



HAL
open science

**Kansky, 1963, Structure of Transportation Networks.
Version française commentée**

Karel J. Kansky, Laurent Beauguitte

► **To cite this version:**

Karel J. Kansky, Laurent Beauguitte. Kansky, 1963, Structure of Transportation Networks. Version française commentée. 2023. hal-04001189

HAL Id: hal-04001189

<https://hal.science/hal-04001189v1>

Submitted on 22 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Karel J. Kansky, 1963, Structure of
Transportation Networks
Version française commentée

groupe f.m.r.



Février 2023

La version originale de la thèse de Karel J. Kansky, première thèse de géographie mobilisant la théorie des graphes (1963), peut être consultée en ligne sur archive.org.

Les figures sont celles du tapuscrit original. Les notes de bas de page en noir sont de l'auteur ; les notes en bleu sont du traducteur.

La dactylographie originale a été respectée à quelques exceptions près : les termes soulignés dans le texte de 1963 sont ici en italiques ; les guillemets ouvrants et fermants français remplacent les " du texte original. Par ailleurs, tous les symboles mathématiques présents dans le texte ont été mis en italiques.

La forme parfois répétitive du texte original a été conservée autant que possible tout comme le caractère parfois alambiqué de certaines définitions. J'espère ne pas avoir laissé trop de coquilles dans cette traduction et avoir évité autant de contre-sens que possible.

Référence : Kansky, Karel J., 1963, *Structure of Transportation Networks. Relationships between Network Geometry and Regional Characteristics*, University of Chicago, Department of Geography, Research Paper n° 84.

Traduction : Laurent Beauguitte, CNRS - UMR Géographie-cités

Y 1017/84

**STRUCTURE
OF
TRANSPORTATION
NETWORKS**

K. J. KANSKY

Y 1017/84

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

STRUCTURE
OF TRANSPORTATION NETWORKS:
RELATIONSHIPS
BETWEEN NETWORK GEOMETRY
AND REGIONAL CHARACTERISTICS

*A dissertation submitted to the faculty
of the Division of the Social Sciences in candidacy
for the degree of Doctor of Philosophy*

DEPARTMENT OF GEOGRAPHY
RESEARCH PAPER NO. 84

By
K. J. KANSKY



CHICAGO • ILLINOIS

1963



028 220150 4

Y 1017/84

This research supported in part by the Headquarters,
U.S. Army Transportation Research and Engineering
Command. Reproduction, translation, publication, use
and disposal in whole or in part by or for the U.S.
Government is permitted.

COPYRIGHT 1963 BY K. J. KANSKY. ALL RIGHTS RESERVED,
EXCEPT AS NOTED. PUBLISHED 1963 BY THE DEPARTMENT
OF GEOGRAPHY, THE UNIVERSITY OF CHICAGO.
PRINTED BY THE UNIVERSITY OF CHICAGO
PRESS, CHICAGO 37, ILLINOIS, U.S.A.

Library of Congress Catalog Card Number: 63-17918

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier de l'*U.S. Army Transportation Research Command*, Fort Eustis, Virginie. Elle s'inscrit dans le cadre du projet d'étude sur la géographie des transports du *Transportation Center* de la *Northwestern University*, recherche coordonnée par le professeur W. L. Garrison. Ses précieuses suggestions dans les premiers stades de la recherche et ses critiques constructives ont été cruciales pour la réalisation de l'étude.

L'auteur est extrêmement reconnaissant envers de nombreuses personnes qui l'ont encouragé et aidé à développer cette étude. Toutes ne peuvent être citées ici. Je suis particulièrement redevable à mon directeur de thèse, le professeur Brian J. L. Berry¹, pour ses conseils attentifs, ses nombreuses suggestions et ses critiques constructives. Je le remercie sincèrement pour le soin énergique avec lequel il a examiné le manuscrit et pour avoir amélioré et clarifié l'exposé. Je souhaite également exprimer mes remerciements au professeur H. M. Mayer² pour avoir relu le manuscrit. Il convient de remercier le département de géographie de l'Université de Chicago pour l'inspiration intellectuelle et l'atmosphère savante qu'il a fournies. Enfin, je remercie les étudiants du département de géographie pour leur chaleureuse amitié.

1. Brian Berry soutient sa thèse, dirigée par William Garrison et intitulée *Shopping Centers and the Geography of Urban Areas : A Theoretical and Empirical Study of the Spatial Structure of Intraurban Retail and Service Business*, à l'université de Washington en 1958.

2. Harold M. Mayer est un géographe américain spécialiste de géographie urbaine. Au moment où Kansky rédige sa thèse, l'ouvrage coordonné par Harold M. Mayer et Clyde F. Kohn, 1959, *Readings in Urban Geography*, The University of Chicago Press est l'un des ouvrages de référence; il comprend notamment des contributions de Jean Gottmann, Walter Isard, Edward Ullman, Brian Berry et William Garrison. L'ouvrage est accessible sur archive.org.

Table des matières

I	Introduction	1
II	Mesures de la structure du réseau	5
	Mesures d'ensemble des réseaux de transport : mesures sans dénominateur	10
	Nombre cyclomatique	10
	Diamètre	11
	Mesures d'ensemble des réseaux de transport : quotients	13
	Alpha	14
	Bêta	15
	Gamma	16
	Êta	20
	Pi	22
	Thêta	24
	Iota	24
	Mesures des éléments individuels des réseaux de transport	28
	Nombre associé	28
	Degré de connectivité	29
	Dispersion	30
	Accessibilité	30
	Circuité	30
	Évaluation des indicateurs	31
	Preuve logique	33
	Preuve empirique	35
III	Analyse empirique : phase exploratoire	36
	Validité des indicateurs proposés	36
	Régressions multiples : phase exploratoire	42
	Variables indépendantes	43
	Données	46
	Résultats	47
	Interprétation	49

IV Variations entre pays : « phase explicative »	52
Complémentarité des indicateurs	52
Données	53
Résultats	54
Interprétation	58
Facteurs exogènes	60
Données	62
Résultats	63
Interprétation	63
Additivité des réseaux de transport	67
Données	71
Résultats	72
Interprétation	75
V Relations transversales pour des unités spatiales plus petites	76
États	78
États - analyses répétées	81
Comtés	83
Régression répétée des comtés	85
VI Variations temporelles	86
VII Examen des résultats et déductions	97
Résumé des résultats empiriques	97
Signification concrète des résultats	104
Spécification et inférence de la relation fonctionnelle	104
Inférence des résultats obtenus	109
VIII Prédire la structure des réseaux de transport	111
Système axiomatique	112
Modèle prédictif	116
Application du modèle prédictif	119
IX Conclusion	134
Annexe	136
Bibliographie	138

Liste des tableaux

1	Pays sélectionnés	42
2	Indices η et ι des pays sélectionnés	44
3	Données	46
4	Coefficients de régression	47
5	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	48
6	Erreur type des estimations	48
7	Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)	49
8	Variables dépendantes	54
9	Variables indépendantes	56
10	Coefficients de régression	57
11	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	57
12	Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)	58
13	Erreur type des estimations	58
14	Matrice de corrélation	60
15	Coefficients de régression	64
16	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	65
17	Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)	66
18	Erreur type des estimations	67
19	Coefficients de régression	72
20	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	73
21	Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)	74
22	Erreur type des estimations	74
23	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	80
24	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	80
25	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	82
26	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	84
27	Évaluation de l'hypothèse des facteurs exogènes	84

28	Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)	85
29	Résultats des mesures structurelles	91
30	Importations par habitant ^a	92
31	Matrices des relations - Pays	101
32	Matrices des relations - États	101
33	Matrice des relations - Comtés	101
34	Matrice de la relation ρ	102
35	Interprétation des coefficients de détermination (R^2) - Pays .	103
36	Interprétation des coefficients de détermination (R^2) - États .	103
37	Interprétation des coefficients de détermination (R^2) - Comtés	104
38	Principales villes siliciennes - Revenus en 1908	124

Liste des illustrations

1	Le réseau ferré de la Sardaigne	9
2	Simplification graphique du réseau ferré de la Sardaigne	9
3	Application du nombre cyclomatique	12
4	Application du diamètre	13
5	Application d'alpha	15
6	Application de bêta	17
7	Fondements théoriques de bêta	17
8	Application de gamma	19
9	Application d'êta	21
10	Application de pi	23
11	Forme des réseaux de transport	23
12	Application de thêta	25
13	Fonctions théoriques des sommets des réseaux	27
14	Comparaison des indices thêta et iota	27
15	Application du nombre associé	28
16	Application du degré de circuité	32
17	Analyses de corrélation simples - Représentation graphique	41
18	Comparaison des graphes étroits et circulaires	43
19	L'indice de relief	45
20	Écart entre les observations et les estimations sous forme de rapport entre les résidus et l'erreur type ajustée	50
21	Indices ajustés	62
22	Niveaux de recherche : l'exemple de la densité de population	77
23	Composition interne de la relation entre structure du réseau et caractéristiques régionales	87
24	Examen exploratoire des variations temporelles	89
25	Comparaison des séries spatiales et temporelles - indice β	95
26	Comparaison des séries spatiales et temporelles - indices ι et η	96
27	Sicile-1908. Sommets du réseau ferré sélectionnés	126

28	Sicile-1908. Réseau ferré simulé. Première phase	127
29	Sicile-1908. Réseau ferré simulé. Deuxième phase	128
30	Sicile-1908. Le réseau ferré « rétrospectif »	129
31	Sicile-1908. Le réseau ferré existant	132

Chapitre I

Introduction

Ceci est une étude des réseaux de transport. L'accent est mis sur le fait que la structure du réseau de transport d'une région ne peut être dissociée des caractéristiques géographiques de cette région. Des concepts structurels abstraits dérivés de la théorie des graphes et des méthodes statistiques de comparaison des distributions sont utilisés dans l'étude pour clarifier des notions intuitives relatives aux réseaux de transport, pour analyser les relations hypothétiques entre ces réseaux et le degré de développement économique et pour faciliter la formulation d'un système axiomatique de la structure des réseaux. Les déductions du système axiomatique conduisent à la conception d'un modèle prédictif de l'évolution de la structure des réseaux, modèle pertinent en termes d'applicabilité générale et d'identifiabilité des résultats².

Le terme *réseau de transport* désigne un ensemble de lieux géographiques interconnectés dans un système par un certain nombre de routes. Cela suggère trois éléments de base fondamentaux : les origines, les routes et les destinations. Chaque élément occupe une position géographique unique³. Les éléments essentiels des réseaux de transport sont donc des éléments artificiels localisés à la surface de la terre selon des motifs géométriques. En accord avec la recherche géographique traditionnelle, nous portons notre attention dans cette étude sur cet ensemble d'éléments artificiels. Mesurer les schémas de localisation permet une étude géographique « précise » de la structure spatiale et de l'intensité de la relation entre cette structure et les caractéristiques régionales. Le schéma de localisation formé par les éléments de base est, par définition, la structure spatiale d'un système de transport. De manière plus générale, le terme structure renvoie à un ensemble de rela-

2. Un modèle statistique est dit identifiable s'il est possible d'apprendre la vraie valeur des paramètres à partir d'un nombre infini d'observations (source : wikipédia).

3. Même si les points d'origine et de destination se chevauchent, les positions géographiques de ces deux points sont différentes car il faut du temps pour atteindre le point de destination et donc, du point de vue spatio-temporel, les deux positions sont différentes.

tions entre les éléments de base, tant les uns par rapport aux autres que par rapport au réseau de transport dans son ensemble structuré.

Si l'on examine la grande variété de réseaux de transport existant dans le monde, on se rend compte que les éléments de base sont tantôt des « objets » artificiels, par exemple des routes, tantôt des éléments « imaginaires », par exemple des voies aériennes. Dans cette étude, nous nous concentrons sur les réseaux de transport constitués d'« objets » artificiels. Cependant, la méthodologie et la théorie axiomatique devraient pouvoir s'appliquer aux réseaux aériens et aux réseaux « imaginaires » équivalents¹.

Afin de présenter précisément nos idées et de parvenir à une analyse exacte des réseaux de transport, le langage écrit est complété par le langage symbolique. Le langage symbolique est de deux formes : (1) une forme mathématique, grâce à laquelle nous exprimons des descriptions et des mesures abstraites et numériques, à l'aide de concepts statistiques plus ou moins complexes, d'expressions algébriques et d'idées dérivées de la théorie des graphes, et (2) une forme logique² qui exprime clairement des idées apparemment compliquées et des preuves logiques, ainsi que les relations logiques contenues dans le système axiomatique.

Le langage symbolique utilisé dans cette étude devrait permettre de réduire les ambiguïtés si courantes dans le langage écrit ordinaire. Il serait totalement inefficace d'utiliser ce langage ordinaire pour présenter des concepts complexes et multidimensionnels. De même, il serait probablement impossible de mesurer la structure des réseaux de transport sans utiliser des symboles issus de la théorie des graphes et de la géométrie. On ne pourrait pas comprendre clairement la complexité des relations fonctionnelles entre un certain nombre de variables interdépendantes sans l'utilisation de modèles (équations) constitués de symboles algébriques. Le langage symbolique n'est bien sûr pas une nouveauté pour les géographes. Ils utilisent un langage symbolique, le langage cartographique, depuis des siècles. Les cartes, construites comme des ensembles d'énoncés écrits à l'aide de symboles, sont probablement les plus anciens modèles « exacts »³ des entités physiques situées sur la Terre. Pour cette raison, les géographes familiers de l'interprétation des

1. [Kansky a testé plusieurs de ses indicateurs sur des réseaux aériens sud-américains dans le rapport de Garrison et Marble \(1962\) citée au chapitre II.](#)

2. Par *langage logique*, nous entendons le langage symbolique utilisé dans la discipline appelée logique symbolique (ou mathématique). Cependant, nous utilisons certains symboles qui ne sont pas habituels dans le langage symbolique afin d'exprimer des idées spécifiques au sujet traité. Pour des exemples du langage utilisé en logique symbolique, voir les manuels suivants : Willard Van Orman Quine, *Methods of Logic* (éd. révisée; New York : Holt, Rinehart and Winston, 1961), p. 267 et Susanne K. Langer, *An Introduction to Symbolic Logic* (2^e éd. ; New York : Dover Publications, Inc., 1953), p. 367.

3. Par *modèles exacts*, nous entendons les constructions conceptuelles symboliques ou physiques basées sur des relevés et contenant des affirmations ou des mesures aussi précises et non ambiguës que possible.

cartes et de la traduction du langage symbolique cartographique en langage ordinaire ne devraient avoir aucune difficulté à reconnaître la nécessité et le rôle du langage symbolique utilisé ici.

Les idées sont exposées en langage symbolique sous forme de phrases au contenu très dense. Certains lecteurs peuvent trouver ces phrases inhabituelles et déroutantes, c'est pourquoi certains énoncés symboliques sont également formulés en langage écrit ordinaire. En lisant deux fois les mêmes énoncés sous deux formes différentes, il devrait être possible au lecteur non spécialiste de maîtriser assez rapidement le langage symbolique utilisé dans ce texte.

Certaines parties du texte sont écrites dans un langage très dense, avec des expressions et un vocabulaire très « techniques ». Le lecteur est invité à lire ces parties lentement. Une lecture répétée devrait permettre de comprendre ce qui semble être à première vue des déclarations incompréhensibles. En raison de ce langage, ce texte diffère sans aucun doute des publications géographiques habituelles. Étant différent, il doit probablement être lu d'une manière différente ; certains chapitres exigent une attention soutenue plutôt qu'une lecture rapide.

Les comparaisons rigoureuses entre des ensembles d'observations empiriques exigent une mesure quantitative des objets étudiés. Le chapitre [II](#) contient une description de concepts abstraits dérivés de la théorie des graphes et leur application sous la forme de mesures de la structure des réseaux de transport. La validité des indicateurs proposés est évaluée dans les analyses exploratoires du chapitre [III](#). Le chapitre [IV](#) est empirique et examine les relations statistiques entre structure des réseaux de transport et diverses caractéristiques, économiques et autres, des pays. Les résultats des analyses de régression « explicatives » présentés dans ce chapitre facilitent la différenciation des relations entre différents types de réseaux de transport et caractéristiques régionales. Ils autorisent la formulation d'une relation directe entre la structure des réseaux de transport et le caractère des économies dans leur ensemble. Dans le chapitre [V](#), des zones d'étude plus petites, régions et comtés, sont étudiées. Dans le chapitre [VI](#), les covariations temporelles des structures de réseau et des économies sont évaluées afin de vérifier si les relations formulées ont une validité spatiale et temporelle. Le chapitre [VII](#) résume les résultats des chapitres précédents. L'interprétation de ces résultats facilite la construction d'une théorie axiomatique de la structure des réseaux, théorie présentée au chapitre [VIII](#), ainsi que le modèle prédictif qui en résulte. Ce modèle, qui contient un concept probabiliste incorporé en tant que mécanisme aléatoire, permet de prédire l'éventail des formes possibles de réseaux de transport à partir des données pertinentes, économiques ou non, caractérisant toute région. Ce dernier chapitre examine enfin l'applicabilité du modèle prédictif à une zone donnée. Le degré de fiabilité du modèle

et sa structure logique sont considérés par l'auteur comme l'apport final de l'étude.

Chapitre II

Mesures de la structure du réseau

Le terme structure² désigne la disposition, la géométrie ou le motif du réseau des installations ou des systèmes de transport³. Ces expressions, qui peuvent être considérées comme synonymes, impliquent un ensemble de relations spatiales entre des éléments distincts des réseaux de transport, les uns par rapport aux autres et par rapport à l'ensemble. En mesurant ces relations, nous pouvons quantifier la notion de structure, c'est-à-dire décrire la structure des réseaux de transport en termes mathématiques. De nombreuses contributions récentes à l'étude des systèmes de transport sont basées sur des définitions et des descriptions exprimées sous une forme mathématique qui présuppose des mesures. De la même manière, cette étude est basée sur des mesures structurelles quantitatives⁴.

2. Ce chapitre, présenté par Pascale Dancoisne - et non Pascal comme indiqué sur Persée -, a été publié dans la revue *Flux* en 1989. L'article est disponible sur [Persée](#).

