

Estimation expérimentale des flux d'échanges interrégionaux par la méthode de minimisation de l'entropie croisée

Jean Dubé
JDMD Groupe Conseils inc.
344 de Lamennais
Ste-Foy, Québec

André Lemelin
INRS Urbanisation, Culture et Société
3465 Durocher
Montréal, Québec

Introduction

Cet article présente une application expérimentale de la méthode d'estimation des flux d'échanges entre des régions par la minimisation de l'entropie croisée (mesure de Kullback-Leibler). Les flux interrégionaux ont été estimés pour 31 catégories de biens et services, entre trois régions du Québec en 1992 : les régions métropolitaines (RMR) de Montréal et de Québec et le reste du Québec (RdQ).

L'une des utilisations les plus répandues des modèles régionaux est l'évaluation des retombées économiques. Mais faute d'information sur les échanges interrégionaux, les analyses de retombées ne peuvent pas prendre en compte les effets de débordement et de rétroaction des investissements ou des politiques publiques. Les résultats risquent évidemment de s'en trouver faussés ou tronqués.

En science régionale, il est rare en effet de disposer de données complètes et fiables sur les flux d'échanges entre les régions. Les méthodes traditionnelles

d'estimation¹ des flux d'échanges interrégionaux se sont développées principalement dans le contexte de l'élaboration de modèles entrées-sorties régionaux ou interrégionaux. C'est Isard (1951) qui a formulé le cadre comptable et le modèle interrégionaux « idéaux » auxquels se sont ensuite référés la plupart des chercheurs. Le trait marquant du cadre comptable d'Isard est que l'on considère un même bien produit dans deux régions différentes comme deux biens complètement distincts : « Pennsylvania brick becomes a commodity different from New York brick or California brick » (Isard 1951 : 81). En conséquence, les flux d'échanges interrégionaux sont affectés de quatre indices, car ils sont enregistrés, non seulement par région productrice et région consommatrice, mais encore par secteur producteur et par secteur acheteur.

De toute évidence, ce modèle impose des exigences énormes en données qui sont, en pratique, rarement satisfaites. D'où une grande abondance d'écrits sur des méthodes permettant de définir, pour chaque bien, une matrice des échanges interrégionaux (voir notamment le résumé concis mais clair de Batten (1983 : 139-148)). Notons que ce problème n'est qu'un cas particulier du problème général de l'ajustement des matrices, que l'on rencontre aussi dans le contexte de la mise à jour ou de l'ajustement des tableaux entrées-sorties et des matrices de comptabilité sociale (MCS). Les écrits pertinents sont donc loin de se limiter au domaine des modèles régionaux d'entrées-sorties.

Cet article débute avec une présentation succincte de différentes méthodes d'estimation des flux d'échanges entre des régions. Nous présentons ensuite brièvement la méthode de minimisation de l'entropie croisée (MinXEnt), ainsi que les données auxquelles cette méthode a été appliquée. Suivent une discussion des résultats obtenus et une conclusion.

L'estimation des flux d'échanges interrégionaux

La plupart des méthodes proposées avancent une solution en deux temps. On estime d'abord, pour chaque bien, les flux intrarégionaux et les exportations régionales nettes (exportations, moins importations). Les résultats de cette première étape constituent les totaux marginaux de la matrice de flux interrégionaux recherchée. La seconde étape consiste à répartir les importations selon l'origine et les exportations selon la destination (passage des totaux marginaux à la matrice des flux interrégionaux).

On peut distinguer deux familles de méthodes : les méthodes purement palliatives² et les méthodes hybrides. Les premières n'utilisent que des données com-

munément disponibles, c'est-à-dire un tableau entrées-sorties national et des données régionales sur les niveaux d'activité (branches de production et branches de demande finale). Quant aux méthodes hybrides (parfois appelées *semi-survey*), elles proposent de combiner ces données avec l'information disponible d'autres sources.

Flux intrarégionaux et exportations régionales nettes

Une des méthodes palliatives d'estimation des exportations régionales nettes est la méthode des quotients de localisation, décrite et critiquée par Isserman (1980), Round (1983), Batten (1983), Miller et Blair (1985) et Lemelin (1997, 2004). Le quotient de localisation est un indicateur de spécificité qui mesure l'importance relative d'une industrie dans une région. On calcule généralement le quotient de localisation d'une industrie dans une région comme le rapport de la fraction de l'emploi « national » de cette industrie qui est situé dans la région, sur la fraction de l'emploi « national » de l'ensemble des industries qui est situé dans la région. Lorsque le quotient de localisation est supérieur à l'unité, la région est considérée comme exportatrice nette et lorsque le quotient est inférieur à l'unité, elle est considérée importatrice nette. Évidemment, ce calcul repose sur des hypothèses extrêmement restrictives, tel que mis en évidence notamment par Isserman (1980).

Une variante de cette application réside dans la technique du *minimum requirement* proposée par Ullman et Dacey (1960) et décrite notamment par Schaffer (1999). La différence majeure entre les deux approches est que le *minimum requirement*, fait appel à la structure de l'emploi régional comparée à un échantillon de régions de taille semblable plutôt qu'à l'économie en entier.

Une autre façon d'estimer les exportations régionales nettes est la méthode du solde régional.³ Son origine remonte à Isard (1953) et elle est étudiée, entre autres, par Isard (1953, 1972), Round (1983) et Batten (1983). Cette méthode considère que l'écart entre la production locale et l'absorption locale (la demande, habituellement dérivée d'un coefficient national) représente l'importation ou l'exportation nette du produit. La méthode du quotient de localisation évoquée plus haut est un cas particulier de la méthode du solde régional (voir entre autres Lemelin, 2004). D'autres variantes s'appuient sur des hypothèses d'homomorphisme⁴ entre les régions afin de dériver les demandes nettes des produits.

Ainsi, à partir d'une matrice de comptabilité sociale (MCS) du Québec qu'ils avaient actualisée pour 1992 (Robichaud et al 1998), Fréchette et Robichaud (1998) et Lemelin et Robichaud (1998) ont construit trois matrices régionales de comptabilité sociale, pour les régions métropolitaines de recensement de Montréal

1. Le mot « estimation » n'a pas ici le sens strict qu'on lui donne en statistique ou en économétrie; il est employé dans le sens plus général de l'attribution d'une valeur à une variable selon une méthode scientifiquement défendable.

2. Méthodes pour pallier au manque de données. C'est ainsi que nous proposons de traduire l'expression « non-survey ». « Méthodes constructives » porterait probablement à confusion, tandis que « méthodes indirectes » serait trop flou. Round (1983), qui donne une définition large de « non-survey techniques », propose d'ailleurs de nommer les valeurs obtenues par ces

méthodes des ersatz (« surrogates ») plutôt que des estimations, une idée que traduit bien l'adjectif « palliatif ».

3. *Regional commodity balance*. Fréchette et Robichaud (1998) et Lemelin et Robichaud (1998) ont d'ailleurs utilisé une méthode qui s'y apparente. Voir la description de cette méthode ci-après.

