

**COMPARISON EMPIRIQUE DES APPROCHES  
PROBABILISTE ET ECONOMIQUE DU MODELE  
DE GRAVITE DE FLUX DE MARCHANDISES :  
LE CAS DES PRODUITS PETROLIERS FRANCAIS**

Bernard Vermot-Desroches  
Département des sciences de l'administration et de l'économie  
Université du Québec à Trois-Rivières  
Trois-Rivières, Québec  
G9A 5H7

John H. Niedercorn  
Department of Economics  
University of Southern California  
Los Angeles, California 90007

**Introduction**

Récemment Chang-I-Hua et Porell [9] faisaient état des développements considérables qu'a connus le modèle de gravité au cours de la dernière décade. Sa très grande utilisation, parfois abusive, a conduit à la publication d'environ 4 à 500 communications et articles recensés depuis 1965. Nous souscrivons ici à la plupart des remarques formulées par les deux auteurs et plus particulièrement à leur conclusion soulignant la carence qui existait au niveau de l'application empirique des modèles d'interaction spatiale. Au moment où malgré de nouveaux apports, tels que celui de Alonso [1], le débat théorique semble retomber quelque peu, il semble urgent de mettre à l'épreuve des faits certaines formulations et partant, de procéder à des comparaisons pertinentes.

Dans une publication précédente, Vermot-Desroches [27] s'intéressait à l'estimation économétrique, agrégée au niveau des régions, de deux grands types de modèles de distribution du transport à entropie maximale. Cette recherche veut poursuivre dans la même veine en élaborant un modèle d'équations gravitaires à partir du fondement économique proposé par Niedercorn et Moorehead [21] et en utilisant la même matrice de données, celle des transports ferroviaires interrégionaux des produits pétroliers français pour 1975.

Un premier développement place le clivage que l'on fait traditionnellement entre l'approche économique et l'approche probabiliste sur un plan épistémologique; on résume ensuite les principaux résultats obtenus à partir des estimations économétriques agrégées au niveau des régions; on établit alors les équations gravitaires issues du modèle de Niedercorn et Moorehead [21]; finalement on procède aux estimations économétriques désagrégées région par région et à leur interprétation avant de formuler certaines comparaisons pertinentes.

### Fondements théoriques et distribution des flux de marchandises sur un réseau

#### Deux fondements principaux

Peu de travaux théoriques ou empiriques proposent des réflexions sur les modèles d'interaction spatiale appliqués aux déplacements de marchandises [29;4;21;22]; la plupart des études se rapportent exclusivement aux déplacements humains inter ou intra-urbains. Cependant, la nécessité de se rapporter à des modèles fondés sur le plan théorique demeure entière. Un modèle d'interaction non fondé théoriquement risque d'accréditer n'importe quelle analogie avec la physique et la portée de l'analogie peut alors, à tort, dépasser le plan du simple formalisme. Seul un fondement théorique peut tracer les limites et pondérer la portée de l'analogie.

On sait qu'à l'heure actuelle deux principaux fondements sont proposés pour la construction des modèles d'interaction spatiale, le fondement statistique avec ou sans l'introduction du concept d'entropie [28], et le fondement économique axé sur le concept d'utilité ou celui de profit [20]. Depuis que ces deux fondements ont été mis au point définitivement vers la fin des années 60, ils se sont vus pesés, évalués, comparés et souvent mis en opposition, ainsi pour Beckmann et Golob [3] les modèles de maximisation d'entropie ne sont que des cas spéciaux des modèles de maximisation d'utilité alors que pour Wilson [28], un modèle d'entropie généralise les formalisations utilitaristes.

Ces deux fondements ont connu chacun des développements distincts sur le plan théorique et répondent à des questions motivées par des préoccupations différentes. Le travail original de Wilson [28:253] «offers a theoretical basis for some spatial distribution models.» L'auteur s'intéresse à la description physique des déplacements  $t_{ij}$  indépendamment de la motivation profonde de l'homme en déplacement. Wilson s'est situé à un niveau descriptif, non explicatif et non causal; il s'intéresse exclusivement à la distribution des déplacements sans aborder le problème de leur génération. Niedercorn et Bechdolt [20] considèrent d'emblée un individu dont la consommation de transport lui est dictée par son

désir de maximiser son utilité. Il s'agit là d'une consécration de la théorie néo-classique qui fait du concept d'utilité la fibre motrice fondamentale régissant le comportement humain.

Dans ce sens Niedercorn et Bechdolt situent leur analyse sur un plan causal, explicatif du comportement humain. Ils formulent donc en premier lieu une théorie de la génération du déplacement même si l'équation finale de leur modèle est similaire à une équation de distribution. Cet aspect distributif n'est pas imputable au fondement économique proposé mais à la formulation qui en est faite. En d'autres termes, le modèle initial de Niedercorn et Bechdolt est un modèle où génération et distribution sont étroitement imbriquées mais où le fondement proposé concerne avant tout l'aspect génération.

#### Une réconciliation problématique

De nombreux travaux ont tenté ces dernières années de réconcilier l'une et l'autre de ces deux grandes approches [17;10;8;22;26;13]. Cette volonté de réunification est liée au fait que le fondement statistique, aussi bien que le fondement utilitariste reposent sur une même démarche méthodologique; dans l'un et l'autre cas il s'agit de résoudre un programme non linéaire sous un même ensemble de contraintes de déplacement et de budget.