3. W. L. Garrison et D. F. Marble, *The Structure of Transportation Networks* (Rapport non publié pour le *U.S. Army Transportation Research Command*, par le *Transportation Center et Northwestern University*, 1961), p. 140. Ce rapport est désormais [accessible en ligne](#). Kansky est cité dans les remerciements : « Mr Karel Kansky has done extensive work with two of the indices [indice α et indice γ , voir *infra*] that are used in Chapter 3 of this report and with related work to be reported in a later monograph » (Garrison et Marble, 1962, p. ix. La monographie à venir est bien évidemment cette thèse.

4. Il n'y a pas de distinction claire dans la littérature sur les « théories de la mesure » entre les termes « *measure* » et « *measurement* ». Certains auteurs utilisent ces termes de manière interchangeable, d'autres comprennent sous le terme de mesure l'opération de transformation des observations en nombres. Afin d'éviter d'éventuelles ambiguïtés, nous adoptons les définitions intuitives suivantes : *measurement* est l'opération qui consiste à transformer des observations empiriques en résultats numériques à l'aide de mesures ; une mesure (ou indicateur) est une règle mathématiquement écrite de transformation d'observations empiriques en résultats numériques ; les *résultats numériques* (ou valeurs numériques ou valeurs résultantes) sont issus de mesures écrites symboliquement, de sorte que les résultats numériques sont toujours équivalents aux résultats obtenus par des opé-

Les similitudes fonctionnelles entre définitions et mesures ont été amplement commentées. Les unes doivent impliquer les autres. Les définitions et les mesures visent toutes deux à donner un ordre systématique aux relations étudiées. Les *définitions* sont des propositions comprenant des symboles verbaux ordonnés exprimant des relations entre des propriétés données. Les mesures sont des ensembles de symboles numériques ordonnés exprimant des relations entre des propriétés données. L'avantage évident des mesures est que les éléments d'un ensemble ordonné exprimés numériquement peuvent être mis en relation avec une classe finie ordonnée de nombres réels. Cette relation facilite la comparaison précise entre un ensemble de mesures relatives à un domaine et un ensemble de mesures relatives à un autre domaine. La classe finie de nombres réels assure la fonction de « dénominateur commun ». En transformant nos observations de deux domaines donnés en une classe de nombres réels, nous pouvons les comparer de manière pertinente.

Le processus de comparaison de deux ensembles de données implique un processus parallèle d'agrégation des données. L'agrégation est d'une réelle importance pour les études géographiques précises car (a) la signification théorique des mesures ne peut être déduite que des données agrégées et (b) l'expression des observations sous une forme agrégée facilite la détection des erreurs de mesure.

Les études géographiques actuelles révèlent une préférence pour les définitions par rapport aux mesures. Les conclusions et les généralisations de ces textes sont souvent basées sur des définitions assez vagues. De nombreux géographes étudient les relations entre des entités mal définies ou classées de manière superficielle, sans penser à la mesure¹. Collecter les données significatives du monde qui nous entoure est difficile, les techniques de mesure étant invariablement compliquées et/ou coûteuses. Pour ces raisons et d'autres encore, il est compréhensible que les définitions aient été privilégiées dans la recherche géographique.

Certaines recherches géographiques peuvent être efficacement basées sur des définitions sans mesure, d'autres nécessitent des mesures précises. Cette étude illustre ce dernier cas. Une étude des relations entre la structure des réseaux de transport et les caractéristiques régionales exige des mesures précises. Il est nécessaire de faire des distinctions fines entre les différents réseaux. Il est également nécessaire de comparer les données relatives à deux

rations de mesure répétées. La distinction *measure - measurement* proposée par Kansky est difficilement traduisible; *measure* a été le plus souvent traduit par indicateur et *measurement* par mesure. *Index* est traduit par indice (notamment quand il est suivi d'une lettre grecque) ou par indicateur.

1. Pourtant, comme l'a noté Alfred N. Whitehead dans son ouvrage intitulé *Science and the Modern World* (New York : Macmillan, 1925), p. 30 : La classification est une sorte « d'étape intermédiaire » sur la voie de la « mesure ». L'ouvrage a été traduit en français en 2006 par Henri Vaillant aux éditions Ontos Verlag.

ensembles de phénomènes, données collectées dans des circonstances différentes. Il est donc naturel que nous tirions parti des concepts mathématiques abstraits disponibles dans la théorie des graphes. La théorie des graphes, en tant que branche de la topologie combinatoire, nous fournit un langage approprié pour la mesure et l'analyse de la structure des réseaux de transport.

Dès l'Antiquité, les géographes étaient conscients de la nécessité d'une représentation cartographique. Les cartes, qui représentent les résultats de relevés de terrain sous forme visuelle, constituent des modèles simples d'un monde « réel » et peuvent être utilisées efficacement pour la description et les analyses géographiques. Grâce aux cartes, la description géographique de régions complexes devient beaucoup plus facile. Les relations spatiales et les associations surfaciques deviennent souvent plus évidentes en étudiant les cartes.

De façon similaire, les graphes, ensembles de points et de lignes systématiquement organisés, sont des représentations visuelles de concepts et de relations abstraites. Des termes apparemment abstraits comme celui de « structure » acquièrent une signification visuelle et spatiale en appliquant la terminologie de base de la théorie des graphes. La structure des réseaux de transport peut être étudiée dans des graphes à deux ou trois dimensions en utilisant les théorèmes de la théorie des graphes. De même, les concepts fondamentaux de la théorie des graphes facilitent l'identification des relations entre des éléments apparemment non corrélés des réseaux de transport.

Considérons le réseau ferré d'une région (par exemple la Sardaigne dans la figure 1[A]) comme un ensemble de points et de lignes tel que chaque point représente une origine, une intersection, un terminal ou une gare importante¹ situé sur la voie ferrée et tel que chaque ligne corresponde à une voie ferrée (figure 1[B]). L'ensemble des points et des lignes, i.e. le graphe, est une représentation visuelle simplifiée du réseau ferré. Si l'on ne tient pas compte des distances entre les sommets du réseau, le graphe peut être dessiné sous une forme plus abstraite (figure 2[A]). Les points et les lignes peuvent se voir attribuer des valeurs numériques individuelles (scores) représentatives de phénomènes qui présentent un intérêt dans une étude particulière (par exemple, dans la figure 2[B], les scores attachés à chaque voie expriment la longueur en kilomètres). Ces simplifications graphiques (figures 1[B] et 2) du réseau réel peuvent être analysées à l'aide des concepts et théorèmes de la théorie des graphes qui suggèrent de potentielles mesures structurelles des réseaux de transport².

1. Si Kansky note à plusieurs reprises que le nombre de sommets du réseau impacte certains indicateurs, il n'aborde pas dans son texte les enjeux liés à la définition des sommets (quelles intersections? quelles gares? selon quels critères?), excepté dans cette liste.

2. L'auteur prend ici des précautions qu'on peut juger superflues : Claude Berge intitulé

De nombreux géographes et des spécialistes d'autres sciences sociales ont étudié les relations spatiales entre les caractéristiques élémentaires des systèmes de transport présentés dans les figures 1-2. Lalanne¹ a analysé la densité et la configuration du réseau ferré de la France continentale. Il a observé des pavages réguliers et suggéré une relation hiérarchique entre le réseau et les divisions administratives françaises. La théorie des lieux centraux de Christaller² affirme l'existence de liens entre les modèles de transport et les localisations urbaines. Des arguments similaires sont présents dans les travaux de Lösch³. Des études plus récentes ont également considéré la configuration spatiale des systèmes de transport en utilisant la théorie des graphes. Garrison et Marble ont proposé une série de mesures basées sur ses concepts⁴. Nystuen et Dacey⁵ ont analysé les connexions fonctionnelles entre les lieux centraux sur la base des flux de communication dans un réseau à l'aide des concepts de la théorie des graphes. Garrison⁶ et Burton⁷ ont appliqué certaines mesures de la théorie des graphes aux réseaux routiers régionaux. Ces études confirment l'applicabilité de l'approche analytique et du langage de la théorie des graphes à l'analyse des réseaux de transport.

le chapitre 8 de son manuel *Théorie des graphes et ses applications* (paru en France en 1958, traduit en anglais en 1962) « Réseaux de transport ».

1. Léon Lalanne, « An Essay on the Theory of Railway Systems, Based on Observation of Facts and the Basic Laws Governing Population Distribution ». in *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, LVII (1863), 206-210. [Le titre original de l'essai est « Essai d'une théorie des réseaux de chemin de fer, fondée sur l'observation des faits et sur les lois primordiales qui président au groupement des populations »](#). Elle a été reproduite dans le Cahier numéro 5 du Groupe Réseaux en 1986 ; des extraits ont ensuite été publiés dans la revue *Flux* en 1989 avec une présentation de Georges Ribeill sous le titre « Théorie des réseaux de chemin de fer ». Cette étude est déjà citée dans le rapport de Garrison et Marble (1962) ; je ne sais pas (encore) comment les auteurs ont eu connaissance de ce texte.

2. Walter Christaller, *Die zentralen Orte in Süddeutschland* (Jena : G. Fischer, 1933).

3. August Lösch, *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft* (Jena : G. Fischer, 1940).

4. Garrison et Marble, *op. cit.*

5. John D. Nystuen et Michael F. Dacey, « A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions », *Papers and Proceedings*, Regional Science Association, vol. VII (1961). Il s'agit du premier article de géographie utilisant l'expression « graph theory » dans le titre ; une version bilingue et commentée est disponible dans la [collection textes du groupe fmr](#).

6. W. L. Garrison, « Connectivity of the Interstate Highway System », *Papers and Proceedings*, Regional Science Association, VI (1960), 122-137. [À ma connaissance, il s'agit du premier article de géographie affirmant être basé sur la théorie des graphes. Une version bilingue et commentée de cet article est disponible dans la collection textes du groupe fmr.](#) Garrison est aussi le directeur de thèse de Brian Berry, Michael Dacey, Duane Marble, John Nystuen, etc. Son rôle dans l'importation de la théorie des graphes en géographie ne peut être sur-estimé.

7. Ian Burton, « Accessibility in Northern Ontario : An Application of Graph Theory to Regional Highway Network » (rapport non publié pour le Ontario Department of Highways). [Ce rapport non publié est régulièrement cité dans les années 1960 par les géographes anglophones mobilisant la théorie des graphes. Une version courte du rapport a été proposée par Ian Burton en 1963 à la revue *Economic Geography* qui a refusé l'article \(source : échanges avec l'auteur\).](#)

FIGURE 1 – Le réseau ferré de la Sardaigne

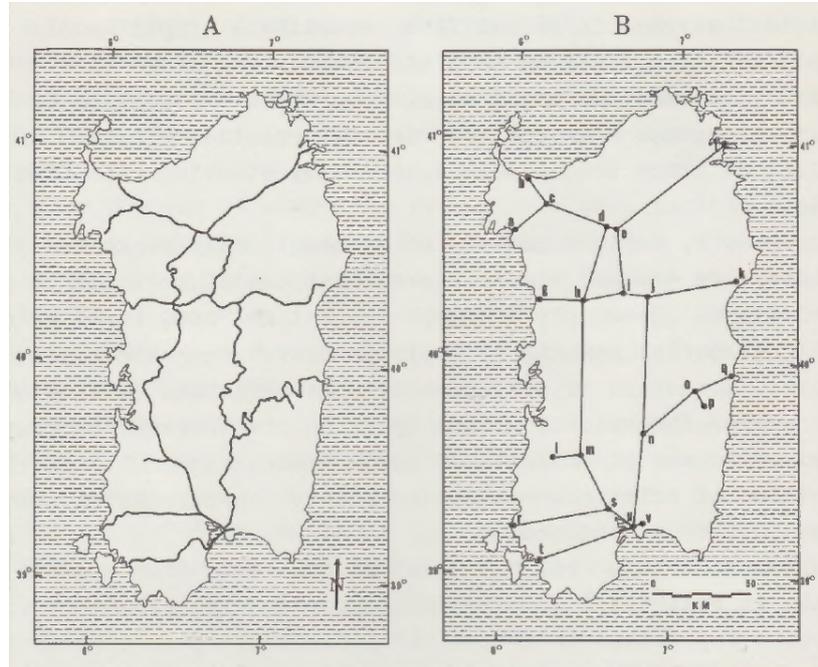
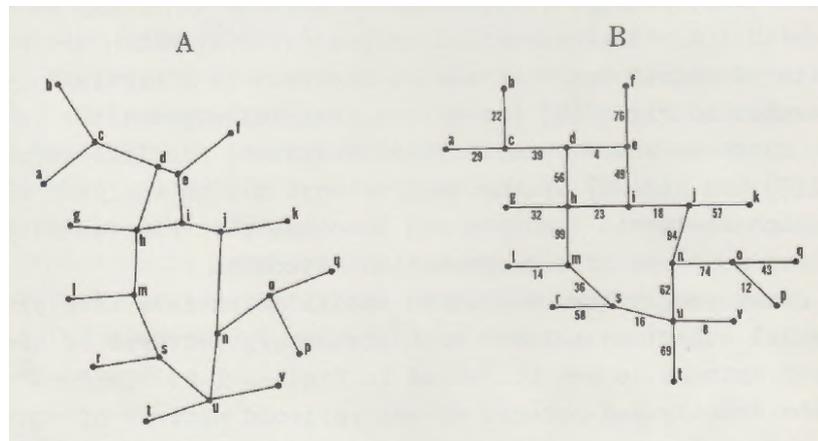


FIGURE 2 – Simplification graphique du réseau ferré de la Sardaigne



Le passage de la représentation cartographique à une représentation strictement topologique est une innovation de Kansky : Garrison (1960) ou Nystuen et Dacey (1961) avaient dans leurs articles conservé la représentation cartographique, sans doute nécessaire pour être publié. Dans le rapport confidentiel de 1962 signé Garrison et Marble, seules des représentations cartographiques sont utilisées.

Les indicateurs issus de la théorie des graphes et ceux construits par l'auteur pour faciliter cette étude ont été élaborés en respectant plusieurs règles de la théorie de la mesure. Les indicateurs ont été conçus de telle sorte que : (a) ils expriment une relation entre les nombres et les objets ou propriétés auxquels ils sont attribués ; (b) ils établissent une hiérarchie entre différents réseaux de transport et entre des propriétés particulières de ces réseaux ; (c) les mêmes valeurs individuelles expriment le même état de différents systèmes de transport.

Les mesures de la structure des réseaux sont des mesures relatives¹. Tous les indicateurs utilisés dans ce texte sont soit directement dérivés de la théorie des graphes, soit déduits par l'auteur à partir de concepts de la théorie des graphes. Deux types d'indicateurs seront utilisés : (1) les indicateurs caractérisant les réseaux de transport dans leur ensemble et (2) les indicateurs caractérisant les éléments individuels des réseaux de transport.

Mesures d'ensemble des réseaux de transport : mesures sans dénominateur

Les mesures décrivant les réseaux de transport dans leur ensemble sont construites principalement sous forme de rapports entre le système entier et ses éléments individuels. Seules deux mesures, issues directement de la théorie des graphes (le nombre cyclomatique $[\mu]$ et le diamètre $[\delta]$ ²), ne sont pas des fractions. Le nombre cyclomatique (μ) est une comparaison arithmétique entre les éléments individuels du système et le diamètre (δ) est une forme particulière du « nombre associé »³.

Nombre cyclomatique

Le nombre cyclomatique (ou premier nombre de Betti) est l'un des indicateurs fondamentaux de la théorie des graphes⁴. On peut l'écrire

$$\mu = e - v + p \tag{2.1}$$

1. Il existe deux grandes catégories de mesures : (1) les mesures absolues (longueur, capacité, quantité physique, etc.), (2) les mesures relatives (rapports entre une propriété ou une quantité physique et une autre propriété ou quantité physique).

2. Le fait de prendre des lettres grecques est sans doute dû à l'influence de l'ouvrage de Seshu et Reed paru en 1961 où les auteurs utilisaient la lettre μ pour symboliser le nombre cyclomatique. Dans l'ouvrage de Berge, la lettre μ est le plus souvent utilisée pour désigner un cycle ; dans celui de König, le nombre cyclomatique est noté $p_1(G)$.

3. Voir discussion ci-dessous, page 28.

4. Claude Berge, *Théorie des graphes et ses applications*. (Paris : Dunod, 1958), pp. 27-30. Une traduction anglaise est maintenant disponible : *Theory of Graphs and its Applications*, trad. Alison Doig (Londres : Methuen et New York : Wiley, 1962).

où e est le nombre d'arêtes ou de routes¹, v le nombre de sommets ou de nœuds et p le nombre de sous-graphes non connexes² (voir figure 3). L'indicateur possède deux propriétés importantes pour les études des réseaux de transport : (1) le nombre cyclomatique $\mu(G)$ d'un graphe linéaire G est égal au nombre de cycles indépendants du graphe G et (2) dans un graphe connexe G , le nombre cyclomatique est égal au nombre maximum de circuits fondamentaux³.

Ces deux propriétés suggèrent que le nombre cyclomatique, en tant qu'indicateur de la structure des réseaux de transport, peut être corrélé avec les caractéristiques géographiques des régions étudiées. Comme le montre la figure 3, tout graphe non connexe ($p > 1$) et tout arbre a un nombre cyclomatique égal à zéro⁴. Les graphes fortement connexes ont des nombres cyclomatiques plus élevés. Une comparaison superficielle des réseaux de transport de différents pays suggère que les pays les moins développés sont desservis par des systèmes de transport qui ressemblent davantage à des graphes non connexes ou à des arbres. En revanche, les pays très développés bénéficient de réseaux de transport fortement connexes. Cette relation apparente suggère que le nombre cyclomatique est un indicateur pertinent pour caractériser la structure spatiale des réseaux de transport.