4. Similitudes structurelles. Par exemple, on peut faire l'hypothèse que les propensions marginales à importer et à exporter sont les mêmes pour chaque région qu'au niveau national.

et de Québec et le reste du Québec. Cette dernière a été obtenue par soustraction, après que les matrices des RMR de Montréal et de Québec aient été équilibrées. On désignera désormais ces données et leurs auteurs au moyen du sigle FLR. La méthode utilisée a été d'appliquer à chaque flux de la matrice, une répartition en proportion du meilleur indicateur disponible, de façon à obtenir la part de chaque région dans le flux donné.⁵ Ensuite, pour chacune des deux régions métropolitaines et pour chaque produit, on a calculé le solde régional comme la différence entre la production et l'absorption locales. Or pour chaque région et chaque produit, ce solde se divise en trois composantes : les exportations nettes (exportations, moins importations) vers le reste du Monde, les exportations nettes vers le reste du Canada et les exportations nettes vers les autres régions du Québec. FLR font l'hypothèse que les propensions moyennes à importer et à exporter du et vers le reste du Monde et le reste du Canada sont les mêmes pour chaque région que pour l'ensemble du Québec. Cela permet d'estimer les flux d'importations et d'exportations de chaque région avec le reste du Monde et le reste du Canada, ainsi que les exportations nettes de chaque région vers l'ensemble des autres régions du Québec. Les détails de la méthode de FLR sont donnés à l'annexe 2.

Toutes les méthodes évoquées conduisent à estimer des exportations nettes. Si ces exportations nettes servent de point de départ à l'estimation de flux interrégionaux, la structure de ces derniers est soumise a priori à de fortes restrictions implicites, car la possibilité de flux d'échanges croisés (*cross-hauling*) est exclue. Concrètement, si une région est exportatrice nette d'un produit, ses importations sont supposées nulles et ses exportations totales sont égales à ses exportations nettes; pour une région importatrice nette, ses exportations sont supposées nulles et ses importations totales sont égales à ses importations nettes. Cela est manifestement contraire aux faits.

L'envers de la même médaille est que ces méthodes maximisent les échanges intrarégionaux puisqu'elles font l'hypothèse que la production locale est d'abord dirigée vers l'absorption locale et que, réciproquement, la demande locale se satisfait d'abord auprès de la production locale.

Pour surmonter ces restrictions, nous proposons d'estimer simultanément les flux intrarégionaux et interrégionaux, sans passer par les exportations nettes. Les lignes qui suivent décrivent les méthodes les plus répandues d'estimation des flux interrégionaux.

5. Par exemple, les flux relatifs à la production manufacturière ont été répartis au moyen de données régionales tirées du recensement des manufactures de Statistique Canada. Cette approche est de type « top-down » puisqu'elle consiste à répartir un total entre les régions au moyen d'un allocateur, alors que l'approche « bottom-up » consiste à obtenir le total par addition de données régionales.

Flux interrégionaux

Il n'y a guère de technique purement palliative pour estimer les flux interrégionaux, si ce n'est la répartition bi-proportionnelle à partir des totaux marginaux de lignes et de colonnes, une technique manifestement peu crédible en l'occurrence. Les autres méthodes exigent l'apport de données supplémentaires. Dans l'heureuse éventualité où il existe une matrice de flux interrégionaux pour une période antérieure, le problème qui se pose est simplement celui de la mise à jour ou du rééquilibrage d'une matrice (nous parlerons des techniques de mise à jour dans un moment). Mais le cas qui nous intéresse est celui où il n'existe pas de données antérieures.

Dans ces conditions, il y a un premier groupe de méthodes qui s'appuient sur des données de coûts de transport. C'est le cas du modèle gravitaire de Leontief-Strout (1963) et de celui de la programmation linéaire. Le peu de réalisme de cette dernière méthode est bien connu : les flux théoriquement optimaux qui constituent la solution au programme linéaire sont très différents des flux observés, notamment parce que les données portent sur des flux qui, en réalité, ne sont pas homogènes. Le modèle de Leontief-Strout est plus intéressant, pourvu que l'on ait accès à des données sur les coûts de transport.

Pour notre part, nous nous intéressons davantage aux méthodes qui font appel à des données sur les flux de transport, vu la disponibilité récente de telles données entre les régions au Québec (Ministère des Transports du Québec 2003). Il s'agit bien de méthodes hybrides, puisqu'elles combinent des données de comptabilité économique (tableaux entrées-sorties, MCS) avec des données d'une autre source. À partir de la matrice des flux de transport, il s'agit de produire des flux d'échange qui respectent les totaux marginaux de l'absorption et de la production intérieures des régions. Ce problème est formellement équivalent à celui qui se pose lorsqu'il faut équilibrer une matrice, par exemple, pour mettre à jour un tableau entrées-sorties d'une période antérieure et le rendre conforme aux données courantes de production et de demande.

La somme des écrits sur les méthodes d'ajustement de matrices est impressionnante. L'approche la plus connue est probablement la technique d'ajustement biproportionnel RAS.⁶ Mais il existe une multitude d'autres méthodes. Les principales sont passées en revue notamment par Round (2003), dans le contexte de l'équilibrage des matrices de comptabilité sociale. Dans la foulée de Schneider et Zenios (1990), celui-ci distingue les problèmes d'ajustement de type 1 et de type 2 : les problèmes de type 1 consistent à ajuster une matrice rectangulaire à des totaux marginaux connus; les problèmes de type 2 consistent à ajuster une matrice carrée de manière à ce que les totaux de lignes soient égaux aux totaux de colonnes correspondants. L'ajustement d'une matrice de comptabilité sociale est un problème de type 2. Mais dans une matrice des flux de transport, les quantités

6. Nous verrons que la méthode de minimisation de l'entropie croisée (MinXEnt) que nous avons appliquée conduit dans les circonstances présentes aux mêmes résultats, mais qu'elle est fondée sur une justification théorique qui fait défaut à la méthode RAS.

absorbées par chaque région ne sont pas nécessairement égales aux quantités produites par la même région : de toute évidence, notre problème est de type 1.

On peut également distinguer les méthodes d'ajustement selon qu'elles sont formulées en termes de flux ou de coefficients. Par exemple, Jackson et Murray (2004 : 4-5) décrivent la méthode RAS en termes de coefficients, tandis que Round (2003) la définit en termes de flux. Les deux formulations ne sont pas équivalentes en général. En effet, la plupart des méthodes conduisent à des résultats qui peuvent s'interpréter et se calculer comme la solution d'un problème de minimisation, sous contraintes, des différences entre la matrice de départ et la matrice ajustée. Or, la fonction objectif du problème n'est pas la même, selon qu'elle soit écrite en termes de flux ou de coefficients.

L'une des méthodes mentionnées par Round (2003) est la méthode DSS, une variante de la technique RAS proposée par Schneider et Zenios (1990). Cette méthode est conçue spécifiquement pour des problèmes de type 2; elle n'est donc pas pertinente pour nous.