Partant de deux programmes semblables sur le plan formel, la réunification propose alors une identification des deux concepts impliqués chacun dans l'une des deux fonctions objectives : d'une part l'utilité et d'autre part l'entropie. Cette identité entropie-utilité a été proposée dans d'autres cadres de recherche mais n'a jamais été établie de façon scientifique et rigoureuse [15].

L'étude de Choukroun [10], destinée à proposer un cadre général pour le développement des modèles d'interaction spatiale de type gravitaire-distributif, montre qu'en posant un certain nombre d'hypothèses de comportement bien choisies, il est possible de définir pour un individu qui se déplace une fonction d'utilité, agrégée additivement, qui corresponde sur le plan formel à une fonction d'entropie. Choukroun n'établit cependant pas de correspondance biunivoque entre sa définition de l'utilité et l'entropie. Il reconnaît en effet que d'autres fonctions d'utilité peuvent satisfaire le même corps d'hypothèses sans qu'elles n'aient de lien direct ou indirect avec la fonction d'entropie. A cet égard, dans un article plus récent, Fisch [13] montre sans ambiguïté que le lien entropie-utilité est tout à fait incongru. Il démontre qu'une fonction d'utilité identique à une fonction d'entropie est en conflit direct avec les principes rationnels de préférence des consommateurs.

La réconciliation des deux approches est difficile en raison de leurs divergences qui reposent à la fois sur les objectifs visés et la

démarche choisie. Le fondement utilitariste se veut comportemental et se situe au niveau de la micro-analyse; le fondement statistique vise à décrire un système de déplacement indépendamment des motivations individuelles<sup>1</sup>.

Il n'existe aucune règle de correspondance entre les comportements économiques placés dans un cadre de rationalité et les comportements décrits par l'approche statistique. Dans ce sens chacune de ces deux approches possède un degré de compétence et une place spécifique dans l'analyse théorique des phénomènes d'interaction spatiale. C'est principalement la non-reconnaissance ou le non-respect de ce partage de compétences qui est à l'origine même de la querelle.

#### Estimation économétrique d'une distribution théorique à entropie maximale

Bien que décrites et critiquées dans de nombreux articles [2;25;16], les techniques d'estimation des modèles d'interaction spatiale n'ont été que rarement confrontées aux données réelles de transport de marchandises [22;24].

Nous avons testé précédemment l'ajustement de deux modèles sur la base de trois critères et au moyen de trois algorithmes différents [27]. Les principaux résultats sont repris ici brièvement. Nous avons retenu le modèle de distribution à deux contraintes (MDDC) présenté par Wilson dès 1967 et le modèle de Cesario [6] formulé comme un modèle de distribution auto-contraint (MDAC). La fonction distance, exponentielle négative, provient du choix intentionnel du fondement statistique de Wilson; cependant par souci de comparaison, les ajustements ont été effectués également sur les modèles munis d'une fonction puissance négative. Les données utilisées concernent le transport des produits pétroliers par voie ferrée en 1975 entre les 21 régions-programmes françaises.

#### Modèle MDDC (Wilson 1967)

$$t_{ij}^m = A_i^m O_i^m B_j^m D_j^m \exp(-\beta d_{ij})$$

$$\text{avec } A_i^m = \left[ \sum_j B_j^m D_j^m \exp(-\beta d_{ij}) \right]^{-1}$$

$$B_j^m = \left[ \sum_i A_i^m O_i^m \exp(-\beta d_{ij}) \right]^{-1}$$

<sup>1</sup>Cesario [7] note à ce propos: «Le concept d'entropie ne possède aucun pouvoir explicatif. Ceci demeure vrai même si de nobles tentatives ont été faites pour établir un lien entre l'entropie et l'utilité» (notre traduction).

où:  $t_{ij}^m$  = volume du flot de marchandises  $m$  déplacé de la région  $i$  vers la région  $j$ .

$d_{ij} = d_{ji}$  = distance entre les capitales des deux régions  $i$  et  $j$ .

$$O_i^m = \sum_j t_{ij}^m$$

$$D_j^m = \sum_i t_{ij}^m$$

$A_i^m$  et  $B_j^m$  sont deux ensembles de facteurs d'équilibre qui assurent la conservation des flots  $O_i^m$  d'origines et  $D_j^m$  de destinations, leur interprétation a déjà fait l'objet de nombreux travaux (c.f. par exemple [19;5;12]).

#### Modèle MDAC (Cesario 1975)

$$t_{ij}^m = U_i^m V_j^m \exp(-\beta d_{ij})$$

$$\text{avec } U_i^m = \frac{\sum_j t_{ij}^m V_j^m \exp(-\beta d_{ij})}{\sum_j (V_j^m)^2 \exp(-2\beta d_{ij})}$$

$$V_j^m = \frac{\sum_i t_{ij}^m U_i^m \exp(-\beta d_{ij})}{\sum_i (U_i^m)^2 \exp(-2\beta d_{ij})}$$

où  $U_i^m$  et  $V_j^m$  = expression analytique des facteurs d'émission et d'attraction de chaque région satisfaisant le critère des moindres carrés ordinaires établi selon l'expression:<sup>2</sup>

$$S = \sum_i \sum_j [t_{ij}^m - U_i^m V_j^m \exp(-\beta d_{ij})]$$

Les techniques d'ajustement sélectionnées sont l'algorithme Golden Section (G.S.) utilisé pour la localisation d'un extremum sur une courbe, (recherche d'une vraisemblance maximale ou d'une somme de carré minimale) l'algorithme proposé par Hyman [18] et celui proposé par Cesario [6] adapté à l'algorithme Golden Section (Tableau 1).

<sup>2</sup>Ces méthodes ont été développées en détail dans une recherche antérieure [27].