Diamètre

Le diamètre est le nombre associé maximum d'un graphe G . En d'autres termes, c'est le nombre maximum d'arêtes dans le plus court chemin entre toute paire de sommets. Par définition, dans un graphe fini G , connexe et sans boucle, le diamètre (δ) est la longueur du plus long des plus courts chemins du graphe G . Il peut être écrit

$$\delta(G) = \max_{x,y} d(x, y) \quad (2.2)$$

où d est la longueur topologique⁵. Le diamètre (δ) est donc un indicateur

1. Les termes fondamentaux tels que arête, sommet, etc. sont définis dans tout ouvrage de base concernant la théorie des graphes. Ces termes sont définis dans l'annexe IX. La terminologie anglaise est en accord avec le premier livre complet sur la théorie des graphes en langue anglaise, Sundaram Seshu et Myril B. Reed, *Linear Graphs and Electrical Networks*. (Reading, Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1961). [Cet ouvrage n'a pas été traduit en français, on peut trouver la version originale en ligne.](#)

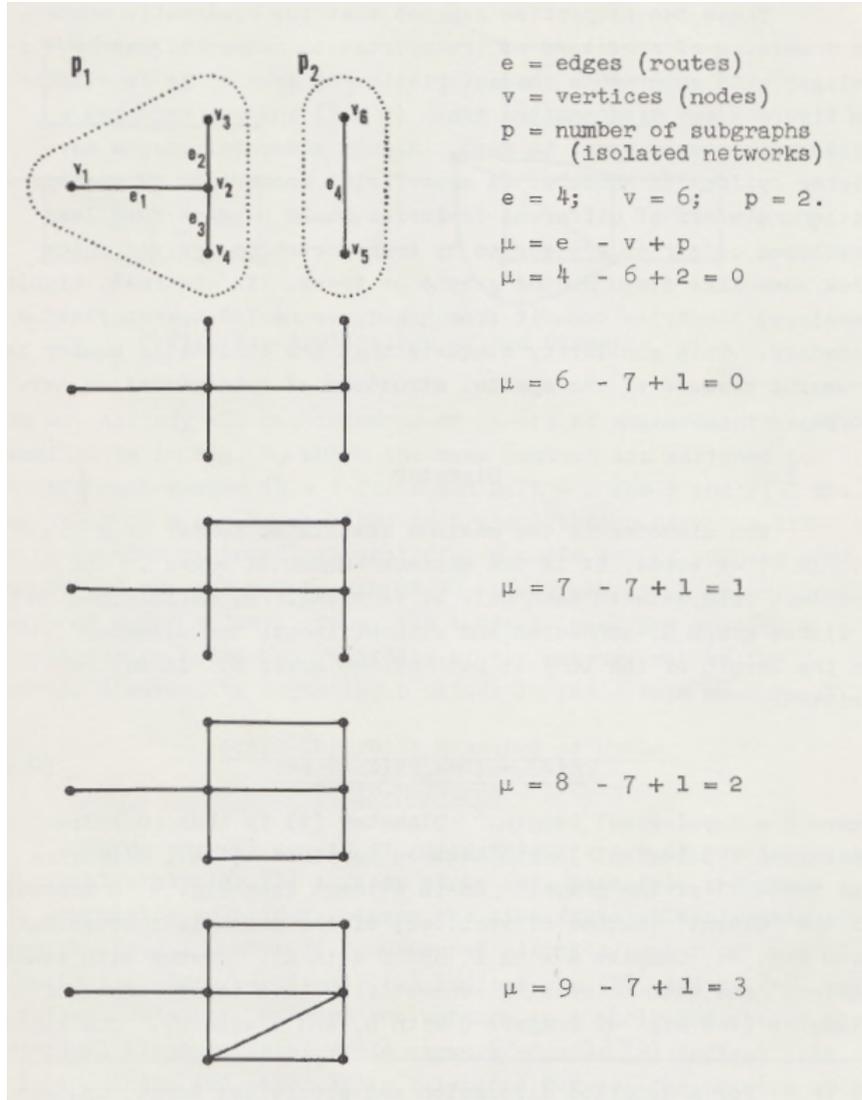
2. La formulation est ici un peu approximative (« number of non-connected sub-graphs »), les sous-graphes sont connexes mais non reliés les uns aux autres. Le terme de *components* (présent dans l'ouvrage de Berge) aurait été plus adapté.

3. Pour une discussion détaillée et les preuves, voir Berge, *op. cit.*, p. 29, théorèmes 2 et 3.

4. Cette propriété est exacte pour un arbre mais non pour tout graphe non connexe. Dans le premier exemple de la figure 3, si on ajoute un lien entre v_1 et v_3 , on obtient un graphe non connexe avec $\mu = 1$.

5. La longueur ou distance topologique est le nombre d'arêtes du chemin. On l'appelle

FIGURE 3 – Application du nombre cyclomatique

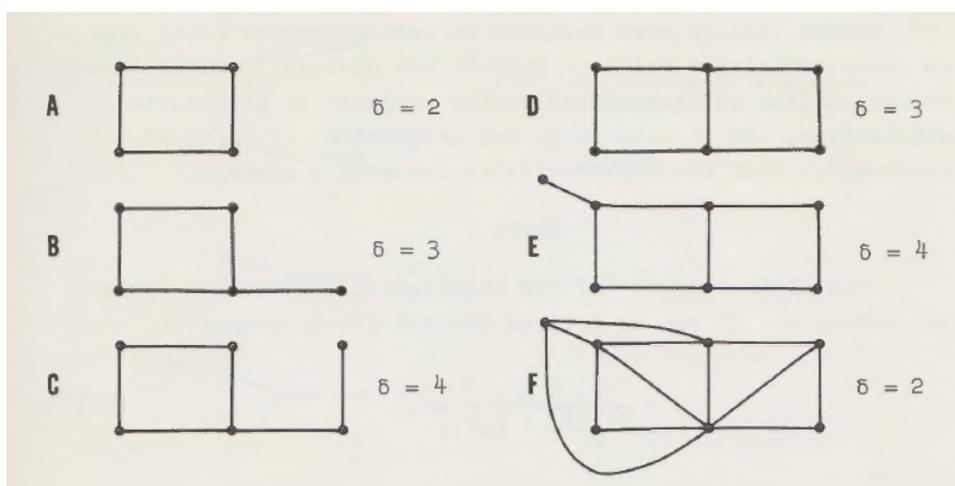


mesurant la longueur topologique entre les sommets (c'est-à-dire mesurant « l'étendue » du graphe). Comme le montre la figure 4, δ augmente si « l'étendue » (nombre de sommets) du graphe augmente (voir figure 4, comparer A avec B et D avec E). Les graphes dont « l'étendue » est égale et dont la

aussi longueur d'un parcours ou d'un chemin. Voir Giuseppe Avondo-Bodino, *Economic Applications of the Theory of Graphs* (New York : Gordon and Breach, 1962), p. 111. Ce manuel, publié en Italie en 1960 et traduit en anglais en 1962, est à ma connaissance le premier manuel mêlant sciences sociales et théorie des graphes. Le chapitre III est dédié à l'étude des réseaux de transport mais l'approche choisie repose sur les méthodes d'optimisation linéaire et non, comme chez Garrison ou Kansky, sur une approche structurale.

connectivité augmente présentent des valeurs de diamètre plus faibles (voir figure 4, comparez *C* avec *D*, *E* avec *F*). L'indicateur ne satisfait pas toutes les exigences de la théorie de la mesure comme le montre la figure 4 où les mêmes nombres sont attribués à deux graphes différents ($\delta = 3$ pour *B* et *D*; $\delta = 2$ pour *A* et *F*)¹. La même valeur de δ peut être attribuée à des réseaux de transport dont le kilométrage total est très différent (supposons par exemple que *A* sur la figure 4 a une longueur totale de 40 miles alors que *F* a une longueur totale de 1 600 miles). L'indicateur est donc peu performant pour mesurer les réseaux de transport. Sa validité peut toutefois être accrue en ajustant les valeurs de δ dans les mesures exprimées sous forme de fractions².

FIGURE 4 – Application du diamètre



Mesures d'ensemble des réseaux de transport : rapports

Trois groupes généraux de mesures de rapports³ sont utiles à l'analyse structurelle : (1) les indices alpha (α), bêta (β) et gamma (γ), exprimant les relations entre les éléments distinguables des réseaux (par exemple, nombre de circuits fondamentaux/nombre maximal de circuits et arêtes/sommets) ; (2) les indices êta (η) et pi (π) représentant les relations entre le réseau dans son ensemble et l'un de ses éléments individuels (par exemple, réseau entier/arêtes) ; (3) les indices iota (ι) et thêta (θ) exprimant les relations

1. Berge, *op. cit.*, p. 4.

2. Voir page 22 la discussion de l'indicateur π .

3. Contrairement aux mesures qui précèdent (nombre cyclomatique, diamètre), les mesures présentées dans cette partie sont des créations des géographes quantitativistes nord-américains.

entre le réseau dans son ensemble et les éléments restants (par exemple, réseau entier/sommets).

Ces indicateurs ont été conçus comme des rapports, les rapports étant des nombres caractérisant une relation entre deux objets¹. Les rapports sont appelés nombres concrets² et peuvent faire l'objet de manipulations arithmétiques. Dans cette étude, ils sont indépendants des unités de mesure. Quatre sont construits comme des nombres concrets.

Alpha

L'indicateur alpha (α)³ est une forme ajustée du nombre cyclomatique μ . Il peut être défini comme suit pour les graphes non planaires

$$\alpha = \frac{\mu}{\frac{v(v-1)}{2} - (v-1)}. \quad (2.3)$$

En remplaçant μ , nous pouvons écrire

$$\alpha = \frac{e - v + p}{\frac{v(v-1)}{2} - (v-1)} \quad (2.4)$$

où e est le nombre d'arêtes, v le nombre de sommets et p le nombre de sous-graphes isolés⁴. On peut interpréter cette formule comme un rapport entre le nombre de circuits observé μ et le nombre de circuits possibles⁵.

Grâce à cet indicateur, nous pouvons attribuer des valeurs comprises entre 0 et 1 aux réseaux présentant différents degrés de connectivité (voir figure 5). Pour un réseau complet (c'est-à-dire un réseau ayant le nombre maximal possible d'arêtes), l'indice α est égal à 1 (limite supérieure). Quand le nombre d'arêtes diminue, l'indice α s'approche de 0 (limite inférieure). Une valeur nulle est attribuée à tout réseau dont le nombre cyclomatique est

1. année/mois = 12; min./sec. = 60; il peut également s'écrire sous une forme réciproque : mois/année; sec./min.

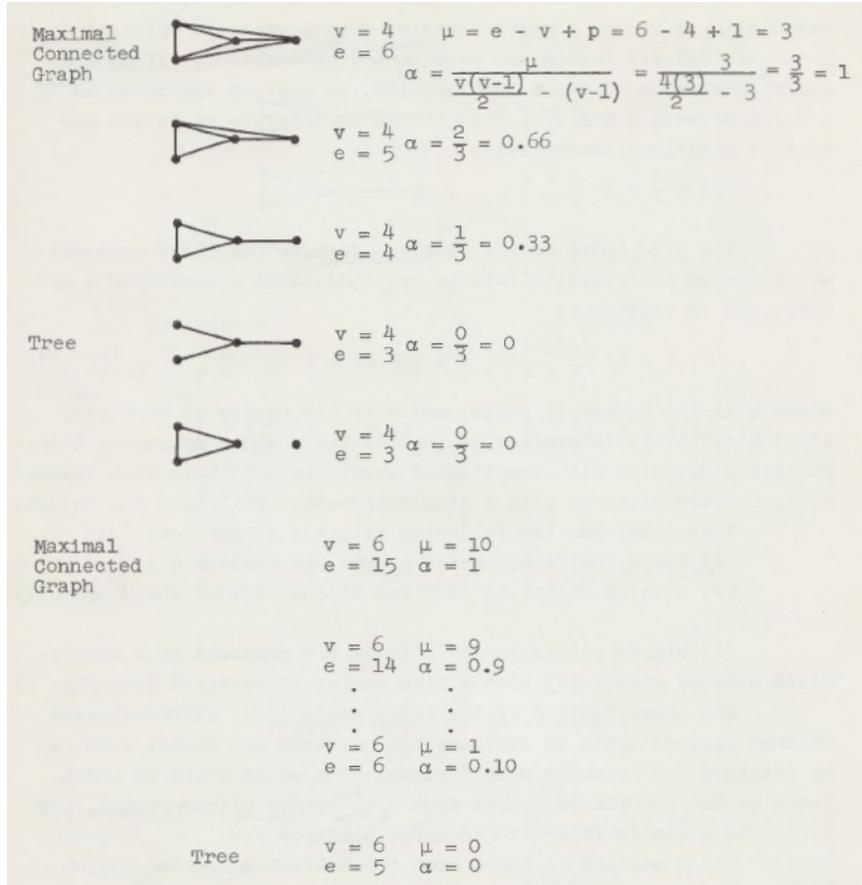
2. Par exemple 3, 1/25, etc. Les chiffres 3 miles, 1/10 kg sont appelés nombres concrets. Par définition : tout nombre suivi de la désignation d'un objet est appelé nombre concret. La distinction nombre abstrait - nombre concret semble peu utilisée aujourd'hui si l'on en croit la longueur de la page *Concrete number* du Wikipedia anglophone et le faible nombre de langues où elle existe dans l'encyclopédie (6 au total - vérification faite en février 2023).

3. Proposé par Garrison et Marble, *op.cit.*, p. 37.

4. Kansky écrit « number of isolated subgraphs ».

5. Le nombre de circuits possibles dans un graphe G est égal au nombre d'arêtes dans le graphe complet $G(\frac{v(v-1)}{2})$ moins le nombre d'arêtes dans l'arbre complet $(v-1)$ du graphe G . Kansky n'utilise pas le terme « graphe complet » (*complete graph*), terme présent dans le manuel de Berge, mais la formule *completely connected graph*; l'expression « complete tree », non définie, désigne l'arbre couvrant minimum du graphe G .

FIGURE 5 – Application d'alpha



égal à zéro (un arbre ou un graphe non connexe par exemple)¹. L'indice α est donc indépendant du nombre de sommets du réseau. En calculant α , nous pouvons comparer un réseau donné avec un réseau complètement connexe ayant le même nombre de sommets². Si nous multiplions la valeur de l'indice α par 100³, nous exprimons l'indicateur comme une valeur comprise entre 0 et 100 ; il peut alors être interprété comme un pourcentage de connectivité.

Bêta

L'indice bêta est la forme la plus simple des trois indicateurs montrant la relation entre deux éléments individuels d'un réseau et s'écrit

1. Garrison et Marble (*op. cit.*, p. 37) écrivent l'indice α sous une forme conçue pour les graphes planaires : $\alpha = \frac{\mu}{2e-5}$.

2. Cette précision semble contredire la phrase précédente.

3. Comme le recommandent Garrison et Marble, *ibid.*, p. 39.

$$\beta = \frac{e}{v} \quad (2.5)$$

où e est le nombre d'arêtes et v le nombre de sommets. Sa base logique est similaire à celle des indices μ et α ; les réseaux de transport ayant des structure compliquée auront des valeurs de β élevées alors que les réseaux à structure simple auront des valeurs faibles.

Cet indicateur présente les propriétés intéressantes suivantes :

- (a) les arbres et les graphes non connexes ont des valeurs < 1 ,
- (b) une valeur de 1 est attribuée à tout réseau qui ne possède qu'un seul circuit,
- (c) des valeurs plus élevées de l'indice β sont produites par une structure de réseau compliquée, avec un nombre élevé de sommets (voir figure 6).

La partie inférieure de l'étendue de l'indicateur (0-1) permet de différencier divers types de réseaux non connexes et d'arbres; on obtient 0 pour les réseaux sans arête. L'indice β varie, pour les graphes non planaires, de 0 à ∞ ; pour les graphes planaires, en revanche, il varie de 0 à 3 (limite supérieure).

L'indice β est basé sur la notion logique suivante. On peut imaginer un réseau de transport avec un nombre donné d'arêtes ayant différents degrés de connectivité. Soit a un réseau non connexe comprenant des arêtes complètement isolées (voir figure 7). Chaque arête a deux sommets (extrémités). Ainsi, $\beta = \frac{e}{2e}$ qui est une valeur numérique inférieure à 1; $2e$ est le nombre maximal de sommets pour un réseau donné avec e arêtes. Lorsque le réseau non connexe change de structure et que sa connectivité augmente, nous observons qu'avec un nombre constant d'arêtes, le nombre de sommets diminue (on peut visualiser cela comme un chevauchement des extrémités en intersections d'ordre supérieur). Par conséquent, l'augmentation de la connectivité du graphe sera accompagnée d'une diminution du nombre de sommets et l'indice β prendra des valeurs numériques plus élevées.