Une autre méthode pouvant servir à équilibrer des matrices est celle des moindres carrés. Dans ce cas, il s'agit de trouver une matrice de flux ajustés, à partir d'une matrice existante de flux, en minimisant la somme des déviations quadratiques entre les nouvelles et les anciennes valeurs. Mais, comme le précise Round (2003 : 23), cette formulation ne tient aucun compte de la fiabilité ou de la stabilité relative des flux observés. C'est pourquoi il lui préfère la méthode de Stone-Byron.

Cette méthode fut d'abord introduite par Stone et al (1942) et Stone (1977), avant d'être opérationnalisée par Byron (1978). Elle consiste à minimiser sous contraintes la somme des écarts quadratiques pondérés par le degré de fiabilité des flux, c'est-à-dire par l'inverse de leur variance. En quelque sorte, la méthode Stone-Byron est à la précédente ce que sont les moindres carrés généralisés aux moindres carrés ordinaires. Dans le cas présent toutefois, on suppose la plupart du temps que les covariances sont nulles. Quant aux variances, elles ne sont pas observées : on leur attribue une valeur qui traduit un jugement subjectif sur leur degré de fiabilité. Round (2003) justifie une telle pratique dans les termes suivants : « Although there is compiler judgment, it enters at a second order rather than at a first order level as it is the tolerance factors rather than the estimates themselves about which judgment is being exercised ».⁷

La méthode de minimisation de l'entropie croisée (MinXEnt), enfin, est largement utilisée par Robinson et ses associés du groupe IFPRI pour équilibrer des matrices de comptabilité sociale (voir notamment Robilliard et Robinson (1999), et Robinson et al (1998, 2000)). Contrairement aux techniques plus ou moins *ad hoc* décrites jusqu'à maintenant, la méthode MinXEnt s'appuie sur des fondements épistémologiques rigoureux. Étant donné l'absence d'information directe sur les échanges interrégionaux et le fort degré d'incertitude auquel nous

7. « Bien que le jugement du compilateur [de la MCS] soit présent, il intervient au niveau du second ordre plutôt que du premier, puisque c'est à propos des facteurs de tolérance, plutôt que des estimations elles-mêmes, que s'exerce le jugement ».

faisons face, il nous a semblé indispensable de pouvoir étayer ainsi nos estimations. C'est donc cette méthode que nous avons choisie pour estimer les flux d'échanges interrégionaux au Québec à partir des données de flux de transport comme information a priori. La méthode MinXEnt est exposée dans la prochaine section.

Méthode et données

La méthode MinXEnt

Le fondement de la méthode MinXEnt est formulé en tant que « second principe d'optimisation de l'entropie » par Kapur et Kesavan (1992), pour les situations où l'on dispose d'information a priori : « De toutes les distributions de probabilité qui satisfont les contraintes imposées, on doit choisir celle qui est la plus proche de la distribution donnée a priori » (traduction libre de Kapur et Kesavan (1992 : 12)). Selon les auteurs, ce principe est une généralisation d'un principe d'abord énoncé par Jaynes (1957) comme la traduction opérationnelle de la neutralité scientifique. Le même principe est mis de l'avant par Golan et al (1996). Ces auteurs, et bien d'autres, soutiennent que les méthodes d'estimation fondées sur la minimisation de l'entropie croisée sont de véritables méthodes d'estimation, d'inspiration bayésienne, et non seulement des techniques pour attribuer des valeurs à des variables (signification que nous avons donnée au terme « estimation » jusqu'à maintenant).

Plus concrètement, la méthode MinXEnt consiste à ajuster une matrice a priori -- en l'occurrence la matrice des flux de transport -- de façon à respecter une information « dure », qui est imposée comme contrainte et qui, dans notre cas, est donnée par les totaux marginaux. Puisque les contraintes marginales fixent l'ordre de grandeur des flux, l'ajustement porte sur la structure de la matrice. Cette structure est représentée par la répartition du total entre les éléments, répartition qui est formellement une distribution de probabilité. Le second principe de Kapur et Kesavan (1992) consiste donc à choisir, parmi les matrices qui respectent les contraintes marginales, celle qui est la plus proche de la matrice a priori.

L'application de ce principe exige donc la définition d'une mesure de différence. Celle-ci est donnée par la mesure de l'entropie croisée de Kullback-Leibler (1951) :

$$D(p:q) = \sum_i \sum_j p_{ij} \log \left(\frac{p_{ij}}{q_{ij}} \right) \quad (1)$$

où les q_{ij} sont les probabilités a priori et les p_{ij} , les probabilités a posteriori.

Dans son approche axiomatique à la théorie de l'information, Theil (1967 : 5) a montré que, pour un événement aléatoire A de probabilité q , la quantité d'information contenue dans un message disant que l'événement A s'est produit

est mesurée par $\ln(1/q)$. Il s'ensuit que $\ln(1/q)$ mesure réciproquement la quantité d'information *qui manque*, c'est-à-dire le degré d'*incertitude* qui subsiste lorsque l'on ne connaît que la probabilité d'occurrence q de A . Soit maintenant un ensemble exhaustif d'événements mutuellement exclusifs $\{A_i\}$ ⁸ auxquels sont associées des probabilités p_i . Il découle de ce qui précède que l'incertitude que laisse subsister cette distribution de probabilités est mesurée par l'espérance mathématique de la quantité d'information contenue dans un message qui dirait lequel des événements mutuellement exclusifs s'est produit :

$$E = \sum_i p_i \left(\frac{1}{p_i} \right) = - \sum_i p_i \log p_i \quad (2)$$

C'est la mesure d'entropie de Shanon. La même définition axiomatique de l'information implique par ailleurs ceci : si l'on veut mesurer la quantité d'information d'un message disant que la probabilité de A , que l'on croyait initialement être égale à q , est plutôt de p , alors il faut la mesurer par la différence entre l'information manquante *ex ante* et l'information manquante *ex post*, une fois reçu le message que la probabilité est de p , non pas de q ; cela donne

$$\ln \frac{1}{q} - \ln \frac{1}{p} = \ln \frac{p}{q} \quad (3)$$

Et quelle quantité d'information est contenue dans un message qui dit qu'une distribution de probabilités est donnée désormais par la distribution a posteriori $\{p_i\}$, plutôt que par la distribution a priori $\{q_i\}$? Cette quantité d'information est forcément mesurée par l'espérance mathématique

$$D(p:q) = \sum_i p_i \ln \left(\frac{p_i}{q_i} \right) \quad (4)$$

C'est la mesure de Kullback-Leibler pour une distribution uni-dimensionnelle. La méthode MinXEnt utilise la version bi-dimensionnelle de la même mesure.

Là se trouvent donc les assises épistémologiques de la méthode : la minimisation de l'entropie croisée est très rigoureusement la minimisation de l'information « injectée » dans la distribution a priori par le processus d'ajustement aux

8. On aura minimalement A et $\sim A$.

contraintes. Cette méthode est donc bel et bien la traduction opérationnelle du principe de la neutralité scientifique. Et dans l'esprit de l'approche bayésienne, les probabilités a priori sont révisées, mais en s'en éloignant le moins possible, à la lumière de l'information nouvelle (les contraintes).