**Tableau 1**  
**Relations modèles-méthodes-critères**

<b>Modèle</b>	<b>Méthodes</b>	<b>Critères</b>
MDDC	Hyman	Max. Vraisemblance
	G.S.	Moindres Carrés
		Minimum chi 2
MDAC	Cesario - G.S.	Moindres Carrés Ordinaires

Les principaux résultats et tests obtenus sont repris dans le tableau 2. Les facteurs d'émission  $U_i^m$  et d'attraction  $V_j^m$  du modèle MDAC sont donnés dans le tableau 3. La matrice initiale origines-destinations ainsi que la carte de régions sont reproduites en annexe.

En tenant compte de l'exemple et des méthodes choisies nos conclusions principales peuvent se résumer ainsi:

- Les estimations  $\hat{\beta}$  du paramètre  $\beta$  de la fonction distance connaissent des différences importantes selon la méthode et le critère d'ajustement choisi.
- Les estimateurs ne possèdent pas les propriétés requises pour qu'il soit possible d'effectuer des tests d'hypothèses sur leur significativité. En conséquence seuls des tests relatifs peuvent servir à une évaluation comparative des différentes méthodes.
- Les résidus entre les valeurs théoriques et observées sont munis d'une composante d'erreur de nature à fausser l'interprétation de la mesure du coefficient de détermination  $R^2$ . Par ailleurs, le coefficient de corrélation ne possède aucune sensibilité aux variations du paramètre  $\beta$  et sa valeur exagérément élevée confirme les restrictions que Wilson [30] a formulé à l'égard d'une interprétation qui reste fort délicate.
- D'une façon plus générale, les tests relatifs qu'il est possible d'établir font preuve d'une très faible sensibilité aux variations des estimations  $\hat{\beta}$ . Il y a là sans doute une conséquence du niveau d'agrégation trop élevé pour de tels modèles, un seul paramètre ne peut pas refléter avec précision certaines disparités qui s'opèrent dans le comportement au niveau des régions ou même des classes de distance.
- Cette trop grande stabilité se maintient quelle que soit la fonction distance retenue. Aucune amélioration significative n'a été obtenue en substituant à la fonction exponentielle négative, d'autres fonctions plus ou moins sophistiquées telles

**Tableau 2**  
**AJUSTEMENT DES MODÈLES MDDC ET MDAC**

<b>Modèle</b>	<b>Critère</b>	<b>Fonction distance</b>	<b><math>\hat{\beta}</math></b>	<b>R</b>	<b>Ecart-type résidus</b>	<b>Distance moy. ajustée (*)</b>
MDDC (Hyman)	Max. Vrais.	Exp. nég.	0.0078	0.94	48 053	264,77
		Puis. nég.	0.5616	0.76	89 841	390,11
MDDC (Golden-section)	SS	Exp. nég.	0.5075	0.94	54 784	212,22
		Puis. nég.	4.9584	0.88	70 543	226,24
	X <sup>2</sup>	Exp. nég.	0.0049	0.92	58 659	320,27
		Puis. nég.	0.3444	0.75	94 277	461,75
MDAC (Cesario)	SS	Exp. nég.	0.0260	0.98	27 544	234,17
		Puis. nég.	1.2615	0.88	65 200	369,27

\*Distance moyenne observée : 264.75km.

Tableau 3

MODÈLE MDAC; VALEURS OBSERVÉES ( $O_i$  et  $D_i$ ), ET AJUSTÉES ( $OA_i$  et  $DA_i$ )  
 DES QUANTITÉS AUX POINTS D'ORIGINE ET DE DESTINATION.  
 FACTEURS D'ÉMISSION  $U_i^m$  (GEN<sub>i</sub>) ET D'ATTRACTION  $V_j^m$  (ATT<sub>i</sub>)

REGION NO	O(I)	OA(I)	GEN(I)	D(I)	DA(I)	ATT(I)
1	1712041.	1645621.	232770.	865998.	755214.	3.24153
2	992.	296.	6.48827	387464.	371279.	26.0143
3	610376.	232498.	684.746	796470.	672184.	150.688
4	27389.	20479.	6.08605	1172620.	1025407.	3352.02
5	2255643.	1436013.	133131.	107719.	56082.	.420032
6	444.	60.	2.18281	55696.	54917.	26.7267
7	218641.	205715.	33231.6	338568.	232528.	5.87326
8	748834.	746398.	332388.	514943.	235604.	.707439
9	3887.	769.	.980661	392663.	403164.	747.350
10	1800.	124.	.140950	627717.	573376.	860.186
11	1665695.	1544537.	251505.	577523.	447416.	1.77881
12	106848.	8158.	11.4415	1257608.	1272086.	712.697
13	9578.	1530.	.550101	948564.	595161.	2675.69
14	888564.	568439.	115.931	1469186.	1262422.	4855.56
15	1003144.	1009204.	7517.26	254786.	134872.	17.9364
16	872.	132.	.487066E-02	619680.	548336.	22854.6
17	8498.	2905.	.607104E-01	1552197.	1212299.	45705.7
18	3027.	1473.	.881272	1082523.	856588.	1651.99
19	530167.	171761.	219.683	1721448.	1752209.	432.048
20	775513.	894723.	568738.	130515.	99695.	.110119
21	5196928.	4926650.	.346218E+08	894993.	856646.	.247390E-01

que la fonction puissance négative, la fonction de Tanner ou la fonction Gaussienne. Ceci confirme les résultats observés par Openshaw et Connolly [23].