Gamma

L'indice gamma¹ (γ) est un rapport entre les arêtes et les sommets d'un réseau de transport donné. Si le réseau est considéré comme un graphe non planaire, il s'écrit

$$\gamma = \frac{e}{\frac{v(v-1)}{2}} \quad (2.6)$$

1. Proposé par Garrison et Marble, *ibid.*, p. 39.

FIGURE 6 – Application de bêta

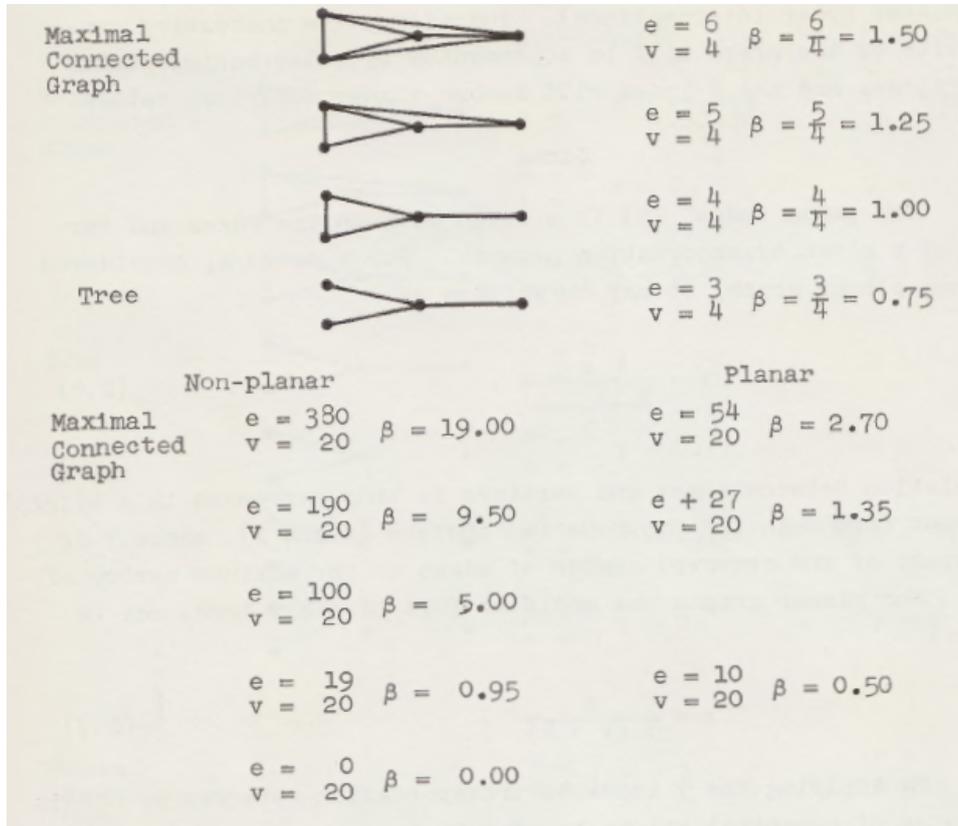
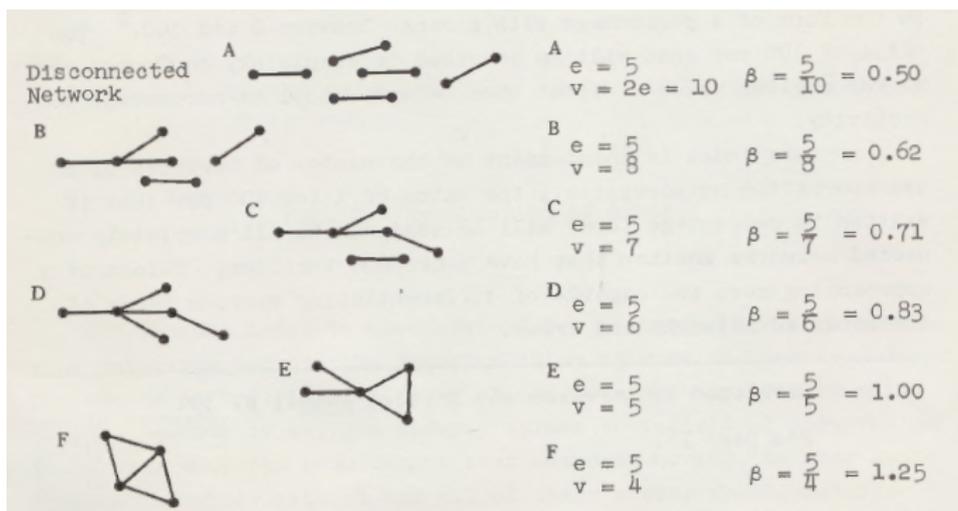


FIGURE 7 – Fondements théoriques de bêta



La relation entre les arêtes et les sommets est donc exprimée sous une forme légèrement différente de celle des deux indicateurs précédents (α et β) puisque γ est un rapport entre le nombre observé d'arêtes et le nombre maximum d'arêtes¹. Pour les graphes planaires, l'indice γ s'écrit

$$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}. \quad (2.7)$$

En appliquant l'indice γ aux réseaux de transport, on obtient une des valeurs comprises entre 0 (limite inférieure) et 1 (limite supérieure) (voir figure 8).

Comme dans le cas de l'indice α , cette mesure peut s'écrire sous forme de pourcentage avec une fourchette comprise entre 0 et 100². La valeur de 100% sera attribuée aux réseaux complets ; une valeur donnée de γ sera considérée comme un pourcentage de connectivité.

Cet indicateur est indépendant du nombre de sommets d'un réseau de transport³ : la valeur de 1 (ou 100% si elle est écrite sous forme de pourcentage) sera attribuée à tous les réseaux complets, qu'ils aient 5 ou 5 000 sommets. Les valeurs de γ proches de 0 sont capables de différencier divers types de réseaux non connexes et d'arbres.

1. Cet indicateur, absent des premiers manuels de théorie des graphes, a été proposé dans différentes disciplines sous différents noms : indice γ en géographie, densité (*density*) en analyse des réseaux sociaux, *connectance* en écologie. En géographie des transports, le terme de densité - non présent dans cette thèse - désigne le plus souvent le rapport entre la longueur totale des voies et la superficie du territoire étudié.

2. Voir page 15.

3. Cette affirmation, non démontrée, est fautive pour la forme non planaire ; je ne suis pas tout à fait certain qu'elle soit exacte pour la forme planaire.

FIGURE 8 – Application de gamma

		Non-planar	Planar
Maximal Connected Graph		$v = 4$ $e = 6$ $\gamma = \frac{6}{4(4-1)} = 1$	$\gamma = \frac{6}{3(4-2)} = 1$
		$v = 4$ $e = 5$ $\gamma = 0.83$	$\gamma = 0.83$
		$v = 4$ $e = 4$ $\gamma = 0.66$	$\gamma = 0.66$
Tree		$v = 4$ $e = 3$ $\gamma = 0.50$	$\gamma = 0.50$
		$v = 4$ $e = 2$ $\gamma = 0.33$	$\gamma = 0.33$
		$v = 4$ $e = 1$ $\gamma = 0.16$	$\gamma = 0.16$
		$v = 4$ $e = 0$ $\gamma = 0$	$\gamma = 0$
		$v = 4$ $e = 0$ $\gamma = 0$	$\gamma = 0$
Maximal Connected Graph		$v = 5$ $e = 10$ $\gamma = 1$	$v = 5$ $e = 9$ $\gamma = 1$
		$v = 5$ $e = 9$ $\gamma = 0.90$	$v = 5$ $e = 8$ $\gamma = 0.88$
Tree		$v = 5$ $e = 4$ $\gamma = 0.40$	$v = 5$ $e = 4$ $\gamma = 0.44$
		$v = 5$ $e = 1$ $\gamma = 0.10$	

Êta

L'indice êta est le premier de deux indices (η et π) exprimant les relations entre le réseau de transport dans son ensemble et ses voies en tant qu'éléments individuels du réseau. Écrit sous forme de rapport (réseau entier/voies), il attribue des valeurs ordonnées aux réseaux individuels en respectant l'exigence selon laquelle les réseaux ayant le même rapport entre le réseau entier et tous leurs chemins doivent recevoir les mêmes valeurs.

Dans le langage de la théorie des graphes, l'indice η est un rapport entre la somme de toutes les arêtes et de tous les sommets et le nombre observé d'arêtes du réseau ($\frac{\Sigma_e + \Sigma_v}{e}$). Ce rapport prend tout son sens si l'on substitue à la forme abstraite du numérateur un nombre représentant la totalité du réseau de transport donné¹. Ainsi, nous pouvons écrire l'indice η comme un rapport entre le kilométrage total du réseau et le nombre observé d'arêtes, soit

$$\eta = \text{longueur moyenne des arêtes} = \frac{M}{e} \quad (2.8)$$

où M est le kilométrage total du réseau et e le nombre d'arêtes observé. Comme le numérateur est un nombre concret (x miles)², le rapport est également un nombre concret (x miles). Par conséquent, l'indice η , écrit $\frac{M}{e}$, est un rapport indiquant la longueur moyenne d'une arête en miles³.

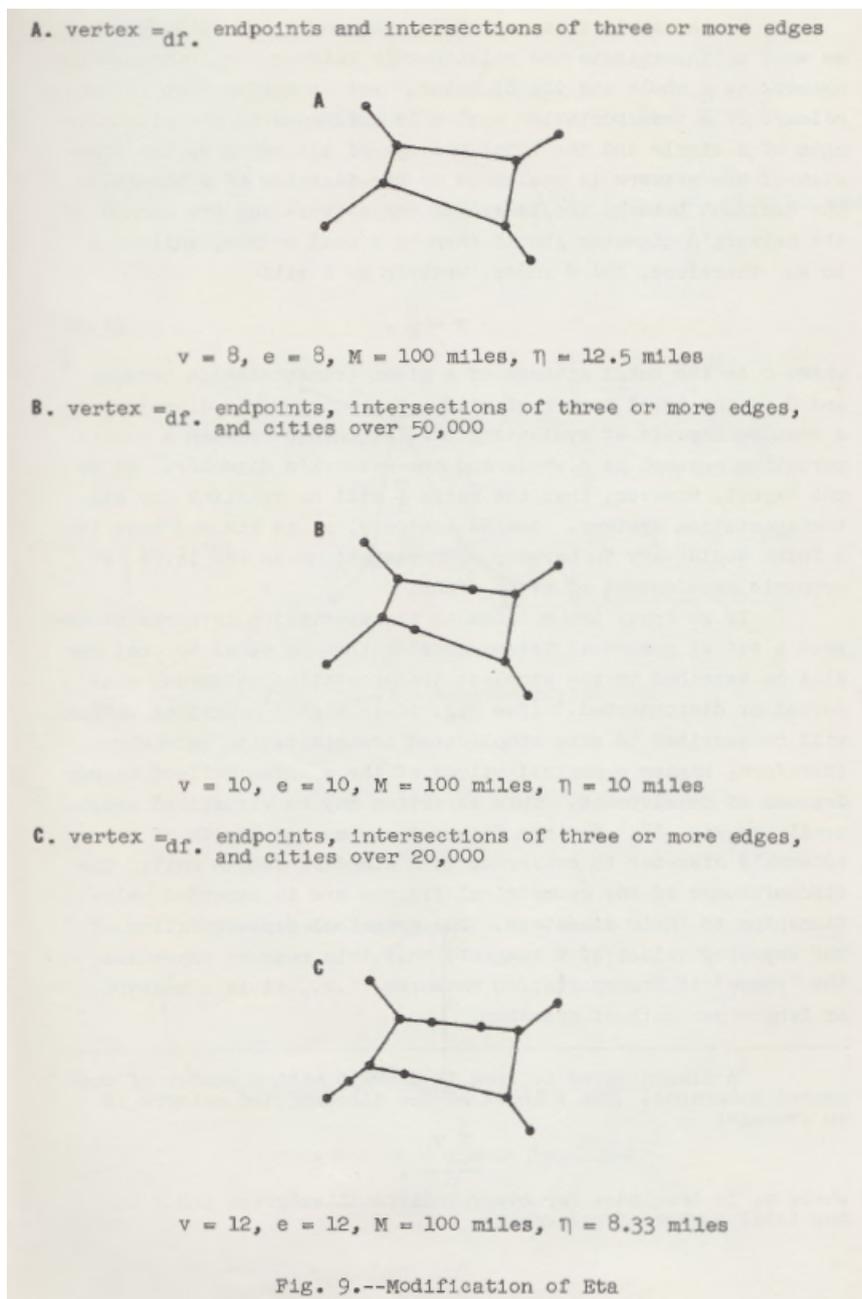
L'indice η , également appelé indice de « lien moyen », peut être appliqué à tous les réseaux de transport, mais les changements dans la définition opérationnelle d'un sommet modifient le nombre de liens présents dans un réseau donné. Comme le montre la figure 9, la valeur de η est élevée pour le réseau A et faible pour C . Si nous incluons un certain nombre de centres urbains et les considérons comme des sommets, nous diminuons la valeur de η . Plus le nombre de centres urbains inclus en tant que nœuds sur le réseau de transport est élevé, plus les valeurs de η sont faibles.

1. Nous pondérons chaque arête par sa longueur en miles ; en additionnant toutes les arêtes pondérées du réseau, nous obtenons une valeur qualifiant la totalité du réseau.

2. Voir ci-dessus la note 2 page 14.

3. L'indice η serait également significatif si nous exprimions la totalité du réseau de transport avec d'autres unités de mesure, telles que les kilomètres, ou si nous remplacions la propriété de longueur par une autre propriété représentant le réseau dans son ensemble (par exemple le flux de trafic total, etc ; voir page 24, pour la discussion de l'indice θ). Cet indicateur, tout comme η et θ présentés ensuite, étaient bien entendu déjà utilisés dans l'étude des réseaux de transport et la théorie des graphes n'apparaît pas ici d'une grande nécessité.

FIGURE 9 – Application d'êta



Pi

L'indice π est une mesure des relations entre un réseau de transport dans son ensemble et des arêtes spécifiques de ce réseau. Il est appelé indice π pour sa similitude logique avec le nombre irrationnel $\pi = 3.14159$. Comme on le sait, π est un nombre exprimant le rapport entre la circonférence d'un cercle et son diamètre : $C = \pi d$ ou $\frac{C}{d} = \pi$, où C est la circonférence et d le diamètre. Si l'on veut souligner que la circonférence C d'un cercle est fonction de son diamètre d , on écrit $C(d) = \pi d$.

Nous pouvons appliquer cette notion aux réseaux de transport lorsque nous voulons étudier la relation entre le réseau de transport dans son ensemble et son diamètre. Supposons que le kilométrage total d'un réseau de transport soit analogue à la circonférence d'un cercle et que le kilométrage du diamètre du réseau soit analogue au diamètre d'un cercle. Le rapport entre la longueur du réseau et la longueur de son diamètre devrait alors être un nombre réel analogue à π . Par conséquent, l'indice π s'écrit

$$\pi = \frac{C}{d} \quad (2.9)$$

où C est le kilométrage total d'un réseau de transport donné et d le nombre total de miles du diamètre du réseau. L'indice π est une mesure capable d'évaluer une relation entre un réseau de transport dans son ensemble et le diamètre de ce réseau. Nous ne nous attendons pas à ce que le rapport $\frac{C}{d}$ soit constant pour tous les réseaux de transport. Au contraire, on suppose que l'indice π variera de façon similaire aux variations du niveau de développement économique des régions étudiées.

Si nous appliquons l'indice π aux réseaux de transport, nous nous attendons à un ensemble de valeurs numériques supérieures ou égales à 1 ; 1 sera attribué aux réseaux de transport les plus simples, connexes ou non connexes¹ (voir figure 10). Des valeurs plus élevées seront attribuées à des réseaux de transport plus complexes ; par conséquent, des valeurs élevées de l'indice π reflètent des niveaux de développement élevés. Cette affirmation peut être visualisée dans la figure 11. Dans cette figure, la longueur observée du diamètre du réseau est convertie en une unité de longueur standard. La relation entre circonférence des figures géométriques et diamètre est attendue. La représentation graphique des valeurs attendues de π suggère que

1. Un réseau non connexe est un graphe avec un nombre n de sous-graphes connexes. L'indice π du réseau non connexe est une moyenne :

$$\frac{\sum_{i=1}^n \pi_i}{n},$$

où π_i est l'indice pour chaque sous-graphe et n le nombre total de sous-graphes.

cette mesure exprime la « forme » des réseaux de transport ; c'est-à-dire qu'il s'agit d'une mesure de la longueur par unité de diamètre.

FIGURE 10 – Application de pi

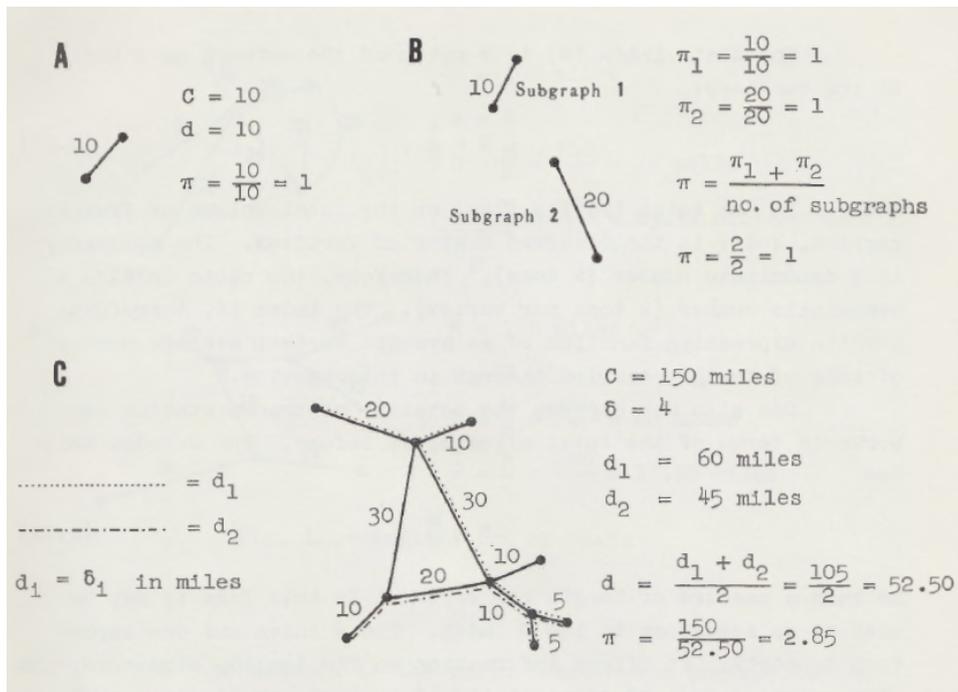
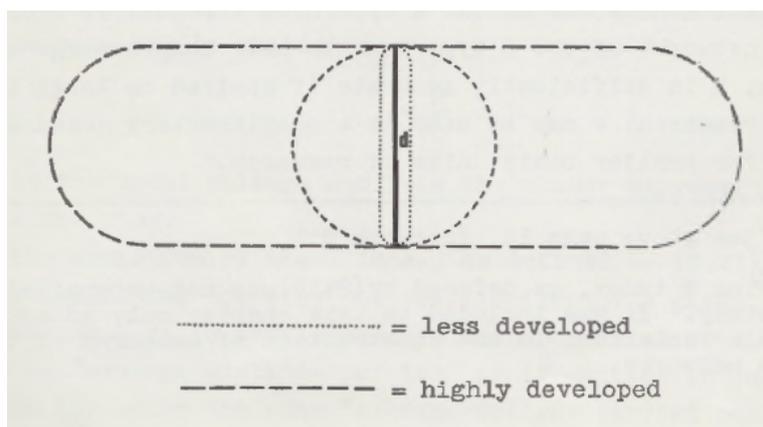


FIGURE 11 – Forme des réseaux de transport



Thêta

L'indice thêta (θ) est un rapport entre le réseau dans son ensemble et ses sommets

$$\theta = \frac{T}{v} \quad (2.10)$$

où T est le flux de trafic total, ou le volume total de marchandises transportées, et v est le nombre de sommets. Le numérateur est un nombre concret (x tonnes)¹ par conséquent, le rapport est également un nombre concret (x tonnes par sommet). L'indicateur est donc un rapport exprimant la fonction d'un sommet moyen, le nombre moyen de tonnes de marchandises transportées par une intersection².