L'application du principe de minimisation de l'entropie croisée consiste donc simplement à minimiser la mesure d'apport d'information de Kullback-Leibler, sous contrainte des identités habituelles respectées par les probabilités,⁹ auxquelles peuvent s'ajouter d'autres restrictions propres à chaque situation concrète. Formellement, le problème s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{Min } D(p:q) &= \sum_{i,j} p_{ij} \log \left(\frac{p_{ij}}{q_{ij}} \right) \\ \text{s./c. } \sum_{i,j} p_{ij} &= 1; p_{ij} \geq 0; \sum_{i,j} p_{ij} g_{ijr} = a_r \end{aligned} \quad (5)$$

où le dernier ensemble de contraintes, formulé ici de manière générale, peut notamment prendre la forme particulière du respect de totaux marginaux imposés. La solution de ce problème est unique puisque la fonction objective est convexe. Lorsque la distribution de départ n'est pas connue, la méthode de minimisation de l'entropie croisée peut aussi s'appliquer en considérant que la distribution de probabilité a priori est uniforme. Dans le cas particulier où le dernier ensemble de contraintes est constitué uniquement des contraintes de totaux marginaux, la solution obtenue est alors une matrice bi-proportionnelle constituée à partir des vecteurs de totaux marginaux.

Appliqué au cas des flux d'échanges interrégionaux, le problème d'estimation portant sur n régions, R , est résumé dans le tableau de contingence suivant (tableau 1). Les flux de transport d'une région i vers une région j , x_{ij} , servent d'information a priori sur la répartition des flux d'échanges entre les régions, alors que les données par région sur la production, $\bar{x}_{i\cdot}$, et sur l'absorption, $\bar{x}_{\cdot j}$, jouent le rôle de contraintes.

En vue de l'application de la méthode MinXEnt, les flux de la matrice sont transformés en probabilités. La distribution de probabilité a priori, q , est donnée par

$$q_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_g \sum_h x_{gh}}, \text{ pour toute paire } [i,j], i = 1, \dots, n \text{ et } j = 1, \dots, n \quad (6)$$

9. Le problème d'optimisation posé sous la forme d'un Lagrangien nous assure automatiquement que la solution ne pourra pas contenir de probabilités négatives.

TABLEAU 1 Tableau de contingence portant sur les échanges entre n régions

Origine	Destination				Total
	R_1	R_2	...	R_n	
R_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	$\sum_{j=1}^n \bar{x}_{1j} = \bar{x}_{1\bullet}$
R_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	$\sum_{j=1}^n \bar{x}_{2j} = \bar{x}_{2\bullet}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
R_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nn}	$\sum_{j=1}^n \bar{x}_{nj} = \bar{x}_{n\bullet}$
Total	$\sum_{i=1}^n \bar{x}_{i1} = \bar{x}_{\bullet 1}$	$\sum_{i=1}^n \bar{x}_{i2} = \bar{x}_{\bullet 2}$...	$\sum_{i=1}^n \bar{x}_{in} = \bar{x}_{\bullet n}$	$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} = \bar{x}_{\bullet\bullet}$

Par ailleurs, les contraintes de production et d'absorption se traduisent par les identités (7) et (8) :

$$\bar{p}_{i\bullet} = \frac{\bar{x}_{i\bullet}}{\sum_g \bar{x}_{ig}}, \text{ pour tout } i, i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\bar{p}_{\bullet j} = \frac{\bar{x}_{\bullet j}}{\sum_h \bar{x}_{hj}}, \text{ pour tout } j, j = 1, \dots, n \quad (8)$$

Ainsi, dans le problème d'optimisation énoncé en (5), on remplace la distribution a priori, q , par (6) et le dernier ensemble de contraintes par les équations (7) et (8). Dans l'application que nous avons faite de la méthode MinXEnt, les seules contraintes posées viennent du respect des totaux marginaux. Il a été démontré par Macgill (1977) que, dans ces conditions, la méthode MinXEnt conduit aux mêmes résultats numériques que la technique RAS. Mais contrairement à cette dernière, la méthode MinXEnt a des fondements théoriques. Et d'un point de vue pratique, il faut retenir que d'autres contraintes pourraient s'ajouter pour tenir compte de toute information supplémentaire.

Les données

Il existe plusieurs sources de données sur les flux de transports entre les régions. Cependant il s'agit de flux entre des régions telles que les provinces canadiennes et les états américains. Peu de données fiables sont disponibles pour un découpage plus fin des régions tel que les RMR et les RA (régions administratives). Les échantillons tirés lors des sondages pour établir les flux de transports entre les régions sont trop petits lorsqu'ils sont ramenés à des découpages plus fins. De plus, la méthode de sondage exclut souvent les transporteurs qui œuvrent sur de courtes distances (le vrac par exemple) ou à leur propre compte (compte propre).

Les données sur les flux de transports que nous avons utilisées, disponibles depuis peu, proviennent d'une enquête en bordure de route menée par le Ministère des transports du Québec, en collaboration avec le Conseil canadien des administrateurs de transport motorisé (CCATM). Cette enquête fut menée au Québec dans la semaine du 26 août au 5 septembre 1999, ce qui permit de recueillir 21 700 observations relatives aux déplacements interurbains de camions lourds (3 000 kg et plus). Il y avait 51 postes d'enquête en bordure des principaux axes routiers du Québec, permettant ainsi un niveau de détail et de précision impossible à atteindre avec les données d'enquête de Statistique Canada par exemple.

Il faut reconnaître d'emblée qu'il y a une différence de nature entre les données de transport et les données de flux d'échanges. Car la destination d'un camion n'est pas nécessairement le point de livraison finale de ce qu'il transporte. C'est le problème du transbordement, dont l'importance varie d'un produit à l'autre. Seul un examen au cas par cas de la logistique du transport des différents biens permettrait de faire une évaluation qualitative de l'importance du phénomène et de ses conséquences sur l'estimation des flux. Étant donné le caractère exploratoire de notre étude et les ressources limitées que nous pouvions y consacrer, nous avons dû nous contenter de prendre acte de cette faiblesse, sans pouvoir y remédier.

Les données portent sur les déplacements interurbains, c'est-à-dire que l'enquête ne considère que les déplacements de 80 km et plus, tout comme les enquêtes de Statistique Canada. Cela implique que les données sous-estiment certainement les échanges réels à l'intérieur d'une même région. Nous reviendrons d'ailleurs sur ce point de façon plus détaillée dans la discussion des résultats d'estimation.

Malgré cette lacune au niveau des données intra-zone, il n'en reste pas moins que les données du CCATM sont les plus précises qui soient disponibles, en ce sens qu'elles incorporent les transporteurs œuvrant à leur propre compte, ce qui n'est pas le cas des données de l'enquête de Statistique Canada. Ainsi, les données du CCATM 1999 sont « [...] les meilleures données disponibles actuellement sur les flux hebdomadaires de camions lourds entre le Québec et ses marchés extérieurs, de même qu'entre la plupart des régions du Québec » (Ministère des Transports du Québec 2003: 7). Les données servant de matrice d'information a priori sont présentées au tableau 2.