- Compte tenu de toutes ces observations, la meilleure estimation obtenue pour le modèle de Wilson (MDDC) a été effectuée à partir du critère du maximum de vraisemblance. Ce résultat confirme que dans un modèle du type MDDC muni d'une fonction distance exponentielle négative l'entropie et la vraisemblance atteignent leur maximum pour la même distribution  $\{t_{ij}^m\}$  [29].

### Un modèle de comportement désagrégé par région d'origine

Niedercorn et Moorehead [21] ont démontré que le modèle de gravité de flux de marchandises pouvait recevoir un fondement théorique qui reposait sur une hypothèse économique. Il convenait pour cela de supposer l'existence d'un monopoleur régional qui vise à maximiser son revenu total sous une contrainte de coût de transport. Ce modèle à l'origine issu d'une analogie avec le modèle de déplacement individuel fondé sur le principe de l'utilité maximale [20] s'est vu reproché un certain manque de réalisme au niveau des hypothèses. En fait, dans le long terme, les producteurs préfèrent certainement maximiser leurs profits plutôt que leur revenu total, et les coûts de transport, au lieu d'être envisagés comme une contrainte, devraient être incorporés dans la fonction de coût total.

Il est relativement aisé cependant de reformuler le modèle de Niedercorn et Moorehead de sorte que l'on puisse satisfaire à ces objections.

On suppose l'existence d'un territoire divisé en  $n$  zones ( $i = 1$  à  $n$ ). En conservant la même notation<sup>3</sup> et en supposant que toute la production de la zone  $i$  est effectuée par un monopoleur, il devient possible d'exprimer pour chaque région le profit  $\Pi_i$  ainsi:

$$\Pi_i = \sum_{j=1}^n D_j^\gamma \left( \frac{t_{ij}}{D_j^\gamma} \right)^\beta - r \sum_{j=1}^n d_{ij}^\alpha \quad t_{ij}; j = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Le premier terme représente le revenu total diminué des coûts de production, le second terme quantifie les coûts totaux de transport tandis que  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , et  $r$  sont des paramètres positifs sujets à interprétation économique.

Pour un facteur d'attraction donné, le revenu total diminué des

<sup>3</sup>Afin d'alléger l'écriture, l'indice  $m$  du produit n'apparaît pas.

coûts de production devrait s'accroître à un taux qui fléchit avec l'augmentation de  $t_{ij}$ . Il est donc nécessaire de poser  $0 < \beta < 1$ . La composante coûts totaux de transport est linéaire si  $\alpha = 1$ , concave si  $\alpha < 1$  et convexe si  $\alpha > 1$ . Le facteur d'attraction est tout à fait général; pour les fins de cette étude il est spécifié par l'écriture (10).

La dérivée première du profit  $\Pi_i$  par rapport à  $t_{ij}$  s'écrit :

$$\frac{d \Pi_i}{d t_{ij}} = \beta \left( \frac{t_{ij}}{D_j^\gamma} \right)^{\beta-1} - r d_{ij}^\alpha; j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

La solution d'équilibre  $\bar{t}_{ij}$  est obtenue pour la valeur de  $t_{ij}$  qui annule cette dérivée première, elle est fonction du facteur d'attraction.

$$\bar{t}_{ij} = \left( \frac{\beta}{r} \right)^{1/(1-\beta)} \frac{D_j^\gamma}{d_{ij}^{\alpha/(1-\beta)}; j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

L'équation (3), associée à la région  $i$ , est une loi gravitaire où la distance apparaît sous la forme d'une fonction puissance. Elle peut être estimée économétriquement au moyen de la méthode des moindres carrés ordinaires moyennant une transformation logarithmique et l'adjonction d'un terme d'erreur multiplicatif.

D'autre part, en supposant  $\delta > 0$ , le revenu total diminué du coût total de production peut aussi être représenté par l'expression :

$$\delta \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ij} \ln \left( \frac{t_{ij}}{D_j^\gamma} \right); j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Si  $\delta$  est suffisamment grand, l'expression (4) commence par s'accroître en même temps que  $t_{ij}$ , atteint un maximum, puis décroît; ce qui implique que la demande devient inélastique lorsque  $t_{ij}$  augmente.

L'écriture (4) est analogue à la fonction d'utilité agrégée de type logarithmique initialement proposée par Golob, Gustafson et Beckmann [14]. Si l'on suppose un coût de transport fonction linéaire de la distance, le profit de la firme localisée dans la zone d'origine  $i$  peut s'exprimer :

$$\Pi_i = \delta \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ij} \ln \left( \frac{t_{ij}}{D_j^\gamma} \right) - r \sum_{j=1}^n d_{ij} t_{ij}; j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

La dérivée première de  $\Pi_i$  par rapport à  $t_{ij}$  s'écrit :

$$\frac{d \Pi_i}{d t_{ij}} = \delta - 1 - \ln \left( \frac{t_{ij}}{D_j^\gamma} \right) - r d_{ij}; j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

La solution d'équilibre devient ainsi :

$$\bar{t}_{ij} = \frac{D_j^\gamma e^{\delta-1}}{e^{r d_{ij}}}; j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

L'équation (7), tout comme l'équation (3), est associée à la région  $i$  et formalise une loi gravitaire. La distance intervient ici sous la forme d'une fonction exponentielle et l'estimation économétrique au moyen de la méthode des moindres carrés est également possible.

On parle ici d'approche économique car la forme fonctionnelle de chaque équation gravitaire qui se rapporte à une région est directement liée à l'hypothèse selon laquelle le déplacement est induit par la recherche du produit maximum. Dans ce sens les modèles dérivés d'une maximisation d'entropie ne sont que des modèles descriptifs fondés sur l'hypothèse objective d'information minimale. Ils n'accréditent aucun type de comportement économique rationnel si ce n'est celui de diversifier au maximum la distribution des déplacements sur un réseau.