On peut également exprimer la longueur totale d'un réseau de transport en kilomètres. L'indice θ s'écrit alors

$$\theta = \frac{M}{v} \quad (2.11)$$

et est une mesure de la longueur par sommet. Sous cette forme, il peut être utilisé comme un complément de l'indice η . L'indice θ a une propriété importante : il donne simultanément des informations sur la longueur, la structure et sur le degré de connectivité du réseau. Cette propriété est évidente sur la figure 12 où η garde la même valeur numérique alors que la structure du réseau B est différente de celle de A tandis que θ différencie les réseaux A et B . Théoriquement parlant, θ semble être une mesure plus performante que η . Cependant, l'application de η aux données empiriques a révélé que la longueur moyenne d'une arête est une fonction simple de la structure du réseau. Les réseaux de transport de type A ont souvent un lien moyen court et les réseaux de type B ont tendance à avoir un lien moyen long. Par conséquent, η est suffisamment précis s'il est appliqué pour étudier de grandes régions ; θ peut être utilisé comme mesure complémentaire, en particulier pour étudier de plus petites zones.

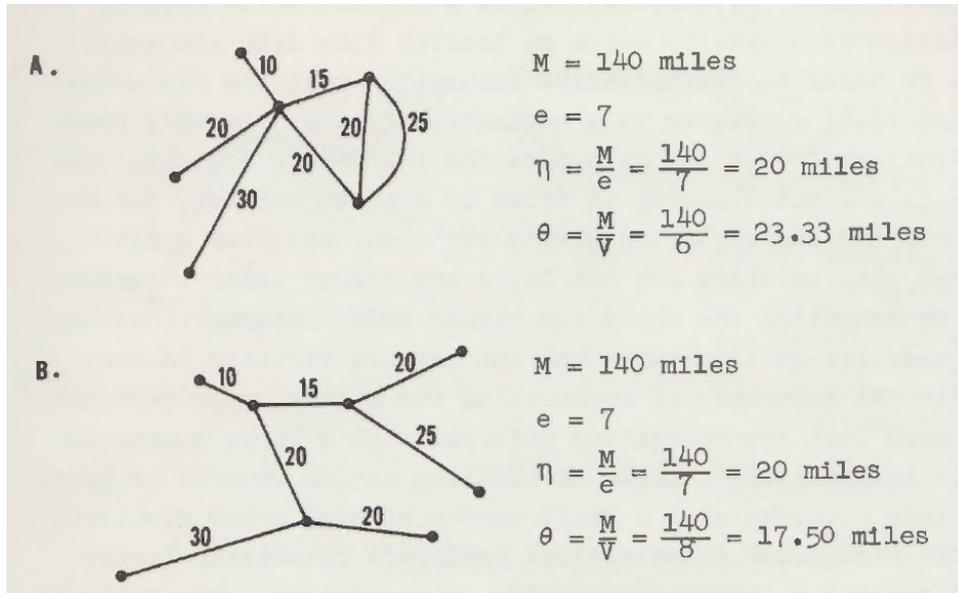
Iota

L'indice ι est le rapport entre le réseau de transport dans son ensemble et ses sommets pondérés. Il a été conçu comme un indicateur prenant en compte trois aspects des réseaux de transport : (1) la structure, (2) la longueur, (3) une fonction ; il peut être écrite sous la forme

1. Voir ci-dessus la note 2 page 14.

2. L'indice θ , défini dans l'équation 2.10, est peu utilisé dans cette étude. Il a été inclus dans ce chapitre uniquement à titre d'exemple des variations possibles dans la construction des indicateurs des réseaux de transport.

FIGURE 12 – Application de θ



$$\iota = \frac{M}{w} \quad (2.12)$$

où M est le kilométrage total du réseau et w est le nombre observé de sommets pondérés par la fonction considérée. Une variante de l'indicateur peut être écrite comme suit

$$\iota = \frac{M}{T} \quad (2.13)$$

où M est le kilométrage total et T le flux de trafic total.

L'indice ι , tel que défini par 2.13, est donc un indicateur indiquant la « densité » du flux de trafic d'un réseau de transport donné. Il est largement utilisé dans les études de transport sous le nom de « distance moyenne par tonne » ou, s'il est écrit sous la forme réciproque ($\frac{T}{M}$), sous le nom de « fret moyen transporté par mile ».

L'indice ι ($\frac{M}{w}$) a été conçu comme un indicateur s'appliquant aux réseaux de transport pour lesquels aucune donnée sur les flux de trafic n'est disponible. Il est basé sur l'intuition selon laquelle la structure d'un réseau de transport est le reflet du modèle de flux de trafic du réseau¹. On peut

1. Cette étude ne tente pas de définir et de mesurer cette corrélation supposée entre la structure du réseau et le volume du trafic. On suppose intuitivement que cette corrélation existe et qu'elle est élevée. Si l'indice ι ($\frac{M}{w}$) donne des résultats significatifs, cela

calculer l'indice ι comme suit. Le numérateur est le kilométrage d'un réseau donné, le dénominateur est la somme des sommets du réseau, pondérée par paires lorsque les sommets sont des intersections d'ordre trois et d'ordre supérieur¹. En pondérant les intersections d'ordre trois et d'ordre supérieur, le rapport entre le réseau total et les sommets du réseau est biaisé dans le but de mettre en valeur les sommets d'ordre supérieur². On suppose que les réseaux de transport comportant un grand nombre de sommets d'ordre élevé sont capables de gérer des flux de trafic plus importants que les réseaux comportant un petit nombre de sommets d'ordre élevé, car les intersections d'ordre élevé remplissent un nombre relativement plus important de rôles que les intersections d'ordre faible. La figure 13 illustre la distribution de tous les rôles théoriquement possibles pour les intersections d'un réseau hypothétique. À des fins pédagogiques, nous examinons un réseau hypothétique simple, c'est-à-dire deux extrémités et une intersection d'ordre deux.

La figure 13 montre que les extrémités ont chacune deux rôles et que l'intersection en a huit ; la proportion hypothétique de rôles entre une intersection (2 rayons dans cette figure) et une extrémité est de 4 : 1. Cette proportion théorique est utilisée comme base de pondération de l'indice ι . Le poids de chaque sommet est alors le nombre de rayons qui le traversent multiplié par deux. Les extrémités ont toujours une valeur de un.

Pondérer les sommets du réseau semble accroître la validité de l'indice ι . L'indicateur attribue des valeurs différentes aux réseaux de transport qui ne sont pas différenciés par l'indice θ (voir figure 14).

Cependant, θ possède d'autres propriétés intéressantes (voir page 24) ; ι peut être considéré comme une mesure complémentaire à θ , surtout si l'on ressent la nécessité de distinguer des « nuances » de faible importance. Il va de soi que la probabilité de trouver deux réseaux de transport ayant la même longueur, le même nombre d'arêtes et le même nombre de sommets est faible. Néanmoins, la figure illustre la signification et la validité de la pondération des sommets des réseaux³.

impliquerait que la structure du réseau est une fonction pouvant définir son volume de trafic.

1. Une intersection d'ordre n est par définition une intersection avec n rayons.
2. Les termes intersection et sommet sont utilisés dans ce document de manière synonyme.
3. La technique de pondération des sommets des réseaux est flexible. Sa validité et sa signification dépendent de notre capacité à justifier et à interpréter les résultats obtenus.

FIGURE 13 – Fonctions théoriques des sommets des réseaux

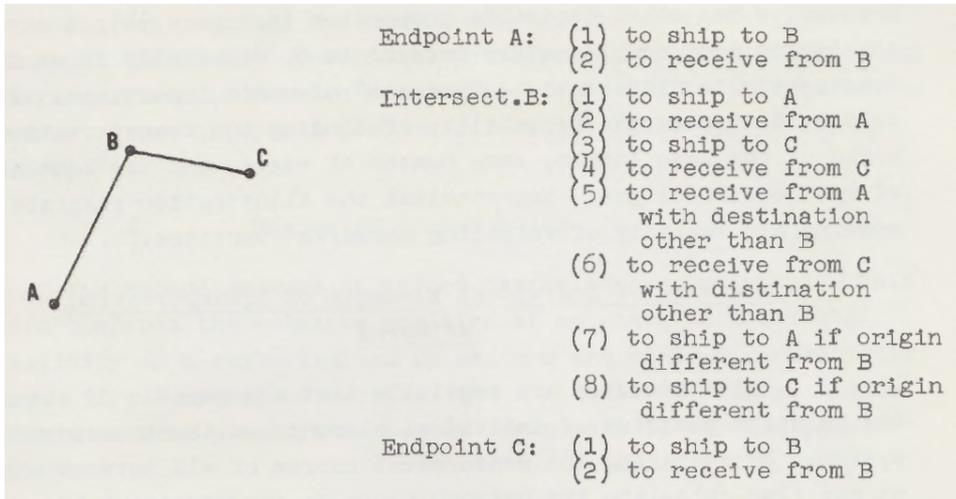
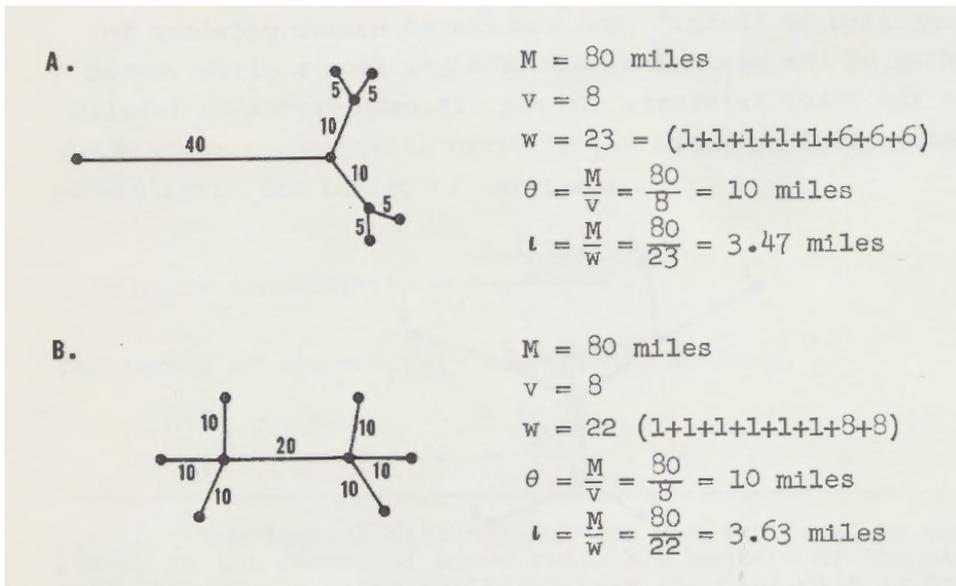


FIGURE 14 – Comparaison des indices thêta et iota



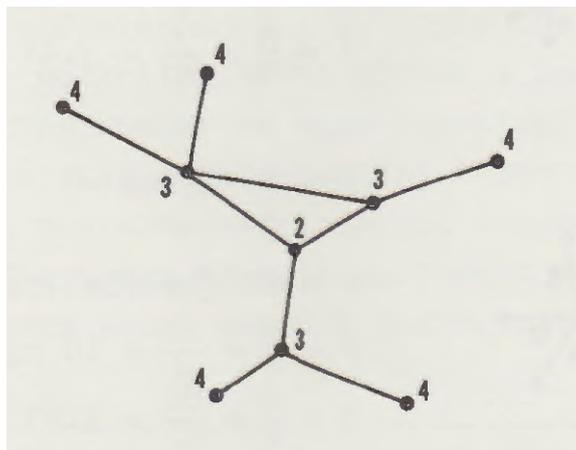
Mesures des éléments individuels des réseaux de transport

Il existe cinq indicateurs capables d'évaluer la position relative des éléments individuels du réseau de transport. En faisant la moyenne de ces indicateurs, on peut calculer une valeur représentative de l'ensemble du réseau.

Nombre associé

Le premier indicateur, appelé nombre associé d'un sommet, a été proposé par König¹. Le nombre associé désigne le nombre maximal d'arêtes allant d'un sommet donné à chacun des autres sommets. Dans la figure 15, chaque sommet est étiqueté avec son nombre associé.

FIGURE 15 – Application du nombre associé



On peut considérer le nombre d'arêtes comme une indication de la distance topologique². Par conséquent, le nombre associé, exprimant la distance maximale entre les sommets du réseau, peut être interprété comme une mesure de l'étendue topologique du réseau (comme le diamètre du réseau³).

1. Dénes König, *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen* (Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., 1936), pp. 63-64. La version citée est la première édition ; sa diffusion ayant été perturbée par le contexte politique, il est probable que Kansky ait plutôt eu accès à la réédition américaine de 1950 de cet ouvrage qui est par ailleurs le premier manuel de théorie des graphes à avoir eu un impact scientifique, à l'inverse des traités du mathématicien français André Sainte-Laguë publiés dans les années 1920. Par ailleurs, tout comme le nombre cyclomatique et le diamètre, on revient avec cet indicateur aux mesures directement issus dans la théorie des graphes.

2. La distance topologique entre deux sommets, comme mentionné ci-dessus, est le nombre d'arêtes du plus court chemin entre ces sommets (ici le plus court chemin signifie le plus petit nombre d'arêtes d'un chemin donné).

3. Voir page 11.

Degré de connectivité

Le second indicateur est appelé degré de connectivité¹. Cet indicateur place la connectivité d'un réseau observé sur une étendue limitée par des quotients de connectivité maximale et minimale. Soit v le nombre de sommets et e le nombre d'arêtes, alors le nombre maximal possible d'arêtes d'un réseau sera pour les graphes non planaires

$$e_{max} = \frac{v(v-1)}{2}. \quad (2.14)$$

Le taux de connectivité maximale est toujours égal à 1 :

$$\frac{\frac{v(v-1)}{2}}{\frac{v(v-1)}{2}} = 1. \quad (2.15)$$

La connectivité minimale varie en fonction du nombre de sommets :

$$\text{connectivité minimale} = \frac{\frac{v(v-1)}{2}}{v-1}. \quad (2.16)$$

Le degré de connectivité peut alors s'écrire

$$d.c. = \frac{\frac{v(v-1)}{2}}{e} \quad (2.17)$$

où e est le nombre d'arêtes observé. Étant donné que le rapport de connectivité minimale augmente avec le nombre de sommets, l'étendue de cette mesure varie considérablement (on peut prouver que l'étendue est limitée par 1 - limite inférieure - et par $\frac{v}{2}$ - limite supérieure). Par conséquent, chaque réseau, ayant un nombre différent de sommets, est mesuré sur une échelle différente. Nous ne pouvons comparer le degré de connectivité de différents réseaux que si nous transformons les valeurs du degré de connectivité en pourcentages.

1. Z. Prihar, « Topological Properties of Telecommunication Networks ». in *Proceedings*, Institute of Radio Engineers, XLIV (1956), 929-933. Cette mesure a été appliquée par Garrison aux réseaux de transport. Voir Garrison, *op. cit.*, pp. 122-137. [Une version bilingue et commentée de l'article de Prihar est disponible dans la collection textes du groupe fmr.](#)

Dispersion

Deux autres indicateurs ont été proposés par Shimbel¹. Le premier, appelé dispersion d'un réseau (N), est défini par

$$D(N) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d(i, j) \quad (2.18)$$

où d est la distance (en miles ou en toute autre unité métrique) d'un sommet i à un sommet j . Il est évident, d'après la formule, que cet indicateur est une somme de sommes. Nous calculons d'abord la somme de toutes les distances entre un sommet i et tous les autres sommets du réseau N ; puis nous additionnons tous les totaux résultant de la première opération. Si le résultat de la première somme est grand, cela signifie que les sommets du réseau N sont éloignés du sommet i . Si le résultat est petit, l'inverse est vrai.

Accessibilité

Le deuxième indicateur est appelé l'« accessibilité d'un sommet i au réseau N » et il est par définition

$$A(i, A) = \sum_{j=1}^n d(i, j). \quad (2.19)$$

En comparant 2.18 et 2.19, il est évident que la mesure de l'« accessibilité » est équivalente à la mesure de la « dispersion ». Nous pouvons caractériser la dispersion comme un indicateur exprimant une propriété globale du réseau alors que l'accessibilité est un indicateur indiquant la relation spatiale entre un élément donné et le reste du réseau².

Circuité

Le dernier indicateur de cet ensemble est appelé le degré de circuité. Il permet de fournir une propriété globale d'un réseau grâce à l'emplacement relatif de ses éléments individuels. Il peut être calculé à l'aide de la formule

1. Alfonso Shimbel, « Structural Parameters of Communication Networks » ; Bulletin of Mathematical Biophysics XV (1953), 501-507. [Une version bilingue et commentée de l'article de Shimbel est disponible dans la collection textes du groupe fmr.](#) Les études portant sur les réseaux de communication (Prihar, Shimbel) ont fortement influencé les approches des géographes quantitativistes américains; inversement, d'autres traditions de recherche, et notamment la sociométrie ou l'école de Manchester, n'ont eu aucun impact sur ces travaux. Le fait que les premières portent sur des infrastructures techniques (réseaux d'émetteurs) alors que les secondes portent sur des individus explique sans doute en partie ce fait.

2. L'accessibilité est une application de la notion de nombre associé : les deux sont des mesures de distance, le nombre associé mesure une distance topologique, l'accessibilité une distance métrique.

$$\text{degré de circuité} = \frac{\sum_{i=1}^n (E - D)^2}{v} \quad (2.20)$$

où E est la longueur d'un lien en miles, D la longueur à vol d'oiseau¹ en miles et v le nombre de sommets.

En appliquant cette formule, nous comparons la différence entre le système de transport existant et un système de transport imaginaire où les liens reliant tous les sommets sont les plus courts possibles. La ligne imaginaire la plus courte entre deux sommets donnés (distance aérienne) est appelée « distance à vol d'oiseau ». La différence entre cette dernière et la route existante, exprimée en kilomètres, est élevée au carré. En additionnant toutes les valeurs au carré et en divisant le total par le nombre de sommets, on obtient un nombre indiquant le degré de circuité du réseau de transport par rapport à un sommet donné. Une valeur globale du réseau peut également être calculée comme un degré moyen de circuité de tous les sommets, c'est-à-dire la somme de tous les écarts au carré pour tous les sommets divisé par le nombre de sommets. La figure 16 est un réseau hypothétique servant d'exemple simple pour le calcul du degré de circuité².