Les données économiques qui jouent le rôle de contraintes sur les totaux marginaux, proviennent, quant à elles, des matrices de comptabilité sociale de

TABLEAU 2 Matrice des déplacements de camions entre les Régions métropolitaines de Recensement du Québec, le reste du Québec, le reste du Canada et les États-Unis, en nombre de déplacements, pour une semaine représentative d'automne 1999.

ORIGINE	DESTINATION										Total	
	RMR Saguenay	RMR Québec	RMR Sherbrooke	RMR Trois-Rivières	RMR Montréal	RMR Gatineau	Hors RMR	États-Unis	Ouest canadien	Ontario		Mariannes
RMR Saguenay	1000		200	200		500	100		100			2100
RMR Québec	800	1200	100	500	3700	7600	500		600	300		15300
RMR Sherbrooke		100	100	100	1900	1400	200		100			3900
RMR Trois-Rivières	100	500	100	100	1600	100	2500	500	200			5700
RMR Montréal	500	3700	1100	1600	4300	1600	24200	10100	200	13800	1200	62300
RMR Gatineau			100	800	100	600	400		5700			7700
Hors RMR	500	9200	1400	3400	25400	800	26200	8300	100	7900	900	84100
États-Unis	100	600	300	400	10300	300	6500	300	500	200		19500
Ouest canadien					200		100				100	400
Ontario		700	100	200	17400	6600	6300	600		1600	1100	34600
Mariannes		400		100	600		1800	400		800	100	4200
Total	2000	17400	3200	6700	66400	9500	77700	21400	300	31300	3900	239800

Note: 1. Légende : Les chiffres en caractères gras sont jugés fiables selon les auteurs de l'enquête; Les chiffres en caractères normaux doivent être utilisés avec prudence selon les auteurs de l'enquête; Les chiffres en italiques sont jugés peu représentatifs selon les auteurs de l'enquête.

Source : Ministère des Transports du Québec.

1992 des RMR de Québec et de Montréal et du reste du Québec (Fréchette et Robichaud 1998; Lemelin et Robichaud 1998; Robichaud et al 1998). Il eût été préférable, évidemment, que l'année des données économiques (1992) soit plus proche de celle des données sur les flux de transport (1999). Malheureusement, l'élaboration de matrices de comptabilité sociale régionales étant une entreprise lourde, le travail accompli par Fréchette, Lemelin et Robichaud (FLR) en 1998 n'a pas été mis à jour, de sorte que les données économiques de 1992 sont les plus récentes qui existent. Il est important de souligner que les estimations que nous avons extraites des MCS sont les flux de production (offre) et d'absorption (demande) intérieures régionales, lesquels n'ont pas été obtenus par des méthodes palliatives, mais plutôt par la méthode des indicateurs. Notre estimation des flux interrégionaux ne s'appuie donc pas sur le résultat d'une méthode palliative (ce qui serait le cas si nous avions pris comme point de départ les exportations nettes vers les autres régions). En somme, la méthode d'estimation que nous avons appliquée se situe *en amont* du calcul du solde régional : les données qui jouent le rôle de contraintes sont la production intérieure régionale et la demande intérieure régionale (demande intermédiaire, consommation privée et publique et investissements), qui sont les deux termes de l'équation du solde régional.¹⁰

10. Rappelons que l'application de la méthode exige que l'on dispose non seulement de données sur les flux de transport, mais également de données sur la production et la demande intérieures de chacune des régions. C'est pourquoi la méthode ne pourrait pas s'appliquer à d'autres provinces,

Examen des résultats

Dans cette section nous discutons les résultats de l'application de la méthode MinXEnt à l'estimation des flux d'échanges pour 31 produits entre les RMR de Montréal et de Québec, le reste du Québec, le reste du Canada et le reste du Monde, en nous appuyant sur une matrice de flux de transport qui joue le rôle de matrice d'information a priori. Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel GAMS au niveau de précision standard de 4 décimales. Rappelons que l'estimation porte sur les probabilités p_{ij} , et que les flux pour chaque produit sont obtenus en faisant le produit des probabilités estimées par le total du tableau. Il s'ensuit que les erreurs d'arrondi sont gonflées, de sorte qu'il y a de petits écarts entre les totaux marginaux des flux estimés et les données de comptabilité économique tirées de FLR.¹¹

Les résultats agrégés de nos estimations sont présentés aux tableaux 3 à 7, où sont rapportés les flux d'échanges de produits primaires, de produits manufacturiers de consommation, de produits manufacturiers d'assemblage, de produits manufacturiers intermédiaires et enfin de services (le détail des agrégations est donné en annexe).

À titre d'illustration plus détaillée, nous présentons les flux d'échanges interrégionaux estimés pour deux produits en particulier, soit : *Papier et les produits connexes* et *Machines et matériel*. Les flux estimés pour ces deux produits sont donnés aux tableaux 8 et 9.

Les tableaux de flux d'échanges se lisent comme une MCS : les lignes donnent la ventilation des destinations d'un produit ou d'un groupe de produits, alors que les colonnes donnent la ventilation des origines du même produit ou groupe de produits. Un élément général d'une matrice représente la valeur des expéditions d'un produit donné de la région d'origine i vers la région de destination j .

Ainsi, les données de contraintes économiques nous indiquent que la RMR de Québec produit pour 364,28 millions de dollars de papier et de produits connexes et qu'elle en consomme pour 319,56 millions de dollars (aux prix à la production, hors taxes et marges, en dollars constants de 1992). La répartition de la production de la RMR se fait comme suit : une valeur de 15,84 millions de dollars est consommée localement alors que les exportations vers la RMR de Montréal, le reste du Québec (RdQ), le reste du Canada (RdC) et le reste du monde (RdM) se chiffrent respectivement à 64,29 millions, 165,84 millions, 45,65 millions et 72,67 millions de dollars. La ventilation de l'absorption de papier et de produits connexes par la RMR de Québec est la suivante : d'abord, la consommation locale est égale par définition à la production locale destinée au marché local, soit 15,84

parce que, même s'il existait des données de flux transport entre les régions d'autres provinces, il n'existe pas à notre connaissance de données comparables à FLR sur la production et la demande.

11. Les estimations de Dubé (2003), rapportées dans Dubé et Lemelin (2005) ont été faites à une précision de 8 décimales et respectent de façon plus exacte les totaux marginaux.