### Tests empiriques et interprétation

Après transformation, les deux formulations (3) et (7) du modèle peuvent s'écrire sous la forme plus conventionnelle suivante :

$$\bar{t}_{ij} = a \frac{D_j^b}{d_{ij}^c} \quad (8)$$

$$\bar{t}_{ij} = a \frac{D_j^b}{e^{c d_{ij}}} \quad (9)$$

La linéarisation de ces deux écritures permet d'effectuer pour chaque région un ajustement économétrique au moyen d'une régression linéaire double.

Afin de pouvoir procéder à des comparaisons valables, il convient d'envisager de telles équations gravitaires comme des modèles de distribution et de définir les facteurs d'attraction  $D_j$  de



façon endogène à partir d'un ensemble de contraintes d'attraction. On pose donc :

$$D_j = \sum_{i=1}^n t_{ij}; j = 1, \dots, n. \quad (10)$$

De même, la linéarisation par transformation logarithmique empêche de considérer des distances et des déplacements nuls dans l'équation (8) et des déplacements nuls dans l'équation (9). On exclut donc systématiquement les déplacements intra-régionaux et les déplacements nuls sont affectés de la valeur unitaire qui reste négligeable devant les autres déplacements non nuls.

Sous ces conditions, les principaux résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.

F est le test global de linéarité (test de Fisher).  $\hat{b}$  et  $\hat{c}$  sont respectivement les estimés des moindres carrés ordinaires des paramètres  $b$  et  $c$ .  $t(\hat{b})$  et  $t(\hat{c})$  sont les tests de significativité respectivement pour  $\hat{b}$  et  $\hat{c}$  (test de student).

La lecture du tableau 4 permet de formuler les observations suivantes :

- *Pouvoir explicatif global*: Des 42 régressions effectuées, 11 n'ont aucun pouvoir explicatif. Elles correspondent à 5 des régions les moins concernées par les échanges pétroliers: Basse Normandie, Poitou Charente, Midi-Pyrénées, Franche Comté, Auvergne.

La moitié de ces équations expliquent significativement plus de 50% de la variance totale. Il s'agit principalement des régions côtières, de la Région parisienne et de l'Alsace, ces deux dernières régions étant reliées directement à la mer par leurs ports fluviaux.

- *Tests individuels*: A l'exception de la région Auvergne pour laquelle le pouvoir explicatif du modèle est nul, le paramètre de la fonction distance est négatif en espérance mathématique. Il est significatif dans 70% des cas. Le paramètre du facteur d'attraction n'est significatif que pour quatre régions distributrices: Nord, Région parisienne, Haute-Normandie, Alpes de Provence.

L'ensemble des tests globaux et individuels ne souffre d'aucun biais, les tests de Durbin-Watson n'ont décelé aucune trace significative d'autocorrélation; en revanche les tests de Goldfeld-Quandt révèlent une hétéroscédasticité des résidus pour environ 25% des équations de régression.

Sur un plan économique l'interprétation de ces tests montre que les hypothèses de la loi gravitaire ne sont entièrement respectées que dans quelques cas seulement. Ceci est dû prin-

cipalement à la structure étoilée du réseau de distribution et à la localisation des grandes zones expéditrices. A l'exception de la Région parisienne de l'Alsace et de la Lorraine, les principales régions expéditrices sont des régions côtières et toutes connaissent une consommation importante de pétrole (industries et populations nombreuses). Les expéditions totales diminuées de l'auto-provisionnement très important vont se répartir dans les régions immédiatement voisines mais peu nombreuses en raison du voisinage maritime qui concerne 11 des 21 régions. Les régions plus centrées sont peu consommatrices et se voient partager leur faible attraction par les régions côtières. En conséquence, les régions productrices ou expéditrices ont un rayonnement très important dans leur voisinage immédiat mais quasiment inexistant dès que l'on envisage les autres parties du territoire.

- *Fonction puissance et fonction exponentielle*: Les quelques remarques que nous venons de faire sur la structure de réseau justifient les résultats sensiblement meilleurs obtenus avec une fonction distance puissance négative. On sait qu'une fonction distance exponentielle négative satisfait l'hypothèse d'une entropie maximale de distribution ou selon Erlander l'hypothèse d'un réseau où l'accessibilité<sup>4</sup> serait maximale compte tenu des contraintes sur les origines et sur les destinations; ce qui est incompatible avec les concentrations observées au niveau de la distribution.

Une fonction distance de type puissance négative avec un exposant élevé, en moyenne égal à 3.3, est donc mieux représentative de la structure de distribution. Le tableau 4 montre dans le cas de la fonction puissance négative un  $R^2$  supérieur pour 13 des 21 régions.

### Comparaisons et conclusions

Une vue d'ensemble des résultats obtenus doit tenir compte des méthodes d'estimation utilisées ainsi que de la validité statistique de certains tests. Le modèle de comportement issu du modèle initial de Niedercorn et Moorehead présente pour le cas étudié une légère supériorité sur le modèle à entropie maximale au moins pour deux aspects :

1. L'approche désagrégée pour l'estimation d'un modèle de distribution permet d'effectuer les tests d'hypothèses propres à l'induction statistique de la régression classique.

<sup>4</sup>L'accessibilité est prise ici dans son sens le plus large, elle rejoint la notion de diversité des mouvements de marchandises.