Le degré de circuité semble être un indicateur utile. En l'appliquant aux réseaux de transport, nous obtenons une hiérarchie des réseaux individuels. Son caractère opérationnel dépend toutefois de la définition des sommets (voir la discussion ci-dessus page 22). Les valeurs du degré de circuité sont fonction du nombre de sommets du réseau. Ainsi, pour un même réseau de transport, nous pouvons calculer différentes valeurs de l'indicateur en fonction du nombre de sommets défini. Avec l'augmentation du nombre de sommets, le calcul de cet indicateur devient plus long et plus coûteux³.

Évaluation des indicateurs

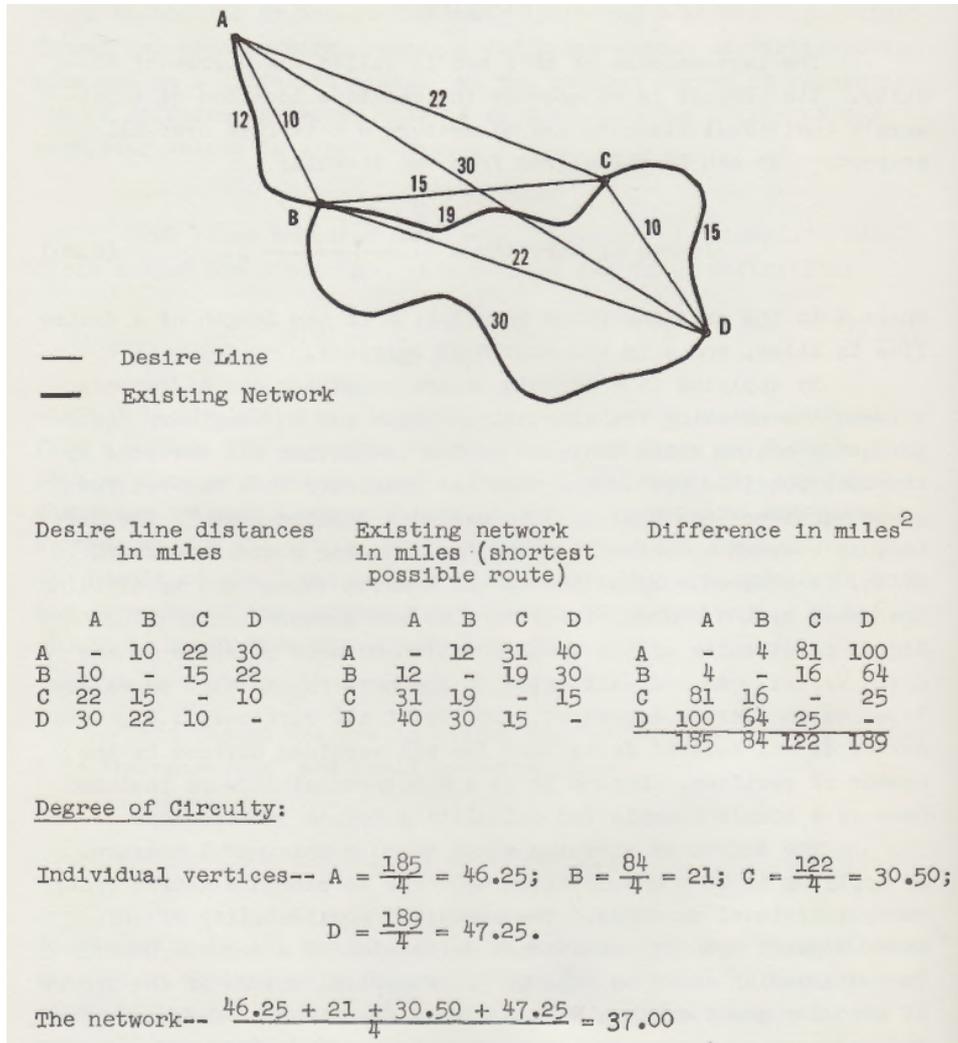
Les indicateurs sont des modèles simples qui établissent une relation entre les observations directes des réseaux de transport et les valeurs qui résultent des mesures. Ces modèles simples sont en fait des règles écrites mathématiquement pour transformer les observations directes des réseaux de transport en ensembles de valeurs numériques. Les valeurs numériques sont les données élémentaires qui sous-tendent l'étude ultérieure. Par conséquent, les mesures

1. Kansky emploie l'expression « desire line ».

2. Cette figure a été reprise dans l'ouvrage de Haggett et Chorley, 1969, *Network Analysis in Geography*, Edward Arnold, p. 59. Les résultats numériques ont également été repris mais présentés sous une forme plus synthétique (indicateurs en ligne, paire de sommets en colonnes).

3. Cette mesure peut cependant être utilisée efficacement si un ordinateur performant est disponible.

FIGURE 16 – Application du degré de circuité



quantitatives constituant la base logique de notre analyse, elles déterminent de manière directe les conclusions de l'étude.

Chaque discipline a conçu ses méthodes et techniques de mesure spécifiques. Nous tentons ici de proposer des mesures de la structure spatiale des réseaux de transport. Ces mesures sont considérées en première approximation comme des preuves empiriques. Des mesures répétées et améliorées, c'est-à-dire un ensemble de deuxième, troisième et nième approximations, devraient permettre d'obtenir des corrélations numériques plus exactes de la preuve objective¹.

1. Nous croyons avec Kant au « Grenzbegriff ». Kant a émis l'hypothèse de l'existence d'un « monde réel » considéré comme l'ensemble de tous les objets ayant des « valeurs

Ayant établi le fait que les mesures quantitatives sont des règles de transformation des observations directes en valeurs numériques, nous allons vérifier si les résultats, issus des indicateurs quantitatifs définis ci-dessus, sont performants. Étant donné que nos mesures sont des premières approximations des règles de transformation, un effort de test vigoureux est nécessaire pour établir la validité des indicateurs proposés. Deux preuves de la validité peuvent être considérées : (1) logique (formelle) et (2) empirique.

Preuve logique

Soit p les objets de preuves empiriques (réseaux) et q les valeurs issues des mesures proposées. Les indices $\alpha \dots \iota$ sont des relations entre les preuves empiriques et les résultats numériques $p R q$, où R est une relation α ou β ou \dots ou ι :

$$(\alpha, \beta, \dots, \iota) \in R^1. \quad (2.21)$$

Prouvons que $\alpha \dots \iota$ sont des relations significatives entre p et q . (a) Supposons que p et q sont des constantes. Si nous remplaçons les relations $\alpha \dots \iota$ par une autre relation x , déjà reconnue comme une relation significative, et que la formule $p R q$ reste valable alors nous considérons que les relations $\alpha \dots \iota$ sont significatives. Nous allons symboliser cela :

$$(p \ x \ q \equiv p \ \alpha \ q) \supset x \equiv \alpha \quad (2.22)$$

Ceci peut bien sûr être écrit pour tous les indices $\alpha \dots \iota$. Comme il n'existe aucun indicateur disponible qui soit significatif de la structure des réseaux de transport, nous ne pouvons pas prouver la validité de $\alpha \dots \iota$ par cette méthode de simple substitution. (b) Supposons que nous ayons un ensemble d'objets $p_1, p_2 \dots p_n$ et un ensemble de valeurs $q_1, q_2, \dots q_n$. Chaque valeur q_i a été dérivée de l'objet p_i en appliquant la mesure x ; nous pouvons dire qu'un ensemble de p objets est relié par la relation x à un ensemble de valeurs q . Nous supposons que la relation x est un indicateur dont la signification est prouvée :

vraies », « Grenzbegriff » (ou limite stochastique dans la littérature statistique) est une mesure vraie de valeurs vraies. Une mesure vraie d'un objet donné sera la limite (Grenzbegriff) d'un nombre infini de mesures, c'est-à-dire que les mesures vraies ne peuvent être atteintes mais elles peuvent être approchées.

1. Par $x \in A$ on entend : x est membre d'un ensemble A . Par $A \equiv B$ on entend : $A = B$ et $B = A$. On peut aussi écrire $A \iff B$ ou A si et seulement si B . Par \supset , on entend A implique B .

Objets	Relations	Valeurs numériques	
p_1	x	q_1	
p_2	x	q_2	
·	·	·	
·	·	·	
p_n	x	q_n	(2.23)

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ p_n \end{pmatrix} = P \quad (2.24) \qquad \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ q_n \end{pmatrix} = Q \quad (2.25)$$

Supposons que nous ayons un autre ensemble d'objets r_1, r_2, \dots, r_n et un ensemble de résultats s_1, s_2, \dots, s_n . Chaque valeur s_i a été calculée à partir de l'objet r_i en appliquant la mesure α :

Objets	Relations	Valeurs numériques	
r_1	α	s_1	
r_2	α	s_2	
·	·	·	
·	·	·	
r_n	α	s_n	(2.26)

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ r_n \end{pmatrix} = R \quad (2.27) \qquad \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ s_n \end{pmatrix} = S \quad (2.28)$$

Si l'ensemble de valeurs Q est corrélé avec les valeurs S et que P a, théoriquement ou empiriquement, une relation avec R , alors la mesure significative x implique que la mesure a est également une mesure significative. On peut l'écrire symboliquement ¹ :

$$[(Q \approx S) \cdot (P \approx R)] \supset (x \approx \alpha) \quad (2.29)$$

Il s'agit d'une preuve formelle. Cette preuve logique doit être complétée par des séries de corrélations d'observations empiriques. Par conséquent, la preuve logique chevauche la preuve empirique et peut être considérée comme une base logique de la vérification empirique discutée ci-dessous.

1. $Q \approx S$ signifie Q est corrélé avec S ; $a.b$ signifie a et b .

Preuve empirique¹

La validité de la preuve logique et, par conséquent, la validité des indicateurs des réseaux de transport proposés dépendent de la découverte d'une corrélation théoriquement justifiable entre les valeurs des indicateurs proposés et les valeurs d'objets empiriques.

On suppose généralement que les réseaux de transport sont corrélés aux caractéristiques économiques des régions étudiées. Nous tentons donc d'évaluer la validité de nos indicateurs en mesurant une supposée corrélation entre la structure des réseaux de transport et les caractéristiques économiques. C'est l'un des objectifs du chapitre suivant.

1. Par *preuve empirique*, nous entendons plutôt une évaluation empirique.

Chapitre III

Analyse empirique : phase exploratoire

Le chapitre précédent a proposé un certain nombre d'indicateurs. L'objectif principal de ce chapitre est d'examiner l'utilité des indicateurs proposés et, en les appliquant à des données empiriques, d'exprimer numériquement une relation hypothétique entre la structure des réseaux de transport et les caractéristiques économiques des régions sélectionnées.

Validité des indicateurs proposés

La validité des indicateurs proposés peut être démontrée en satisfaisant les conditions de l'expression 2.29 : (1) $P \approx R$, (2) $Q \approx S$, et (3) x est une mesure significative.

Soit le vecteur P représentant la situation économique d'un ensemble de régions tel que

$$\begin{array}{rcl} p_1 & = & \text{économie de la région 1} \\ p_2 & = & \text{économie de la région 2} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ p_n & = & \text{économie de la région } n, \end{array}$$

et le vecteur R représentant les réseaux de transport du même ensemble de régions tel que

$$\begin{aligned}
r_1 &= \text{réseau de transport de la région 1} \\
r_2 &= \text{réseau de transport de la région 2} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
r_n &= \text{réseau de transport de la région } n.
\end{aligned}$$

On suppose généralement que les régions économiquement très développées disposent de réseaux ferrés et routiers denses, bien développés¹, à la structure complexe. Inversement, les régions² économiquement moins développées ont des réseaux de transport simples³. En d'autres termes, on fait généralement l'hypothèse qu'il existe une corrélation entre P et R . On peut considérer que la première condition de l'expression 2.29 est satisfaite, au moins au niveau hypothético-déductif.

Écrivons le vecteur Q comme une colonne de valeurs telle que

$$\begin{aligned}
108 &= \text{une valeur}^4 \text{représentative de la région 1} \\
100 &= \text{une valeur représentative de la région 2} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
n &= \text{une valeur représentative de la région } n
\end{aligned}$$

et le vecteur S comme une colonne de valeurs telle que

$$\begin{aligned}
1.05 &= \text{une valeur représentative du réseau de la région 1} \\
0.87 &= \text{une valeur représentative du réseau de la région 2} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
n &= \text{une valeur représentative du réseau de la région } n.
\end{aligned}$$

S'il existe une corrélation significative entre les vecteurs Q et S , nous sommes en mesure, sur la base de l'expérience empirique, de satisfaire la deuxième condition de l'expression 2.29, à savoir $Q \approx S$.

La troisième condition sous-jacente de l'expression 2.29 est l'exigence que le vecteur des valeurs résultantes Q soit issu du vecteur des « objets » P d'une manière théoriquement et mathématiquement significative.

1. Cette hypothèse était explicitement formulée par Lalanne, *op. cit.*
2. Les termes *région* (*region*) et *zone* (*area*) sont utilisés de manière interchangeable dans ce texte.
3. L'un des objectifs de cette étude est de mesurer l'ampleur et les variations spatiales de cette relation supposée.
4. Telle que définie dans la note 4, page 5, chapitre II.

Il existe de nombreux indicateurs économiques largement utilisés et pertinents. La consommation d'énergie ou d'électricité par habitant, les exportations par habitant et d'autres indicateurs similaires ont été utilisés comme mesures du degré de développement économique des pays¹. D'autres mesures issues de traitements statistiques tels que l'analyse en composantes principales fournissent des résumés utiles². En acceptant la pertinence de ces mesures, nous satisfaisons la troisième condition de l'expression 2.29.

La découverte d'une corrélation significative entre l'ensemble des valeurs exprimant le niveau de développement économique (Q) et l'ensemble des valeurs indiquant le degré de développement des transports (S) indiquerait l'utilité de tout ou partie des indicateurs de réseau proposés comme indicateurs du degré de développement des transports. Nous allons maintenant nous concentrer sur cette tâche et mesurer la relation entre indicateurs des caractéristiques économiques et indicateurs des réseaux de transport.

Les analyses de régression simple et multiple³ nous permettent de quantifier des relations fonctionnelles hypothétiques. Puisque nous postulons une relation entre les caractéristiques économiques et les réseaux de transport des zones étudiées, nous nous attendons à une relation fonctionnelle⁴ entre les deux ensembles de données empiriques, de sorte qu'un changement des valeurs d'un ensemble de données s'accompagne d'un changement des valeurs de l'autre ensemble.

Qu'entendons-nous par « fonction » ? Si Y désigne les valeurs d'indicateurs d'un réseau de transport donné et X les valeurs d'une caractéristique économique d'une région donnée, la relation entre les deux ensembles de données peut s'écrire comme suit

$$Y = f(X). \quad (3.1)$$

En d'autres termes, Y est fonction de X , ce qui signifie qu'il existe une relation fonctionnelle « simple⁵ » entre Y et X . Si nous appelons Y et X des

1. Pour une liste exhaustive de mesures similaires, voir *Atlas of Economic Development*, éd. N. S. Ginsburg. (Chicago : University of Chicago Press, 1961), p. 119.

2. Pour une discussion détaillée des techniques statistiques et de la formulation de ces mesures, voir Brian J. L. Berry, « Basic Patterns of Economic Development », *ibid.*, pp. 110-119.

3. Pour une discussion détaillée de ces techniques, voir Mordecai Ezekiel et Karl A. Fox, *Methods of Correlation and Regression Analysis-Linear and Curvilinear* (3^e éd. ; New York : J. Wiley and Sons, 1959), p. 584.

4. Bien que le concept de *fonction* soit généralement bien connu, nous en donnons ici une brève description, afin d'intégrer nos notions éventuellement différentes de ce concept classique.

5. Nous disons *simple* car seuls deux ensembles de données sont impliqués dans la relation, nous avons donc affaire à une relation « un à un ». [Kansky distingue les relations one to one et one to many soit les relations binaires injectives et fonctionnelles d'un côté ;](#)

variables, Y est par convention appelée variable dépendante (à expliquer) et X est la variable indépendante (explicative). L'équation 3.1 exprime la relation de telle sorte que la variable dépendante est considérée comme une *fonction de* la variable indépendante ; les variations de Y *sont dépendantes* des variations de X .

Nous devinons que le degré de développement des réseaux de transport peut être influencé par des facteurs autres qu'économiques, par exemple le site, la densité de population, le système politique, la localisation de la zone étudiée, etc. Cela implique que les autres variables indépendantes doivent être incluses dans l'analyse. La relation fonctionnelle peut alors s'écrire

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots X_n) \quad (3.2)$$

où $X_1, X_2, X_3, \dots X_n$ sont les variables indépendantes et $X_1 =$ site, $X_2 =$ densité de population, $X_3 =$ système politique, $\dots X_n$. En d'autres termes, Y est une fonction de $X_1, X_2, X_3, \dots X_n$ et il existe une relation fonctionnelle « multiple ¹ » entre Y et $X_1, X_2, X_3, \dots X_n$.

Puisque l'objectif principal des analyses de régression simple et multiple est de mesurer la relation entre les variables, nous utilisons ces techniques afin de substituer aux équations générales 3.1 et 3.2 les équations réelles, fondées sur des données empiriques, des relations entre les indicateurs des réseaux de transport et les mesures des caractéristiques économiques et autres. En d'autres termes, nous cherchons à dériver une équation qui pondère les variables indépendantes individuelles en fonction de leurs effets sur la variable dépendante. L'équation 3.1 peut donc être écrite comme suit

$$Y = a + bX \quad (3.3)$$

où il existe une relation linéaire entre Y et X . Dans l'équation, a et b sont des poids (appelés paramètres) dont les valeurs doivent être déterminées par une comparaison avec les données empiriques. De la même manière, l'équation 3.2 peut être écrite

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots b_nX_n \pm e \quad (3.4)$$

où $b_1, b_2, \dots b_n$ sont les pondérations déterminées par les mesures empiriques, a est une constante (l'ordonnée à l'origine) et e une mesure de l'erreur.

injectives et non fonctionnelles de l'autre. Dans la suite de la traduction, j'utilise les termes relations binaires fonctionnelles (*one to one*) et non fonctionnelles (*one to many*).