TABLEAU 3 Flux d'échanges interrégionaux estimés entre les régions économiques (aux prix à la production hors taxes et marges, en millions de dollars constants de 1992)

Produits primaires						
Absorption (destination)						
	RMR Montréal	RMR Québec	Reste du Québec	Reste du Canada	Reste du Monde	Total offre
Production (origine)						
RMR Montréal	24,75	27,38	259,91	49,60	279,07	642,00
RMR Québec	29,21	17,34	112,41	5,25	35,18	198,60
Reste du Québec	1506,62	747,11	2976,97	450,22	2678,55	8389,40
Reste du Canada	1293,40	206,29	1802,33			3302,00
Reste du Monde	1863,05	329,19	2315,18			4507,00
Total demande	4717,35	1327,23	7466,77	504,93	2992,72	17009,00

TABLEAU 4 Flux d'échanges interrégionaux estimés entre les régions économiques (aux prix à la production hors taxes et marges, en millions de dollars constants de 1992)

Produits manufacturiers de consommation						
Absorption (destination)						
	RMR Montréal	RMR Québec	Reste du Québec	Reste du Canada	Reste du Monde	Total offre
Production (origine)						
RMR Montréal	2154,14	1061,86	5889,24	4245,98	1591,59	14943,70
RMR Québec	507,28	127,17	664,83	84,16	41,54	1424,70
Reste du Québec	4392,68	1141,94	3359,84	1885,04	882,31	11661,60
Reste du Canada	3114,97	141,81	1596,31			4853,00
Reste du Monde	4029,19	199,57	1892,53			6121,00
Total demande	14197,60	2671,29	13403,75	6216,05	2515,31	39004,00

millions de dollars; quant aux importations, elles proviennent de la RMR de Montréal, du RdQ, du RdC et du RdM, respectivement pour 27,95 millions, 236,64 millions, 25,16 millions et 13,98 millions de dollars. On peut faire la même lecture pour les flux relatifs aux autres régions et pour les tableaux des flux des autres produits. Lorsqu'on compare les flux d'échanges de papier et produits connexes et les flux de transport, on peut noter que le poids du RdQ dans la production et ceux du RdC et du RdM dans la demande (exportations) sont

TABLEAU 5 Flux d'échanges interrégionaux estimés entre les régions économiques (aux prix à la production hors taxes et marges, en millions de dollars constants de 1992)

Produits manufacturiers d'assemblage						
Absorption (destination)						
	RMR Montréal	RMR Québec	Reste du Québec	Reste du Canada	Reste du Monde	Total offre
Production (origine)						
RMR Montréal	408,43	211,18	845,98	2614,91	4502,26	8882,80
RMR Québec	100,61	73,25	234,63	106,86	204,72	718,10
Reste du Québec	465,24	343,75	578,10	1702,77	2824,80	5916,10
Reste du Canada	3289,70	376,46	2774,33	505,47	5,16	6951,00
Reste du Monde	7752,71	1287,66	8115,10	1839,62	2319,30	21315,00
Total demande	12016,79	2291,08	12547,28	6769,70	9888,15	43483,00

TABLEAU 6 Flux d'échanges interrégionaux estimés entre les régions économiques (aux prix à la production hors taxes et marges, en millions de dollars constants de 1992)

Produits manufacturiers intermédiaires						
Absorption (destination)						
	RMR Montréal	RMR Québec	Reste du Québec	Reste du Canada	Reste du Monde	Total offre
Production (origine)						
RMR Montréal	991,18	714,84	4128,92	3623,63	2748,25	12207,30
RMR Québec	684,31	162,76	951,57	130,16	119,95	2049,60
Reste du Québec	3294,12	999,38	4023,04	3548,24	5998,97	17863,10
Reste du Canada	3396,50	179,13	2539,75			6115,00
Reste du Monde	3277,04	170,31	2036,99			5484,00
Total demande	11643,60	2227,11	13681,87	7301,99	8864,43	43719,00

beaucoup plus importants que dans la matrice des flux de transports. Cela illustre en quelque sorte la capacité de la méthode à trouver une solution en présence d'une configuration des totaux marginaux qui est fort différente de celle des flux de transport.

Il est à noter que les échanges intérieurs au reste du Canada et au reste du Monde et entre ces deux régions ont été exclus de l'estimation et fixés à zéro : en conséquence, la partie correspondante des tableaux est vide. Le groupe des produits manufacturiers d'assemblage, et plus précisément le produit *Machines et*

TABLEAU 7 Flux d'échanges interrégionaux estimés entre les régions économiques (aux prix à la production hors taxes et marges, en millions de dollars constants de 1992)

Services						
Absorption (destination)						
	RMR Montréal	RMR Québec	Reste du Québec	Reste du Canada	Reste du Monde	Total offre
Production (origine)						
RMR Montréal	14086,02	5149,64	28177,49	3502,89	2134,80	53054,20
RMR Québec	5245,56	745,51	3797,34	95,63	46,86	9930,80
Reste du Québec	21880,11	3360,10	8563,82	834,90	470,65	35110,00
Reste du Canada	4608,83	141,66	1283,09			6031,00
Reste du Monde	2406,99	72,44	593,68			3072,00
Total demande	48227,38	9471,41	42415,34	4430,79	2653,08	107198,00

TABLEAU 8 Flux d'échanges interrégionaux estimés entre les régions économiques (aux prix à la production hors taxes et marges, en millions de dollars constants de 1992)

Papier et produits connexes						
Absorption (destination)						
	RMR Montréal	RMR Québec	Reste du Québec	Reste du Canada	Reste du Monde	Total offre
Production (origine)						
RMR Montréal	41,93	27,95	301,86	436,02	824,53	1632,29
RMR Québec	64,29	15,84	165,84	45,65	72,67	364,28
Reste du Québec	846,89	236,64	1147,82	1239,12	2230,42	5700,91
Reste du Canada	536,64	25,16	474,22			1036,02
Reste du Monde	317,70	13,98	247,82			579,50
Total demande	1807,44	319,56	2337,57	1720,80	3127,63	9313,00

matériel, fait toutefois exception. Dans ce cas en effet, étant donné les totaux marginaux, il n'y a pas de solution possible sans flux de réexportation. Car, d'une part, le total de l'absorption pour l'ensemble du Québec est égal à 10 711,06 millions (4 499,33 + 952,48 + 5 259,25), ce qui est inférieur aux importations, égales à 14 756,51 millions (3 637,98 + 11 118,53); d'autre part, le total de la production est de 2 434,49 millions (1 292,89 + 63,61 + 1 077,98), ce qui est inférieur au total des exportations, qui est de 6 479,94 millions (3 258,02

TABLEAU 9 Flux d'échanges interrégionaux estimés entre les régions économiques (aux prix à la production hors taxes et marges, en millions de dollars constants de 1992)

Machines et matériel						
Absorption (destination)						
	RMR Montréal	RMR Québec	Reste du Québec	Reste du Canada	Reste du Monde	Total offre
Production (origine)						
RMR Montréal	304,31	29,23	104,88	502,03	352,45	1292,89
RMR Québec	12,03	13,75	20,63	0,00	17,19	63,61
Reste du Québec	67,05	58,46	13,75	410,91	527,82	1077,98
Reste du Canada	1667,69	180,52	1279,14	505,47	5,16	3637,98
Reste du Monde	2448,24	670,52	3840,85	1839,62	2319,30	11118,53
Total demande	4499,33	952,48	5259,25	3258,02	3221,92	17191,00

+ 3 221,92). Seul le phénomène de réexportation de produits importés permet de réconcilier ces chiffres qui, répétons-le, sont considérés comme des données « dures » et fixent les contraintes du processus d'estimation. C'est pourquoi, en ce qui concerne le produit *Machines et matériel*, le processus d'estimation a été modifié pour permettre l'équilibrage du tableau par les flux de réexportation. Incidemment, les données du produit *Machines et matériel* nous rappellent que la méthode d'estimation pourrait être améliorée si l'on possédait des données relatives aux réexportations, un phénomène qui peut toucher n'importe quel produit.