**Tableau 4**  
**ESTIMATIONS DES EQUATIONS (8) ET (9)**

Regions	Fonction distance	R <sup>2</sup>	F	$\hat{b}$	t( $\hat{b}$ )	$\hat{c}$	t( $\hat{c}$ )	$\bar{T}^*$	E.T. résidus
1	PUIS.	0.63	14.62	2.25	3.76	-4.41	-4.39	47 872	87 737
	EXP.	0.55	10.59	2.13	3.25	-0.0079	-3.59		99 486
2	PUIS.	0.47	7.59	0.13	0.33	-2.23	-3.89	45	110
	EXP.	0.32	4.09	0.051	0.11	-0.0046	-2.86		116
3	PUIS.	0.65	15.51	2.05	5.14	-1.82	-2.80	28 675	38 421
	EXP.	0.60	13.01	1.98	4.72	-0.0042	-2.29		41 671
4	PUIS.	0.37	5.10	-0.97	-1.69	-3.15	-2.63	350	1 040
	EXP.	0.36	4.78	-1.00	-1.71	-0.0078	-2.53		987
5	PUIS.	0.57	11.30	0.69	2.11	-2.10	-4.57	109 963	117 566
	EXP.	0.59	12.13	0.54	1.70	-0.0050	-4.74		110 676
6	PUIS.	0.16	1.68	0.25	0.44	-1.52	-1.83	20	33
	EXP.	0.12	1.14	0.66	0.12	-0.0024	-1.51		33
7	PUIS.	0.56	10.82	-0.22	-0.36	-5.04	-4.33	1 184	2 996
	EXP.	0.47	7.51	-0.43	-0.66	-0.0089	-3.55		3 307
8	PUIS.	0.66	16.49	1.00	1.63	-7.15	-5.73	25 682	210 955
	EXP.	0.70	19.78	0.86	1.52	-0.015	-6.28		80 790
9	PUIS.	0.05	0.50	-0.26	-0.46	-1.03	-0.90	158	580
	EXP.	0.07	0.60	-0.26	-0.47	-0.0027	-1.01		580
10	PUIS.	0.26	2.98	0.56	1.26	-1.64	-1.80	84	352
	EXP.	0.27	3.12	0.52	1.18	-0.0041	-1.87		352
11	PUIS.	0.65	15.93	-0.047	-0.082	-6.64	-5.61	60 839	73 341
	EXP.	0.67	17.61	-0.065	-0.12	-0.013	-5.90		66 397
12	PUIS.	0.09	0.87	-0.28	-0.33	-2.17	-1.29	4 935	21 013
	EXP.	0.09	0.85	-0.36	-0.42	-0.0038	-1.27		21 016
13	PUIS.	0.55	10.60	0.74	1.66	-3.39	-4.07	412	1 800
	EXP.	0.46	7.13	0.86	1.78	-0.0068	-3.24		1 727
14	PUIS.	0.32	4.00	0.97	1.35	-2.98	-2.34	16 317	28 606
	EXP.	0.25	2.80	1.03	1.37	-0.0050	-1.83		35 936
15	PUIS.	0.72	22.07	0.74	1.09	-7.14	-5.75	43 411	67 096
	EXP.	0.69	19.00	0.98	1.39	-0.013	-5.30		95 026
16	PUIS.	0.18	1.84	-0.22	-0.43	-1.73	-1.90	43	111
	EXP.	0.04	0.40	-0.019	-0.035	-0.0021	-0.86		119
17	PUIS.	0.48	7.91	0.29	0.55	-3.32	-3.61	290	765
	EXP.	0.52	9.05	0.32	0.64	-0.0094	-3.89		502
18	PUIS.	0.01	0.06	-0.14	-0.22	0.33	0.17	79	254
	EXP.	0.01	0.05	-0.18	-0.28	0.00008	0.018		254
19	PUIS.	0.50	8.52	1.18	1.35	-5.83	-3.06	25 616	42 583
	EXP.	0.49	8.16	1.13	1.27	-0.013	-2.97		38 215
20	PUIS.	0.51	9.02	0.85	1.00	-4.37	-2.97	37 271	145 563
	EXP.	0.61	13.31	0.29	0.35	-0.010	-3.89		143 197
21	PUIS.	0.78	30.41	1.64	4.94	-3.40	-5.08	216 937	196 091
	EXP.	0.79	31.81	1.33	3.88	-0.0063	-5.23		190 178

\*T: Déplacement interrégional moyen.

Les estimateurs du paramètre  $\beta$  obtenus pour les modèles MDDC et MDAC sont calculés à partir de méthodes heuristiques et ne possèdent pas de formulation analytique comparable à celle des coefficients de régression. Les propriétés de tels estimateurs demeurent donc inconnues. Si leurs valeurs sont biaisées, la nature du biais ne peut être appréhendée qu'à partir de méthodes empiriques du type Monte-Carlo. Dans le cas où l'estimation se fait à partir d'une maximisation de la vraisemblance on est toutefois assuré que l'estimateur est asymptotiquement à variance minimale; ce résultat, intéressant en soi, n'est cependant pas suffisant pour que l'on soit en mesure d'effectuer des tests d'hypothèses sur la significativité de telles estimations.

2. L'estimation désagrégée par région d'origine et fondée sur une hypothèse de comportement économique peut mettre en relief l'hétérogénéité d'une structure de distribution comme celle des produits pétroliers entre différentes régions.

