de l'entreprise de Sharkey [1986]. Dans "The Theory of Natural Monopoly", une distinction est introduite entre la "plant subadditivity",

²⁸ Le pourcentage de variable expliquée, (R), passe de 96% à 95%. L'erreur standard estimée, (SEE), passe de 0,016 à 0,018. Le test de Fisher reste supérieur à 200 pour la fonction, et toutes les variables sont nettement significatives.

²⁹ Charges \approx EU^{0,92} LMP^{-0,37} LMD^{-0,12} EI%^{-0,74}.

³⁰ Le pourcentage de variable expliqué (R) devient 92%, l'erreur standard estimée (SEE) devient 0,024. la fonction est de l'ordre de Charges \approx EU^{0,88} LMP^{-0,55} LMD^{-0,22}.

sous-additivité d'usine, et la "firm subadditivity", sous-additivité d'entreprise. Pour Sharkey, la sous-additivité d'usine regroupe l'ensemble des aspects strictement technologiques de la sous-additivité. La sous-additivité d'entreprise fait référence aux avantages organisationnels d'une entreprise unique³¹. Pour bien saisir le concept de sous-additivité d'usine et son complémentaire, il est nécessaire de rappeler le contexte conceptuel dans lequel est définie la technologie. Comme nous l'avons vu (cf : I.1.), au sens de la fonction de coût et de la fonction de production, la technologie est la forme même de la fonction. Ce ne peut être une variable spécifique qui caractérise la technologie, mais le jeu des variables entre elles : leur substituabilité, leur séparabilité. En particulier, la sous-additivité d'usine de la fonction de coût regroupe l'ensemble des effets mécaniques de réduction des coûts liés à la forme de cette fonction. On identifie deux types d'effets, les économies d'échelle et les économies d'envergure, liés à la forme de la fonction de coût pour les variables de volume de production. Ainsi, dans le cadre des fonctions que nous avons mis en évidence, la sous-additivité d'usine regroupe les caractéristiques de la fonction de coût pour les variables extensives.

Montrons que l'introduction de variables intensives technologiques dans la fonction de coût met en évidence des caractéristiques de sous-additivités d'entreprise. Remarquons, tout d'abord, que ces variables technologiques qui ne subissent pas d'effet mécanique lié à l'augmentation de la production ne présentent pas de propriété de type sous-additivité d'usine. En revanche, ces variables sont utilisées par l'entrepreneur pour planifier et gérer son entreprise. Ce sont des variables de transaction à l'intérieur de l'entreprise. La qualité et l'électronisation sont des variables de contrôle et d'objectif. Les longueurs moyennes du réseau permettent de décider de la multiplication des nœuds ou de la densification des lignes autour d'un nœud. Les coûts d'organisation et de transaction dans l'entreprise sont la contrepartie de l'évolution de telles variables.

COASE [1937] déterminant la nature de la firme montre que l'entreprise émerge lorsqu'elle est en mesure d'abaisser les coûts de transaction du marché. Cette réduction de coût intervient par l'intermédiaire de contrats particuliers de l'entrepreneur avec les facteurs de production. Le contrat est tel que, pour une certaine rémunération, le facteur accepte d'obéir,

³¹ "Whereas plant subadditivity is based on the technology of production, firm subadditivity is based on the technology of transactions in the marketplace". Sharkey [1986], p 73.

dans certaines limites, aux directives de l'entrepreneur³². La nature de ces contrats marque la limite de la capacité d'analyse de l'entreprise par les fonctions de coût. Les limites du contrat au sein de l'entreprise ne sont pas souvent qualifiées, encore moins quantifiées par les économistes, or les variables intensives que nous proposons dans les fonctions de coûts représentent effectivement les variables de transaction de l'entrepreneur au sein de l'entreprise. La qualité (IQG) ou le taux d'électronisation (EI%), font parties des principales variables de contrôle et d'action au sein de l'entreprise. Ce sont les variables objectives que l'entrepreneur utilise dans les limites du contrat qu'il a établi avec les facteurs de production.

Montrons que les longueurs moyennes du réseau présentent aussi de telles particularités. Sharkey [1986] reprend un exemple de stabilité sous-optimale de Hotelling [1929] pour mettre en évidence la sous-additivité d'entreprise. Deux réseaux en étoile peuvent s'installer de façon à effectuer la distribution téléphonique sur une région. Les réseaux ont intérêt chacun à s'installer à une distance suffisante du centre de la région, de façon à couvrir chacun une zone distincte avec des lignes de tailles minimales. Or, si l'un des concurrents à installé le nœud central de son étoile de distribution de façon décentrée (ce qui est nécessaire pour obtenir l'optimum décrit précédemment), le second venu en positionnant le nœud central de son réseau du même côté du centre que le premier, capte une partie de la clientèle du premier réseau ainsi que tous les usagers qui se trouvent plus proches de lui que du premier réseau. La position d'équilibre des deux réseaux revient alors à positionner les deux nœuds centraux de chacun des réseaux au centre de la zone couverte. Les longueurs des lignes de chacun des réseaux sont alors plus importantes que celles obtenues lors d'une disposition concertée des deux réseaux. Il y a dans ce cas, un intérêt évident à ce que les réseaux se concertent au sein d'une structure. Sharkey décrit ce phénomène comme une forme de sous-additivité d'entreprise. Les variables de contrôle de ce phénomène sont les longueurs moyennes des lignes du réseau.