Globalement, quelle évaluation peut-on faire des estimations obtenues ? Évidemment, l'idéal pour en juger serait de pouvoir les comparer à des valeurs observées. Mais ces observations n'existent pas. Alors force est de recourir à une appréciation de la vraisemblance des chiffres obtenus à la lumière de ce que l'on connaît de l'économie du Québec.

Il faut aussi garder à l'esprit que l'objectif poursuivi par cette application expérimentale de la méthode MinXEnt était de trouver un substitut à la méthode du solde régional. Or, par rapport à cette dernière, la méthode MinXEnt surmonte plusieurs restrictions importantes. D'abord, elle n'exclut pas l'existence de flux croisés (« cross-hauling ») et, par conséquent, ne minimise pas a priori le volume des échanges interrégionaux. Par le fait même (ce sont les deux faces d'une même médaille), elle évite de maximiser le volume des échanges intérieurs à la région. Enfin, la méthode MinXEnt permet, non seulement d'estimer les importations et exportations de chaque région, mais encore de les répartir entre origines pour les importations, et entre destinations pour les exportations. La méthode du solde régional en elle-même ne permet pas cela.

Cela dit, la qualité de l'estimation par la méthode MinXEnt est tributaire de la qualité des données sur les flux de transport. D'ailleurs, nous avons pu constater

que les résultats sont sensibles à celles-ci : il y a en effet des différences entre les estimations présentées ici et celles de Dubé (2003) qui s'appuyaient sur les données d'AGRA-Monéco Québec (1999; les estimations de cette étude se rapportent à 1997). Mais bien que nous ayons utilisé les meilleures données disponibles, celles-ci comportent encore de sérieuses lacunes. D'abord, elles ne permettent pas de tenir compte du phénomène du transbordement. De plus, elles se rapportent exclusivement au transport par camion. La matrice a priori qui en résulte est donc moins adéquate pour certains produits que pour d'autres. On peut penser, par exemple, que ces données sur le transport par camion conviennent moins bien à l'estimation des flux de services échangeables.¹² De même, on peut s'attendre à des distorsions en ce qui concerne les marchandises transportées en grande partie par bateau ou par train ou celles qui sont plus susceptibles d'être transbordées.

Ensuite, comme nous l'avons déjà souligné, les données de l'enquête du Ministère des Transports du Québec ne portent que sur les déplacements de plus de 80 km, ce qui conduit à une sous-estimation du volume des flux intrarégionaux.¹³ Cette dernière caractéristique des données a pour effet de pervertir en quelque sorte un des avantages de la méthode MinXEnt sur celle du solde régional, en menant à une sous-évaluation des flux intérieurs. À cause de cela, les estimations expérimentales que nous avons obtenues représentent en quelque sorte une position extrême, le contre-pied de la méthode du solde régional. Par exemple, la valeur estimée des échanges intrarégionaux de *Papier et produits connexes* au sein de la RMR de Québec est de 16,19 millions; la méthode du solde régional conduirait à une valeur estimée de 319,56 millions (soit le minimum entre la production locale de 364,28 millions et l'absorption locale de 319,56 millions). La méthode apparentée de Robichaud, Fréchette et Lemelin (1998), décrite précédemment, produit pour sa part une valeur estimée de 204,20 millions.

En dépit du fait que les données de transport conduisent à sous-estimer les flux intérieurs, les résultats obtenus nous semblent néanmoins plus crédibles en général que ceux de la méthode du solde régional. C'est le cas en particulier pour les *Voitures, camions et autres*, où, malgré la forte concentration de la production québécoise dans la région de Montréal, les flux estimés respectent bien la prévalence des flux croisés propres à cette famille de produits.

Insistons enfin sur le fait que, selon l'évaluation qu'en fait le Ministère, les données de transport sont assez fiables en ce qui concerne les flux interrégionaux, de sorte que si l'on pouvait résoudre le problème de la sous-estimation des flux intrarégionaux dans les données a priori, la méthode serait pleinement opérationnelle (bien que mieux adaptée aux flux de biens qu'aux flux de services).

12. Par exemple, nous sommes insatisfaits des résultats obtenus pour *Autres finances, assurances et affaires immobilières*. Selon les estimations obtenues par la méthode MinXEnt, la région de Montréal importerait davantage de ces services en provenance du reste du Québec qu'en provenance du reste du Canada (incluant Toronto), ce qui est contraire à la perception commune.

13. La situation des 51 postes d'enquête, en bordure des principaux axes routiers, a également pu jouer un rôle.

Conclusion

Cet article rend compte d'une application expérimentale de la méthode de minimisation de l'entropie croisée à l'estimation des flux d'échanges interrégionaux.

La plupart des méthodes qui visent à suppléer à l'absence de données sur les flux d'échanges interrégionaux ont pour point de départ une estimation des exportations *nettes*, selon la technique du solde régional ou une technique apparentée. Cette approche exclut a priori la possibilité de flux d'échanges croisés (*cross-hauling*) et conduit donc à maximiser les échanges intrarégionaux.

La méthode de minimisation de l'entropie croisée offre une solution élégante à ce problème. Comme toutes les méthodes d'estimation des flux interrégionaux, à l'exception des méthodes naïves, elle exige l'apport de données supplémentaires. En l'occurrence, nous avons combiné des données de comptabilité économique de Fréchette et Robichaud (1998) et Lemelin et Robichaud (1998) avec les données du Ministère des Transports du Québec (2003) sur les flux de transport par camion au Québec.

À partir de la matrice des flux de transport, il s'agit de produire des flux d'échange qui respectent les totaux marginaux de l'absorption et de la production intérieures des régions, un problème formellement équivalent à celui de l'équilibre d'une matrice. La méthode de minimisation de l'entropie croisée permet de résoudre ce problème en s'appuyant sur des assises épistémologiques explicites : la minimisation de l'entropie croisée est très rigoureusement la minimisation de l'information « injectée » dans la distribution a priori par le processus d'ajustement aux contraintes. Cette méthode est donc une traduction opérationnelle du principe de la neutralité scientifique.