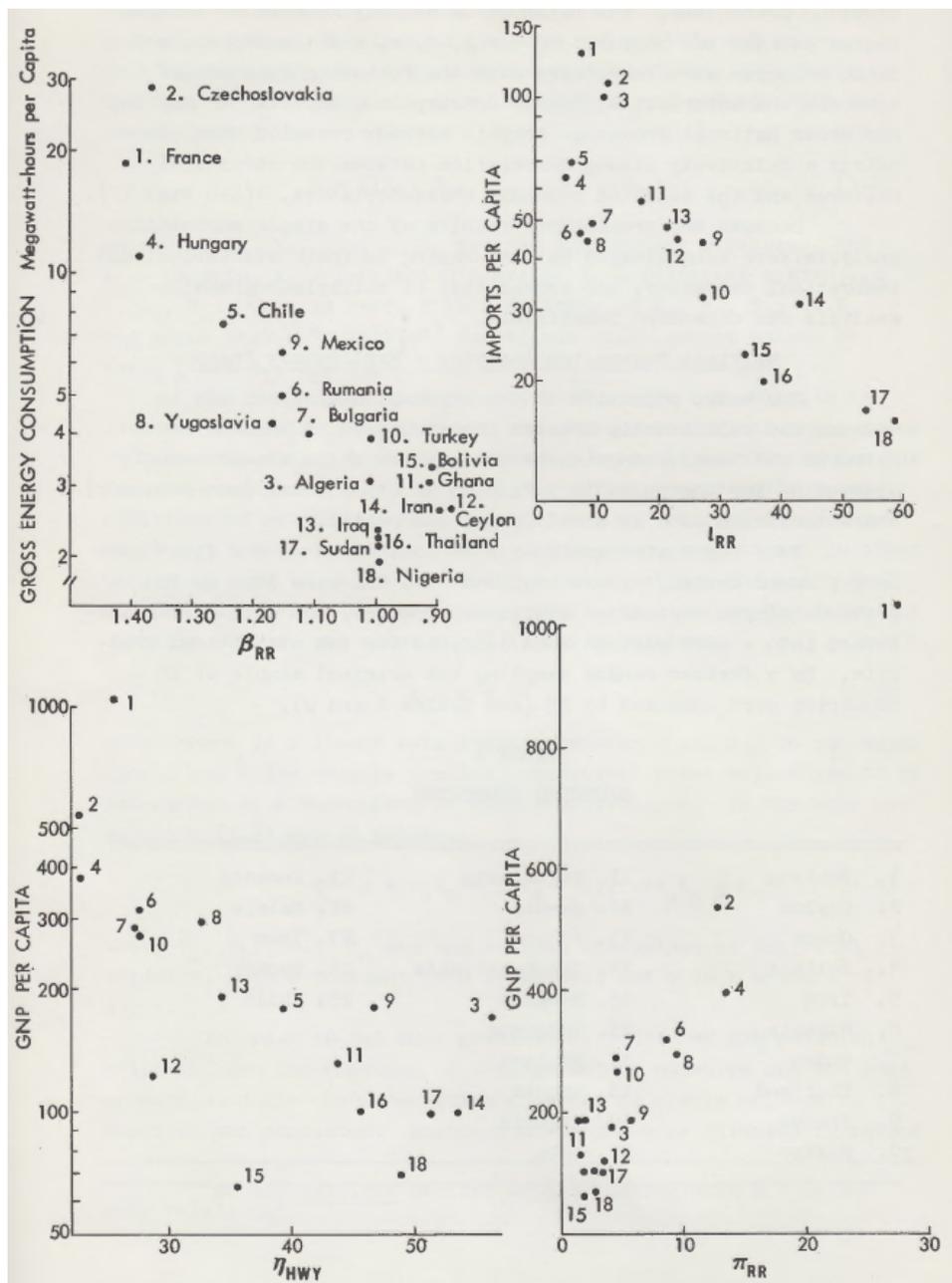
1. Nous disons *multiple* car nous avons affaire à une relation non fonctionnelle.

Afin d'obtenir une première idée des relations entre les indicateurs des réseaux de transport et les mesures des caractéristiques économiques, une série de régressions simples a été effectuée. Dix-huit pays ont été sélectionnés par des procédures d'échantillonnage aléatoire. On a calculé pour le réseau ferré ou autoroutier de chaque pays sélectionné les indices β , η , π et ι ; ces indicateurs ont été corrélés avec les mesures des caractéristiques économiques suivantes : consommation d'énergie, importation par habitant et produit national brut par habitant. La visualisation graphique a révélé l'existence d'une corrélation relativement forte entre les mesures structurelles et les caractéristiques économiques sélectionnées (figure 17¹).

Les résultats préliminaires de l'analyse de corrélation simple étant encourageants au niveau statistique et théorique, une analyse de régression multiple a été menée tout de suite après.

1. La relation entre indice β_{RR} et consommation d'énergie a été reprise dans l'ouvrage de Haggett et Chorley, *op. cit.*, p. 34.

FIGURE 17 – Analyses de corrélation simples - Représentation graphique



Régression multiple : phase exploratoire

L'objectif fondamental des analyses de régression était de mesurer la relation entre la structure des réseaux de transport et les caractéristiques économiques locales tout en tenant compte de l'influence probable d'autres caractéristiques locales (non économiques) telles que la taille, la forme et le relief.

Quatre analyses de régression ont constituées la première étape de la démarche. Ces analyses ont utilisé les mêmes données que les analyses de régression simple précédentes. Cependant, les données ont été transformées en une forme plus adaptée à l'analyse statistique. Suite à un nouvel échantillonnage aléatoire, l'échantillon initial de 18 pays a été étendu à 25 (voir tableaux 1 et 2).

TABLEAU 1 – Pays sélectionnés

1. Tunisie	10. Mexique	19. Algérie
2. Ceylan	11. Yougoslavie	20. Cuba
3. Ghana	12. Suède	21. Roumanie
4. Bolivie	13. Pologne	22. Malaisie
5. Irak	14. Tchécoslovaquie	23. Iran
6. Nigeria	15. Hongrie	24. Turquie
7. Soudan	16. Bulgarie	25. Chili
8. Thaïlande	17. Finlande	
9. France	18. Angola	

Les réseaux ferroviaires et les autoroutes d'ordre supérieur des 25 pays sélectionnés ont été mesurés¹ avec les indices η et ι . Le tableau 2 présente les résultats obtenus.

1. L'emplacement et l'étendue des réseaux ferroviaires et autoroutiers ont été déterminés en utilisant : *World Railways, 1954-1955*, éd. Henry Sampson (3^e éd. ; New York : Rand McNally and Company) et *The Times Atlas of the World, Mid-Century Edition*, éd. John Bartholomew, Vol. I-IV (Londres : The Times Publishing Company Ltd., 1956). Les autoroutes d'ordre supérieur sont par définition celles qui sont représentées par des lignes rouges épaisses dans le *Times Atlas of the World*. Il est évident que les cartes à grande échelle présentent un plus grand nombre d'autoroutes d'ordre supérieur que les cartes à petite échelle. Pour éviter une éventuelle distorsion dans la détermination des autoroutes d'ordre élevé, l'auteur a essayé d'utiliser des cartes à la même échelle (1 : 2 500 000). Cependant, pour un certain nombre de pays, des cartes à une échelle différente ont été utilisées (échelles variant du 1 : 5 000 000 au 1 : 2 000 000). Il est probable que les auteurs du *Times Atlas of the World* aient appliqué des définitions différentes des « autoroutes d'ordre supérieur » pour des cartes à des échelles différentes. Cela implique que les valeurs des autoroutes d'ordre supérieur que nous avons obtenues sont probablement en partie faussées. Nous espérons que cette distorsion est légère. Une comparaison visuelle entre les cartes utilisées et d'autres cartes à une autre échelle et d'une autre origine a révélé une concordance raisonnable du nombre et de l'étendue des « autoroutes d'ordre supérieur ».

Variables indépendantes

Cinq mesures ont été choisies comme indicateurs économiques représentatifs : (1) l'« échelle technologique » ; (2) l'« échelle démographique » ; (3) la taille ; (4) la forme ; (5) le relief.

L'indicateur « échelle technologique », proposé par Berry¹ à l'aide d'une analyse en composantes principales, est le principal indicateur agrégé mesurant le degré de développement économique des pays. Il a été obtenu en comparant et en combinant mathématiquement les informations offertes par 43 indicateurs de développement économique. L'échelle technologique étant calculée à partir d'indicateurs reconnus comme pertinents par une méthode statistique justifiable théoriquement, elle peut être considérée comme une mesure dont la validité a été démontrée par l'expérience.

L'« échelle démographique » est le deuxième facteur le plus pertinent selon cette même analyse. Il tient compte d'indicateurs tels que la densité de population, les taux de natalité et de mortalité, la croissance démographique et autres mesures similaires. Bien que l'on soupçonne que l'échelle démographique soit inversement corrélée à l'échelle technologique, les moyennes ayant été conservées dans cette dernière (les deux sont donc redondantes dans une certaine mesure), elle a été incluse dans l'analyse à des fins comparatives.

Les trois indicateurs suivants - taille, forme, relief - sont des mesures des caractéristiques physiques des zones sélectionnées. Une simple analyse graphique des corrélations a révélé qu'il n'y a pas de corrélation significative entre ces trois indicateurs et les échelles technologiques et démographiques.

La taille est mesurée par un nombre de miles carrés pour chaque pays sélectionné². L'indicateur de forme a été conçu dans le but de clarifier une notion issue de la théorie des graphes à savoir que la forme d'un graphe peut affecter certains indicateurs. Les graphes de forme « allongée et étroite » ont tendance à avoir des scores plus élevés que les graphes de forme circulaire.

FIGURE 18 – Comparaison des graphes étroits et circulaires



La figure 18, par exemple, montre que l'indice δ a des valeurs opposées à celles attendues selon l'expérience empirique (nous nous attendrions

1. Voir ci-dessus note 2 page 38.

2. Les données sont tirées de l'*Encyclopaedia Britannica World Atlas*, éd. G. Donald Hudson (Chicago : William Benton publisher, Encyclopaedia Britannica, Inc. 1957).

TABLEAU 2 – Indices η et ι des pays sélectionnés

	RR	RR	HWY	HWY
	η	ι	η	ι
1. Tunisie	26.00	8.74	45.18	10.47
2. Ceylan	76.50	22.52	28.51	7.02
3. Ghana	53.50	16.21	43.95	12.58
4. Bolivie	90.20	33.98	35.41	11.65
5. Irak	65.62	21.00	34.12	8.12
6. Nigeria	201.63	58.36	48.90	15.19
7. Soudan	186.30	53.82	51.15	13.20
8. Thaïlande	99.56	36.34	45.40	14.54
9. France	43.61	7.50	25.79	4.75
10. Mexique	84.55	26.91	46.95	12.38
11. Yougoslavie	28.25	7.96	32.66	6.42
12. Suède	34.22	10.48	46.66	6.49
13. Pologne	34.51	10.83	25.50	5.52
14. Tchécoslovaquie	30.27	11.98	22.41	5.15
15. Hongrie	15.40	4.09	22.88	5.57
16. Bulgarie	23.89	9.02	27.04	6.85
17. Finlande	32.97	9.35	22.64	5.52
18. Angola	122.54	67.40	76.57	19.65
19. Algérie	48.36	10.74	56.57	13.84
20. Cuba	29.75	10.45	32.26	8.85
21. Roumanie	27.92	6.88	27.25	6.77
22. Malaisie	51.30	11.50	34.36	8.91
23. Iran	177.11	43.08	53.44	12.41
24. Turquie	73.56	26.33	27.78	6.89
25. Chili	16.62	5.17	39.20	9.57

RR : voie ferrée ; HWY : réseau autoroutier

probablement à trouver le réseau de type A dans une région moins développée). Certaines valeurs des indices η et ι ¹ étant plus élevées que prévu (par exemple au Chili), nous avons décidé de mesurer la forme de tous les pays pour voir si elle a une influence significative sur les résultats. Une mesure arbitraire de la forme a été conçue. L'axe le plus grand traversant le pays a été déterminé par inspection visuelle². Un deuxième axe, perpendiculaire au premier et le coupant à son point médian, a été mesuré. La mesure de la forme (S) est le rapport entre la longueur de l'axe le plus long et la longueur

1. L'indice ι crée des résultats inversés : des valeurs élevées sont attribuées aux pays moins développés économiquement, des valeurs faibles aux pays très développés. En d'autres termes, la phrase doit être rédigée sous la forme : ... Les valeurs de l'indice ι sont plus faibles qu'attendu.

2. Utilisant Bartholomew, *op. cit.*

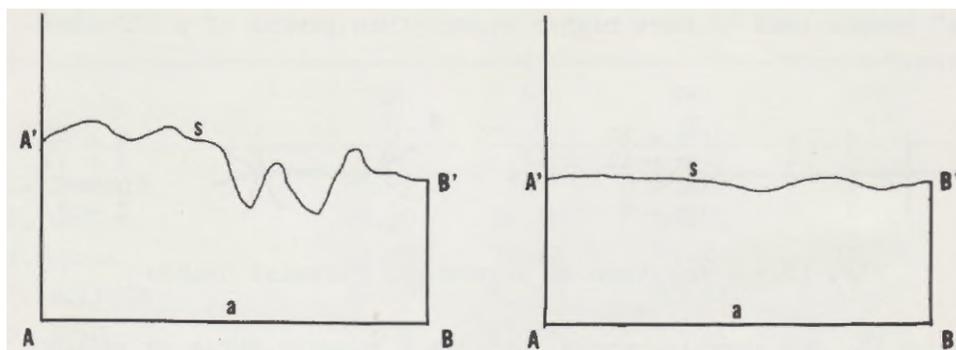
de l'axe perpendiculaire

$$S = \frac{A_l}{A_p} \quad (3.5)$$

où S est la forme, A_l la longueur de l'axe le plus long et A_p la longueur de l'axe perpendiculaire. Bien que cet indicateur ne soit pas entièrement satisfaisant, il autorise une estimation rapide et utile de la forme d'un pays.

Le relief est un autre indicateur conçu de manière arbitraire, exprimant les variations verticales du relief des zones étudiées. À l'aide de chiffres aléatoires, trois axes ont été placés à travers chaque zone étudiée¹. Une coupe transversale a été construite le long de chaque axe (voir figure 19).

FIGURE 19 – L'indice de relief



Comme le montre la figure 19, les variations verticales du relief peuvent être mesurées en comparant la distance à vol d'oiseau a entre A et B avec la « distance en surface » s entre A' et B' . La distance en surface est toujours supérieure ou égale à la distance à vol d'oiseau. Si l'on considère que la distance à vol d'oiseau est de 100 % alors la distance en surface est supérieure (ou égale dans les cas extrêmes) à 100 %. En additionnant la différence entre la longueur à vol d'oiseau et la distance en surface pour les 3 cas et en divisant par trois, on obtient un nombre représentatif du relief. L'indicateur de relief pour chaque pays est donc

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} (s - a)}{3} \quad (3.6)$$

où s est la distance en surface en miles et a la distance à vol d'oiseau en miles.

1. *Ibid.*

Données

Le tableau d'entrée (voir tableau 3) contient les données utilisées dans les calculs. Avant d'effectuer les calculs, toutes les variables dépendantes et indépendantes ont été testées par une analyse graphique afin de déterminer si des relations linéaires ou curvilinéaires existaient entre les observations. Sur la base de cette analyse, les quatre variables dépendantes (η_{RR} , ι_{RR} , η_{HWY} , ι_{HWY}) ont été transformées comme suit¹ :

TABLEAU 3 – Données

	η_{RR}	ι_{RR}	η_{HWY}	ι_{HWY}	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1. Tunisie	0.150	0.941	0.218	1.019	351	32	4.683	2.677	5.51
2. Ceylan	0.275	1.352	0.162	0.846	323	14	4.403	2.510	3.54
3. Ghana	0.237	1.209	0.215	1.099	355	15	4.962	2.506	2.83
4. Bolivie	0.291	1.531	0.190	1.066	370	18	5.627	2.135	20.00
5. Irak	0.259	1.322	0.185	0.909	344	25	5.234	2.376	2.21
6. Nigeria	0.362	1.766	0.227	1.181	394	0	5.530	2.164	3.60
7. Soudan	0.356	1.730	0.232	1.120	410	6	5.985	2.093	4.48
8. Thaïlande	0.300	1.560	0.219	1.162	400	9	5.297	2.245	5.41
9. France	0.214	0,875	0.149	0.676	125	38	5.327	1.468	12.04
10. Mexique	0.284	1.429	0.223	1.092	222	19	5,881	2.422	20.96
11. Yougoslavie	0.151	0.900	0.180	0.807	241	16	4.994	2.553	23.25
12. Suède	0.185	1.020	0.222	0.812	154	55	5.239	2.872	8.34
13. Pologne	0.186	1.034	0.148	0.741	182	25	5.080	2.155	3.15
14. Tchécoslovaquie	0.170	1.078	0.130	0.711	159	38	4.693	2.706	13.93
15. Hongrie	0.074	0.611	0.133	0.745	221	29	4.555	2.521	5.94
16. Bulgarie	0.139	0.955	0.155	0.835	279	47	4.631	2.438	12.97
17. Finlande	0.181	0.970	0,131	0.741	202	46	5.114	2.780	0.35
18. Angola	0.319	1.828	0.275	1.293	438	28	5.682	1.809	1.42
19. Algérie	0.226	1.031	0.243	1.141	323	26	5.963	1.230	1.52
20. Cuba	0.168	1.019	0.178	0.946	256	37	4.645	2.979	12.78
21. Roumanie	0.160	0.837	0.156	0.830	258	23	4.962	2.135	25.01
22. Malaisie	0.233	1.060	0.186	0.949	256	17	4.705	2.159	19.51
23. Iran	0.351	1.634	0.237	1.093	372	12	5.803	2.422	8.50
24. Turquie	0.271	1.420	0.159	0.838	283	8	5.481	2.692	19.45
25. Chili	0.086	0.713	0.202	0.980	239	24	5.456	3.100	66.80

x_1 = Échelle technologique, x_2 = Échelle démographique, x_3 = Taille,
 x_4 = Forme, x_5 = Relief.

1. L'analyse de régression multiple est basée sur l'hypothèse d'une distribution linéaire des valeurs. Afin de satisfaire à cette exigence, il faut transformer les variables non linéairement distribuées en valeurs logarithmiques. Pour une discussion détaillée des transformations, voir A. C. Rosander, *Elementary Principles of Statistics*. (New York : D. Van Nostrand, 1951).