L'estimation d'un seul paramètre dans les modèles MDDC et MDAC doit se faire à partir d'une information agrégée et provenant de 21 régions très différentes au point de vue géographico-économique. La maximisation de l'entropie se fait à partir d'un modèle dans lequel le paramètre  $\beta$  est commun à l'ensemble de toutes les régions. Si l'on associe l'entropie à une mesure d'accessibilité [11], le modèle conduit à une accessibilité globale maximale sans grande signification économique. L'accessibilité est davantage une caractéristique régionale, sa maximisation sur un territoire aussi hétérogène que celui des régions françaises implique nécessairement tout un ensemble de «compromis» dont la résultante moyenne ne conserve qu'une significativité très réduite.

Par construction, le modèle économique proposé ici est désagrégé par région d'origine, chaque équation est construite sur la base d'une information propre à chaque région et peut ainsi refléter des effets d'attraction et de distance pour des zones relativement homogènes.

La reconstruction de la matrice théorique origines-destinations  $M \{t_{ij}\}$  à partir des 21 vecteurs théoriques horizontaux  $\{t_{ij}\}$  obtenus par l'estimation des 21 équations de régression permet par le calcul de l'écart type des résidus d'effectuer un dernier test d'ajustement relatif.

En posant:

$S_1$  = écart-type des résidus obtenus pour la matrice  $M \{t_{ij}\}$ ,

$S_2$  = moyenne des écarts-types des résidus obtenus pour chacun

des vecteurs horizontaux  $\{t_{ij}\}$ ,

on obtient les résultats suivants:

fonction distance	$S_1$	$S_2$
puis. nég.	145835	49382
exp. nég.	73095	44312

Pour ce cas d'application, les valeurs de  $S_1$  relativement élevées par rapport à celles de  $S_2$  font ressortir l'hétérogénéité des différentes régions en matière d'échanges des produits pétroliers ainsi que la supériorité attendue du pouvoir représentatif du modèle économique désagrégé. La configuration hexagonale du territoire français conditionne la structure des échanges interrégionaux et limite la portée des résultats obtenus; elle doit être prise en compte dans l'interprétation économique de ces résultats. Une répartition géographique plus linéaire des régions comme dans le cas du schéma canadien est de nature à défavoriser l'accessibilité globale du réseau et devrait en conséquence conduire à des résultats comparatifs semblables. En revanche, un schéma matriciel serait de nature à produire des résultats inverses.

### Références

1. Alonso, W. «A Theory of Movement», in N.M. Hansen, ed. *Human Settlement Systems*, Cambridge, Mass., Ballinger, 1978.
2. Batty, M. et S. Mackie. «The Calibration of Gravity, Entropy, and Related Models of Spatial Interaction», *Environment and Planning*, 4 (1972), 205-33.
3. Beckmann, M.J. and T.F. Golob. «A Critique of Entropy and Gravity in Travel Forecasting», *Proceedings of the 5th. International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, 1971, 109-17.
4. Black, W.R. «Interregional Commodity Flows: Some Experiments with the Gravity Model», *Journal of Regional Science*, 12 (1972), 107-18.
5. Cesario, F.J. «A Generalized Trip Distribution Model», *Journal of Regional Science*, 13 (1973), 233-47.
6. Cesario, F.J. «Least Squares Estimation of Trip Distribution Parameters», *Transportation Research*, 9 (1975), 13-18.
7. Cesario, F.J. «Much Ado About Entropy», *Geographical Analysis*, 11 (1979), 189-96.
8. Cesario, F.J. et T.E. Smith. «Directions for Future Research

- in Spatial Interaction Modeling», *Papers of the Regional Science Association*, 35 (1975), 57-72.
9. Chang-I-Hua et F. Porell. «A Critical Review of the Development of the Gravity Model», *International Regional Science Review*, 4 (1980), 97-126.
  10. Choukroun, J. M. «A General Framework for the Development of Gravity-Type Trip Distribution Models», *Regional Science and Urban Economics*, 5 (1975), 177-202.
  11. Erlander, S. «Accessibility, Entropy and the Distribution and Assignment of Traffic», *Transportation Research*, 11 (1977), 149-53.
  12. Ewing, G. O. «The Interpretation and Estimation of Parameters in Constrained and Unconstrained Trip Distribution Models», *Economic Geography*, 54 (1978), 264-73.
  13. Fisch, O. «On the Utility of Entropy Maximization», *Geographical Analysis*, 9 (1977), 79-83.
  14. Golob, T. F., R. L. Gustafson et M. J. Beckmann. «An Economic Utility Theory Approach to Spatial Interaction», *Papers of the Regional Science Association*, 30 (1973), 159-82.
  15. Guitton, H. *Entropie et gaspillage*. Paris, Dunod, 1975.
  16. Haining, R. P. «Estimating Spatial-Interaction Models», *Environment and Planning A*, 10 (1978), 305-20.
  17. Hansen, S. «Entropy and Utility in Traffic Modeling», *6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, University of New South Wales, 1974, 435-51.
  18. Hyman, G. M. «The Calibration of Trip Distribution Models», *Environment and Planning*, 1 (1969), 105-12.
  19. Kirby, H. R. «Normalizing Factors of the Gravity Model: An Interpretation», *Transportation Research*, 4 (1970), 37-50.
  20. Niedercorn, J. H. et J. D. Bechdolt. «An Economic Derivation of the Gravity Law of Spatial Interaction», *Journal of Regional Science*, 9 (1969), 273-82.
  21. Niedercorn, J. H. et J. D. Moorehead. «The Commodity Flow Gravity Model: A Theoretical Reassessment», *Regional and Urban Economics*, 4 (1974), 69-75.
  22. Nijkamp, P. «Reflections on Gravity and Entropy Models», *Regional Science and Urban Economics*, 5 (1975), 203-25.
  23. Openshaw, S. et C. J. Connolly. «Empirically Derived Deterrence Functions for Maximum Performance Spatial Interaction Models», *Environment and Planning A*, 9 (1977), 1067-79.
  24. Pitfield, D. E. «Freight Distribution Model Prediction Compared: A Test of Hypotheses», *Environment and Planning*, 10 (1978), 813-36.
  25. Stetzer, F. «Parameter Estimation for the Constrained Gravity Model: A Comparison of Six Methods», *Environment and Planning A*, 8 (1976), 673-83.