Cela dit, la qualité de l'estimation par la méthode MinXEnt est tributaire de la qualité des données sur les flux de transport. Or ces données, bien qu'elles soient les meilleures disponibles, comportaient des lacunes importantes, qui ont entraîné une nette sous-estimation des flux intrarégionaux. Nous avons donc démontré l'applicabilité de la méthode MinXEnt, mais elle ne pourra être considérée comme pleinement opérationnelle que lorsque sera résolu le problème de sous-estimation des flux intra-régionaux. On peut aussi espérer qu'à l'avenir, d'autres sources de données deviendront disponibles, par exemple, sur les télécommunications ou le trafic de passagers, qui sont probablement de meilleurs indicateurs quant aux flux de services échangeables.

La méthode mise à l'essai dans cet article est donc perfectible. Nous croyons néanmoins qu'elle offre la possibilité de construire des modèles régionaux qui permettront une évaluation plus exacte des retombées économiques, grâce à la prise en compte les effets de débordement et de rétroaction des investissements ou des politiques publiques.

Référence

- AGRA-Moneco Québec. 1999. *Étude sur le transport de marchandises au Québec, Rapport final*. Montréal.
- Batten, D.F. 1983. *Spatial Analysis of Interacting Economies: The Role of Entropy and Information Theory in Spatial Input-Output Modeling*. Boston: Kluwer-Nijhoff.
- Byron, R.P. 1978. « The Estimation of Large Social Account Matrices ». *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, 141: 359-367.
- Dubé, J. 2003. *Estimation des flux d'échanges interrégionaux par la méthode de minimisation de l'entropie croisée*. Mémoire de maîtrise codirigé par A. Lemelin et B. Decaluwé. Sainte-Foy : Université Laval.
- Dubé, J. et A. Lemelin. 2005. *Une application expérimentale de la méthode de minimisation de l'entropie croisée : l'estimation des flux d'échanges interrégionaux au Québec*. Cahier de recherche 05-25. Sainte-Foy : CIRPEE, Université Laval.
- Fréchette, P. et V. Robichaud. 1998. *Construction de la matrice de comptabilité sociale de la région métropolitaine de Québec pour 1992 : aspects techniques*. Sainte-Foy : CRAD, Université Laval.
- Golan, A., G. Judge et D. Miller. 1996. *Maximum Entropy Econometrics: Robust Estimation with Limited Data*. Londres : John Wiley & Sons.
- Isard, W. 1951. « Interregional and Regional Input-Output Analysis : A Model of a Space Economy ». *Review of Economics and Statistics*, 33: 318-328.
- _____. 1953. « Regional Commodity Balances and Interregional Commodity Flows ». *The American Economic Review*, 43: 167-180.
- _____. 1972. « Méthodes d'analyse régionale : une introduction à la science régionale ». Traduction française de « Methods of Regional Analysis : An Introduction to Regional Science ». Paris : Dunod.
- Isserman, A.M. 1980. « Estimating Export Activity in a Regional Economy : A Theoretical and Empirical Analysis of Alternative Methods ». *International Regional Science Review*, 5: 155-184.
- Jackson, R.W. et A.T. Murray. 2004. « Alternative Input-Output Matrix Updating Formulations ». *Economic Systems Research*, 16:135-148.
- Jaynes, E.T. 1957. « Information Theory and Statistical Mechanics ». *Physical Review*, 106 : 620-630 et 108: 171-190.
- Kapur J.N. et H.K. Kesavan. 1992. *Entropy Optimization Principles with Applications*. San Diego: Academic Press, Inc.
- Kullback, S. et R.A. Leibler. 1951. « On Information and Sufficiency ». *Ann. Math. Stat.*, 4: 99-111.
- Lemelin, A. 1997. *Matrices régionales de comptabilité sociale, flux d'échanges interrégionaux et modèles régionaux et multirégionaux*. Montréal: texte non publié, INRS-Urbanisation.
- _____. 2004. *Méthodes quantitatives des sciences sociales appliquées aux études urbaines et régionales*. Montréal: INRS-UCS, <http://www.inrs-ucs.quebec.ca/Cours/Lemelin/EUR8213/index.htm>.
- Lemelin, A. et V. Robichaud. 1998. *Construction de la matrice de comptabilité*

- sociale de la région métropolitaine de Montréal pour 1992 : aspects techniques*. Montréal : INRS-Urbanisation.
- Leontief, W. et A. Strout. 1963. « Multiregional Input-Output Analysis », dans T. Barna, W.I. Abraham et Z. Zenessey (éds.). *Structural Interdependence and Economic Development*. New York: St. Martin's Press.
- Macgill, S.M. 1977. « Theoretical Properties of Biproportional Matrix Adjustments », *Environment and Planning A*, 9: 687-701.
- Miller, R.E. et P. Blair. 1985. « Nonsurvey and Partial-Survey Methods ». *Input-Output Analysis : Foundations and Extensions*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Ministère des Transports du Québec MTQ. 2003. *Les déplacements interurbains de véhicules lourds au Québec : Enquête sur le camionnage de 1999*. Québec: Bibliothèque nationale du Québec.
- Robichaud, V., P. Fréchette et A. Lemelin. 1998. *Construction de la matrice de comptabilité sociale du Québec pour 1992: aspects technique*. Montréal : INRS-Urbanisation, et Sainte-Foy : CRAD, Université Laval.
- Robillard, A.-S. et S. Robinson. 1999. « Reconciling Household Surveys and National Accounts Data Using a Cross Entropy Estimation Method ». *TMD Discussion Paper*, 50, p. 19.
- Robinson, S., A. Cattaneo et M. El-Said. 1998. « Estimating a Social Accounting Matrix Using Cross Entropy Methods ». *TMD Discussion Paper*, 33, p. 32.
- _____. 2000. « Updating and Estimating a Social Accounting Matrix Using Cross Entropy Methods », *TMD Discussion Paper*, 58.
- Round, J.I. 1983. « Nonsurvey Techniques Review of the theory and the Evidence ». *International Regional Science Review*, 8: 189-212.
- _____. 2003. « Constructing SAMs for Development Policy Analysis. Lessons Learned and Challenges Ahead ». *Economic Systems Research*, 15:161-183.
- Schaffer, W. 1999. *Regional Impact Models*. Regional Research Institute, West Virginia University: <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Schaffer/regionalGT.pdf>.
- Schneider, M.H. et S.A. Zenios. 1990. « A Comparative Study of Algorithms for Matrix Balancing ». *Operations Research*, 38: 439-455.
- Statistique Canada. 1996. *La structure par entrées-sorties de l'économie canadienne 1992*. 15-201-XPB. Ottawa: Statistics Canada.
- Stone, R. 1977. « 'Forward' to G Pyatt and A Roe et al ». *Social Accounting for Development Planning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stone, R., D. Champernowne et J.E. Meade. 1942. « The Precision of National Income Estimates ». *Review of Economic Studies*, 9: 111-125.
- Theil, H. 1967. *Economics and Information Theory*. Chicago: Rand McNally & Company, Studies in Mathematical and Managerial Economics.
- Ullman, E.L., et M.F. Dacey. 1960. « The Minimum Requirements Approach to the Urban Economic Base ». *Regional Science Association Papers*, 6: 175-194.