Comment interpréter les coefficients associés aux variables intensives ? Est-il légitime de les considérer comme des coûts de transaction ? Les variables intensives que nous avons mises en évidence et utilisées dans les fonctions de coût ne sont pas des facteurs de production au sens traditionnel mais des variables de contrôle et d'action que l'entrepreneur peut employer dans les limites des contrats qu'il établit avec les facteurs de production. Plusieurs variables de contrôle sont donc associées à un même facteur de production, et

³² "The contract is one whereby the factor, for a certain remuneration (which may be fixed or fluctuating), agrees to obey the directions of an entrepreneur *within certain limits*". COASE [1937], p39.

chaque variable de contrôle fait partie du contrat de plusieurs facteurs de production. Les variables de contrôle ne sont donc pas libres mais présentent des relations complexes entre elles et avec la production. Durant la recherche des FEC, ces relations transparaissent, par les variations infligées aux coefficients de l'ensemble des variables lors du retrait ou de l'ajout de l'une d'entre elles. malgré les biais introduits par ces phénomènes dans la recherche des fonctions, la dérivé partielle d'une fonction de coûts par rapport à une variable intensive représente bien le coût marginal d'évolution de cette variable au sein de l'entreprise; c'est un coût de transaction dans l'entreprise.

Coût de l'électronisation

L'autre phénomène remarquable de ce jeu d'équation est le coefficient 2 associé à l'équipement électronique pour les coûts d'amortissement. Les D.O. fortement équipées se caractérisent par des amortissements plus que proportionnels à ce niveau d'équipement. Le coût de l'équipement est donc plus élevé lorsque le taux d'équipement s'accroît ce qui peut s'expliquer soit par la difficulté marginale d'équiper en électronique (certaines parties du réseau sont plus facilement compatible avec l'équipement électronique), soit par la difficulté marginale d'équiper plus rapidement le réseau (problèmes croissants d'organisation). Le coefficient 2 est trop important pour expliquer simplement des difficultés techniques, il représente donc des délais réduits. Ces analyses montrent que les fonctions de coûts exposées sont loin de représenter un marché parfait et statique. L'histoire du réseau, la planification et les conditions dynamiques interviennent systématiquement, seule la variété de l'échantillon et les variables considérées permettent de trouver les fonctions véritablement explicatives.

La marche forcée vers l'électronisation que l'on remarque dans la fonction d'amortissement (coefficient 2 de l'électronique), peut se justifier par les excellentes économies d'échelle en électronique que l'on trouve dans les prévisions d'investissement et la décroissance marquée des charges. Afin d'atteindre rapidement des niveaux de charges acceptables et des économies d'échelles en investissement, la planification fait porter les charges les plus lourdes au début de la période de changement technique. L'apparition de rendements d'échelle croissants dans les investissements des périodes futures corrobore la thèse des investissements forcés des périodes passées.

Coût de la qualité.

Le dernier point qui attire l'attention dans ce système d'équation se rapporte au rôle joué par la qualité. La meilleure qualité est associée à une baisse des charges d'amortissement et

d'investissement. Ce phénomène est contraire à une analyse statique des coûts. En effet, c'est alors la marque d'un état sous optimal de la fonction de production. Mais cette formulation n'explique pas l'ensemble des résultats concernant le coefficient de qualité. D'une DO à l'autre, il est naturel d'observer un différentiel de coût favorable à celle qui optimise le mieux sa fonction de production. En revanche, une DO augmentant sa qualité d'une année sur l'autre devrait générer des coûts supplémentaires. Il n'en est rien ! Trois types d'explication permettent d'analyser le phénomène qualité.

L'indice de qualité retenu, par conséquent son amélioration, ne mesurent pas la qualité technique du réseau mais l'organisation de la DO. Cette analyse permet d'expliquer la croissance des rendements corrélée avec la qualité. L'amélioration de l'organisation génère des coûts négatifs en investissement et permet de réduire les charges.

Un autre phénomène qui explique les gains de coûts obtenus par la qualité est une corrélation de celle-ci avec les progrès technique. Si la qualité est une forme de progrès, elle ne peut être obtenue dans une fonction de coût statique mais nécessite l'évolution du système productif et l'apprentissage. En particulier, la qualité génèrent les gains les plus sensibles (coefficient négatif le plus grand) dans la fonction d'amortissement qui subit les coûts d'électronisation. Une corrélation de ces deux formes de progrès peut expliquer la combinaison observée de fortes déséconomies dues à une électronique et de gains de coûts associés à la qualité ; loin d'être séparés ces deux effets sont conjoints.

Enfin, le troisième phénomène expliquant l'influence négative de la qualité sur les coûts est lié à la non-optimisation de la fonction de production. Si la fonction de production n'est pas optimisée, elle peut décrire l'ensemble de production et non la frontière de cet ensemble. Dans cet ensemble, la notion de fonction de coût devient caduque. Un moyen de redéfinir une fonction de coût dans l'ensemble de production est d'introduire une variable de performance qui mesure la distance qui sépare la production réelle d'une production optimisée. Pour les FEC évaluées, la qualité agit de la même manière qu'une variable de performance puisque son amélioration coïncide avec une diminution des coûts.

Conclusion

L'évaluation de fonctions de coûts par des méthodes statistiques en dehors de la mise en forme économétrique met en évidence la faiblesse de certaines idées reçues concernant la nature des économies d'échelle, l'impact de l'innovation ou de la qualité sur les coûts.

Le principal résultat de cette étude est l'observation de la non-séparabilité des éléments de coûts dans les fonctions obtenues. En effet, la forme de la fonction reste une hypothèse arbitraire du modèle, qui ne permet pas de séparer les coûts autrement que par une allocation. Il faut donc établir une description des réseaux qui établisse une description modulaire distinguant les grandes fonctions séparables du réseau : connexion, réseau local, réseau longue-distance, fonctions intelligentes, facturation, liaisons spécialisées... Cette description permet d'isoler des fonctions de coût significatives qui peuvent être comparées, allouées aux services.