26. Tellier, L. N. et D. Sankoff. «Gravity Models and Interaction Probabilities», *Journal of Regional Science*, 15 (1975), 317-22.
27. Vermot-Desroches, B. «Testing Econometric Spatial Interactions Models Using French Regional Data», Communication présentée au 26e congrès Nord-Américain de la Regional Science Association, Los Angeles, 1979.
28. Wilson, A. G. «Inter-regional Commodity Flows: Entropy Maximizing Methods», *Geographical Analysis*, 2 (1970), 255-82.
29. Wilson, A. G. «A Statistical Theory of Spatial Distribution Models», *Transportation Research*, 1 (1967), 255-69.
30. Wilson, S. R. «Statistical Notes on the Evaluation of Calibrated Gravity Models», *Transportation Research*, 10 (1976), 343-45.

## Annexe I

## FLUX INTERREGIONAUX FERROVIARIES DES PRODUITS PETROLIERS FRANÇAIS EN 1975

Unité : tonne métrique

REGION N°

1	754460. 371. 3271.	240885. 364.	131992. 451846.	2026. 93986.	10150. 1228.	0. 2364.	2615. 5845.	7459. 1085.	264. 1830.	0. 0.
2	17. 0. 0.	109. 0.	479. 0.	0. 133.	252. 0.	0. 0.	0. 0.	2. 0.	0. 0.	0. 0.
3	1368. 5554. 9129.	24803. 7207.	36672. 209454.	120215. 29036.	3170. 10879.	45. 8894.	457. 96947.	3467. 32963.	63. 5343.	4696. 14.
4	46. 0. 0.	0. 0.	341. 0.	20400. 0.	3074. 0.	20. 0.	45. 0.	3443. 0.	0. 0.	0. 0.
5	68111. 9659. 19390.	120185. 2107.	530272. 100683.	484379. 152532.	55891. 13489.	52501. 5022.	78931. 254875.	233992. 4495.	25824. 35245.	6161. 1899.
6	0. 0. 30.	20. 0.	100. 88.	0. 0.	0. 0.	57. 0.	71. 0.	78. 0.	0. 0.	0. 0.
7	30. 0. 15.	0. 0.	206. 0.	13425. 0.	1903. 0.	366. 0.	194957. 0.	7722. 0.	15. 2.	0. 0.
8	70. 1137. 0.	21. 279.	2148. 25.	377775. 0.	3021. 0.	98. 0.	38494. 1028.	235128. 41380.	48006. 51.	168. 5.
9	0. 25. 0.	0. 0.	78. 0.	20. 100.	2625. 0.	0. 20.	133. 60.	38. 0.	733. 20.	15. 20.
10	0. 0. 0.	0. 0.	15. 20.	20. 0.	0. 0.	0. 0.	0. 21.	0. 1589.	15. 0.	120. 0.
11	45. 447395. 359.	0. 190168.	2113. 35.	81477. 289.	3227. 0.	2517. 106.	15743. 2016.	14514. 13619.	312712. 3412.	572370. 3578.
12	0. 94197. 113.	0. 8154.	1120. 0.	0. 0.	3250. 0.	0. 0.	0. 0.	3. 0.	0. 11.	0. 0.
13	0. 0. 0.	20. 0.	215. 1346.	0. 7802.	0. 45.	0. 0.	0. 130.	0. 0.	0. 20.	0. 0.
14	19187. 1000. 3290.	1244. 1340.	2209. 165555.	21. 562116.	12082. 71795.	0. 8004.	661. 3343.	886. 5311.	0. 27893.	30. 2597.
15	652. 247. 35.	32. 0.	8079. 9538.	0. 586587.	1314. 134826.	0. 236851.	0. 20017.	1062. 0.	3904. 0.	0. 0.
16	40. 28. 0.	0. 0.	0. 0.	0. 0.	0. 244.	0. 22.	40. 498.	0. 0.	0. 0.	0. 0.
17	0. 0. 20.	20. 13.	212. 1990.	20. 20.	206. 60.	0. 1725.	1. 2700.	0. 46.	120. 149.	1196. 0.
18	20. 52. 0.	0. 0.	1097. 0.	15. 0.	387. 0.	0. 0.	0. 0.	0. 1456.	0. 0.	0. 0.
19	12506. 0. 1892.	0. 1023.	2305. 487.	15124. 5553.	2700. 20102.	0. 76461.	0. 163013.	0. 210989.	47. 17578.	190. 197.
20	1. 3719. 954.	0. 672730.	1288. 347.	245. 100.	788. 15.	0. 302.	0. 5798.	104. 10797.	465. 10008.	37854. 29998.
21	9445. 14139. 856495.	125. 374223.	75529. 7150.	57458. 30932.	3679. 2103.	92. 279909.	6420. 995906.	8107. 757731.	4399. 1615982.	4897. 92207.

**Annexe 2**  
**RÉGIONS-PROGRAMMES FRANÇAISES**