1. η_{RR} - transformée en logarithme décimal de la valeur observée,
2. ι_{RR} - transformée en logarithme décimal de la valeur observée,
3. η_{HWY} - transformée en logarithme décimal de la valeur observée,
4. ι_{HWY} - transformée en logarithme décimal de la valeur observée.

Deux variables indépendantes ont été transformées de manière similaire :

1. taille - transformée en logarithme décimal de la valeur observée,
2. forme - transformée en logarithme décimal de la valeur observée.

Afin d'éviter les valeurs négatives sur l'échelle démographique (x_2), la constante vingt a été ajoutée à chaque observation puis les « données d'entrée » ont été soumises à une analyse de régression multiple.

Résultats

Les résultats des quatre analyses de régression exploratoires sont présentés dans le tableau 4. Ce tableau donne les valeurs des coefficients de régression. Chaque ligne du tableau 4 peut être substituée dans l'équation 3.4. Ainsi, le tableau 4 peut être écrit sous la forme de quatre équations représentant l'« influence » individuelle (b_i) des variables indépendantes sur la variable dépendante Y . Par exemple, la première ligne du tableau peut être écrite

$$Y = -.1757 + .0001x_1 - .0023x_2 + .0802x_3 + .0138x_4 - .0025x_5 + e \quad (3.7)$$

où $Y = \eta_{RR}$, x_1 = échelle technologique, x_2 = échelle démographique, x_3 = taille, x_4 = forme et x_5 = relief, toutes les valeurs étant transformées.

TABLEAU 4 – Coefficients de régression

Y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	a
1. η_{RR}	.0001	-.0023	.0802	.0138	-.0025	-.1757
2. ι_{RR}	.0014	-.0064	.3366	.1738	-.0093	-1.0992
3. η_{HWY}	.0003	.0007	.0423	.0027	.0002	-.1424
4. ι_{HWY}	.0016	.0013	.1169	-.0062	.0014	-.1547

Les coefficients de corrélation (R) et les coefficients de détermination (R^2) permettent d'estimer la fiabilité des modèles de régression (tableau 5). Les scores sont ajoutés progressivement le long des lignes de telle sorte que la première valeur de R^2 révèle la proportion de la variance de Y expliquée par la première variable indépendante (x_1). La deuxième valeur peut être interprétée comme la proportion de la variance de Y expliquée par la première (x_1) et la deuxième variable (x_2). La dernière valeur révèle la proportion

totale de la variance de Y qui est expliquée par les cinq variables (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) agissant simultanément.

TABLEAU 5 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Techno.	Démo.	Taille	Forme	Relief
1. η_{RR}	R	.66	.71	.80	.80	.88
	R^2	.43	.51	.63	.65	.77
2. ι_{RR}	R	.73	.75	.81	.81	.87
	R^2	.54	.57	.66	.66	.76
3. η_{HWY}	R	.67	.68	.82	.82	.82
	R^2	.45	.46	.66	.67	.67
4. ι_{HWY}	R	.84	.84	.90	.90	.90
	R^2	.71	.71	.80	.80	.81

Par exemple, la valeur de .81 dans la dernière colonne et la dernière ligne indique que 81% de la variation de ι pour les autoroutes est expliquée par les variables (x_1, x_2, \dots, x_5).

Le tableau 6 contient les erreurs types des estimations et indique plus précisément la pertinence des équations de régression. Par exemple, si nous calculons la valeur η_{RR} pour la Tunisie (observation 1) en utilisant l'équation 3.4, elle sera probablement différente de la valeur observée. En soustrayant la valeur calculée de la valeur observée, on obtient l'écart de la valeur réelle par rapport à la valeur attendue. L'erreur type de l'estimation est l'écart type de ces déviations pour toutes les observations. Une distribution visuelle des erreurs types est fournie par la figure 20. Les entrées sont les erreurs types pour tous les pays tels qu'ils sont estimés par les modèles de régression ι_{RR} et ι_{HWY} du tableau 4. Les scores qui se situent près de la ligne du 0 sont de « bonnes »¹ estimations et inversement.

TABLEAU 6 – Erreur type des estimations

Y	Erreur type des estimations
1. η_{RR}	.043
2. ι_{RR}	.190
3. η_{HWY}	.026
4. ι_{HWY}	.007

Le tableau 7 présente la relation entre toutes les variables dépendantes et indépendantes d'une autre manière. Ces rapports de variance sont utilisés pour tester la signification statistique des variables indépendantes. Ils révèlent quelles sont les variables indépendantes qui contribuent de manière

1. Les guillemets indiquent que le mot est utilisé dans un sens non défini.

significative à l'explication de la variance de la variable dépendante. Les entrées accompagnées d'un astérisque (*) sont significatives au seuil de 5%, deux astérisques (**) désignent des valeurs significatives au seuil de 1%¹.

TABLEAU 7 – Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)

Y	Technologie	Démographie	Taille	Forme	Relief
1. η_{RR}	17.30**	3.45	7.38*	.61	10.26**
2. ι_{RR}	25.62**	1.49	5.79*	.14	7.35*
3. η_{HWY}	18.69**	.33	13.08**	.14	.14
4. ι_{HWY}	55.00**	.01	10.25**	.09	.86

Interprétation

Nous ne tenterons pas d'interpréter complètement les résultats des régressions². Les quatre régressions sont considérées comme des approches exploratoires du problème. Les données présentées dans le tableau 5 montrent qu'il existe une forte corrélation entre toutes les variables dépendantes (η_{RR} , ι_{RR} , η_{HWY} , ι_{HWY}) et l'échelle technologique. Cette corrélation est significative (tableau 7). Ainsi, la corrélation hypothétique entre les indicateurs proposés des réseaux de transport et les caractéristiques économiques n'est pas infirmée par les preuves empiriques. La deuxième condition de l'équation 2.29 est satisfaite. Donc $Q = S$, ce qui implique que nous acceptons les indices η et ι comme des indicateurs valides de la structure des réseaux de transport³ dans le but de comparer ces réseaux et le développement économique des pays.

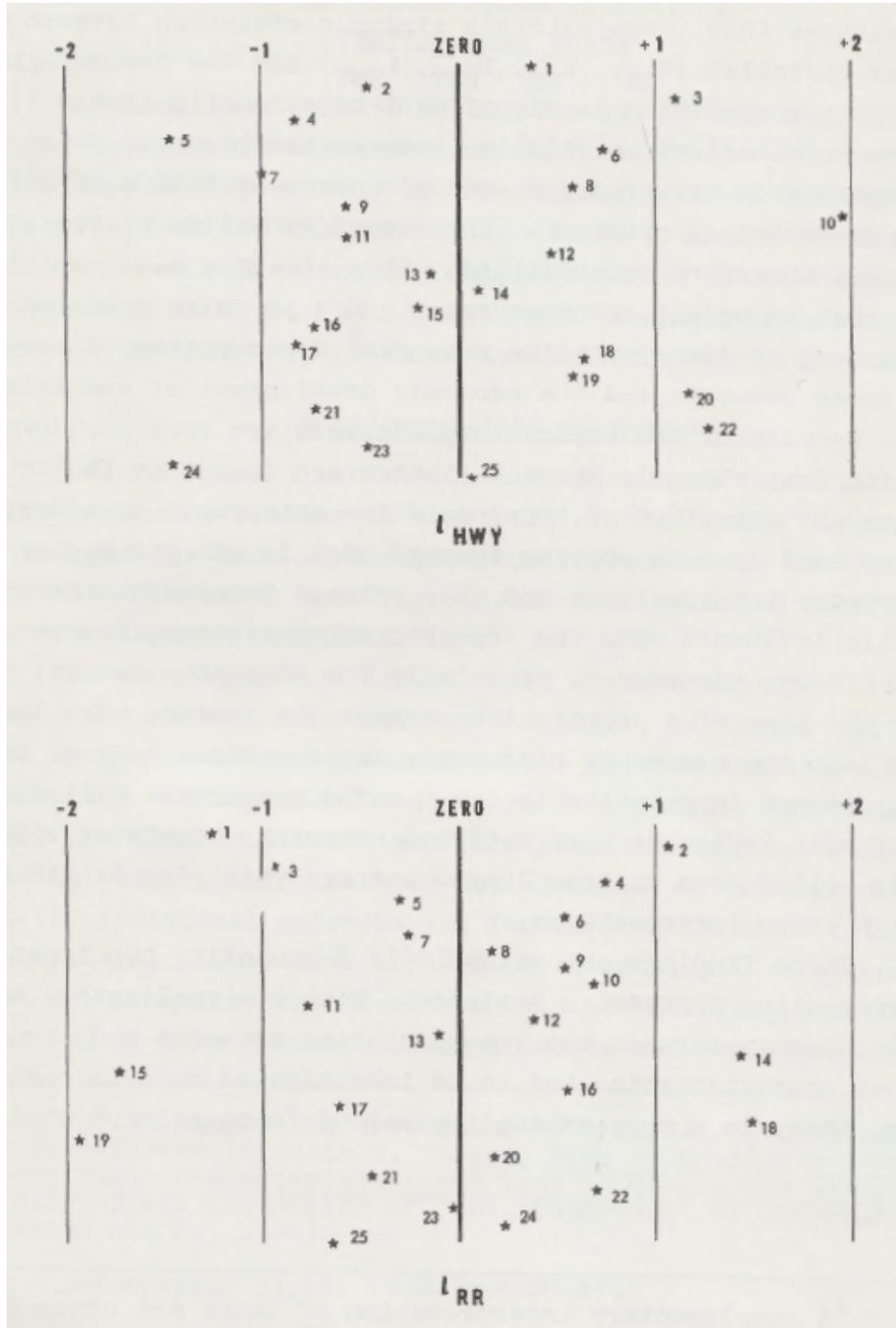
Les résultats des analyses exploratoires sont très encourageants et indiquent que les caractéristiques économiques sont le principal facteur influençant la structure des réseaux de transport. Les pays plus développés ont tendance à avoir une longueur moyenne d'arête plus courte et un nombre plus élevé d'intersections d'ordre élevé et vice versa. La structure démographique a peu d'influence sur les réseaux de transport. La taille a une certaine importance, en particulier pour les réseaux routiers : plus le pays est grand, plus la longueur moyenne de l'arête est élevée et moins le nombre d'intersections d'ordre supérieur est élevé. La forme n'a pas d'importance pour les indices

1. En disant qu'une valeur est significative au seuil de 5% (ou de 1%), nous voulons dire que nous sommes prêts à accepter avec une probabilité de 5 sur 100 (ou de 1 sur 100) que le résultat ne soit en fait pas significatif.

2. Une interprétation complémentaire de ces analyses de régression est présentée dans le chapitre VII.

3. De la même manière, nous avons pu exprimer la validité des autres indicateurs proposés pour analyser les réseaux de transport par simple substitution, comme indiqué dans le chapitre II, page 33.

FIGURE 20 – Écart entre les observations et les estimations sous forme de rapport entre les résidus et l'erreur type ajustée



η et ι . Le relief a une influence significative sur les réseaux ferroviaires : les pays où le relief est plus accidenté ont tendance à avoir une longueur moyenne

d'arête ferroviaire plus longue et moins d'intersections d'ordre supérieur.

Ces résultats sont précieux pour mobiliser les données d'entrée dans des analyses de régression plus approfondies. Sachant que la relation entre les réseaux de transport et les caractéristiques économiques et autres doit être étudiée plus intensivement, nous nous tournons donc vers un ensemble plus exhaustif d'études « explicatives ».

Chapitre IV

Variations entre pays : « phase explicative »

Les résultats du chapitre III révèlent que les relations entre la structure du réseau et les caractéristiques régionales peuvent être formulées de manière plus précise en étudiant trois hypothèses qui découlent de l'analyse des résidus des régressions². Ces hypothèses portent sur (1) la complémentarité des indicateurs, (2) les facteurs exogènes, (3) l'additivité des réseaux de transport. L'objectif de ce chapitre est de tester ces hypothèses.

Complémentarité des indicateurs

Les indices η et ι sont des indicateurs structuraux³ et bien qu'ils soient fondamentalement similaires dans leur construction⁴, des résultats légèrement différents sont apparus dans chacune des régressions précédentes. L'homogénéité générale a été perturbée par les variations des coefficients de corrélation et les fluctuations des résidus.

Imaginons la structure d'un réseau de transport donné comme un ensemble de relations entre ses arêtes, ses sommets et le réseau dans son ensemble. Les éléments de la structure du réseau (les arêtes, les sommets et l'ensemble) sont fonctionnellement interdépendants. Cependant, les résultats

2. Pour une discussion exhaustive de l'analyse des résidus, le lecteur est invité à consulter Edwin N. Thomas, *Maps of Residuals from Regression : Their Characteristics and Uses in Geographic Research* (Iowa City : State University of Iowa, Department of Geography. Publication no. 2., 1960).

3. Voir chapitre II, pp. 20-22 et 24-26.

4. L'indice ι est différent de l'indice η en ce sens que le nombre de sommets est comparé au kilométrage total du réseau et non au nombre d'arêtes. De plus, les sommets d'ordre supérieur sont mis en évidence par une technique de pondération

numériques des chapitres précédents suggèrent que les relations fonctionnelles entre les éléments des réseaux sont différentes pour les différents types de réseaux de transport. Il ne semble donc pas y avoir de relation simple entre les éléments structurels singuliers des réseaux de transport. Deux indicateurs ou plus décrivant la structure du réseau peuvent donc évaluer différents éléments structurels ou différentes propriétés du réseau et on doit donc s'attendre à obtenir des résultats différents.

Puisque les indicateurs structurels proposés mesurent différentes relations structurelles entre les éléments des réseaux (voir le chapitre II), cela implique que deux indicateurs structurels ou plus sont capables de décrire la structure du réseau de manière plus adéquate qu'un seul indicateur. Les indicateurs proposés ci-dessus sont donc complémentaires.

Afin d'estimer l'intensité et le sens de cette complémentarité, nous avons analysé trois indicateurs supplémentaires : β , π et v dans les analyses de régression « explicatives » de ce chapitre¹.

Données

Les données d'entrée des analyses de régression « explicatives » sont similaires à celles des régressions précédentes. Cependant, dans certains cas, la sélection des variables indépendantes a été modifiée et les variables dépendantes sont complémentaires de celles incluses dans la première série d'analyses de régression (chapitre III).

Les zones étudiées sont caractérisées par quatre variables indépendantes équivalentes à celles de la première série d'analyses de régression : (1) l'échelle technologique, (2) la taille, (3) le relief, (4) la forme. L'échelle technologique, indicateur représentatif des caractéristiques économiques, conserve la première place, l'indicateur de forme, identifié comme contributeur le moins significatif au modèle de régression dans les études exploratoires, est le dernier.

L'échelle technologique résume le caractère agrégé des économies². Si nous nous intéressons aux relations entre des aspects spécifiques des économies et les réseaux de transport, nous pouvons substituer à cette mesure d'autres indicateurs plus précis. Deux indicateurs sont utilisés dans ce chapitre afin d'examiner ces relations : la consommation énergétique brute et les importations par habitant³. En utilisant ces mesures, nous dupliquons

1. v n'est pas défini dans le chapitre II. Par définition, v est le nombre de sommets. Le processus de comptage des unités étant la forme de mesure la plus simple, il est justifié d'appeler le nombre de sommets la mesure v .

2. Voir note 2, page 38, chapitre III.

3. Ces deux indicateurs sont des indicateurs classiques du degré de développement économique; ils sont fréquemment utilisés à des fins similaires. Cependant, l'indicateur des importations par habitant n'a été appliqué qu'aux indices η et ι .

un certain nombre d'analyses de régression. Nous disons *dupliquer* parce que ces deux mesures sont fortement corrélées avec l'échelle technologique et que nous nous attendons donc à des résultats à peu près similaires¹.

Les écarts des régressions de la consommation brute d'énergie et des importations par habitant par rapport aux régressions de l'échelle technologique devraient suggérer le sens et l'intensité des relations entre les économies « partielles » et les réseaux de transport. La mesure de relations spécifiques peut être nécessaire à la formulation d'un modèle prédictif². Un deuxième résultat, non moins important, de la comparaison entre les différentes régressions est la base empirique des corrélations théoriques entre les indicateurs.

Le choix des variables dépendantes a été influencé par l'analyse spatiale des résidus. Afin d'examiner le concept de « complémentarité des mesures », nous avons inclus les indicateurs suivants des réseaux de transport comme variables dépendantes dans la phase explicative des analyses de régression multiple : (1) l'indice β appliqué aux chemins de fer, (2) l'indice π appliqué aux chemins de fer et (3) l'indice v (nombre de sommets) appliqué aux chemins de fer.

Sur la base d'un test graphique, les variables dépendantes ont été transformées. Chaque valeur observée de l'indice β , π et v a été convertie en logarithme décimal. Les données ainsi transformées sont incluses dans les tableaux 8 et 9. Ces résultats ont été soumis à une analyse de régression multiple, toujours à l'aide de l'ordinateur Univac I³ de l'Université de Chicago.

Résultats

Par souci de concision, nous ne présentons ici que les coefficients de régression et les valeurs exprimant le degré de fiabilité des analyses de régression⁴ (tableaux 10-13).

TABLEAU 8 – Variables dépendantes

	β_{RR}	π_{RR}	v_{RR}	β'_{RR}	η'_{RR}	ν'_{RR}
1.	2.021	.1652	.2232	1.903	.1556	.2769
2.	1.939	.1781	.1452	1.748	.2567	.3510
3.	1.963	.0916	.0704	1.863	.2365	.3442
4.	1.959	.1112	.1649	1.857	.3242	.3527

1. Voir Berry in Ginsburg, *op. cit.*, p. 113.

2. Voir chapitre VIII.

3. Premier ordinateur commercialisé aux États-Unis à partir de 1951. 46 exemplaires au total ont été commercialisés. Le coût étant trop élevé pour la plupart des universités, plusieurs machines ont été offertes à ces dernières (source [wikipedia](#)).

4. Pour l'interprétation de ces valeurs numériques, voir le chapitre III, pages 47-48.

5.	2.000	.0986	.1142	1.903	.2671	.3479
6.	2.000	.1547	.0704	1.863	.3617	.4418
7.	2.000	.1583	.1142	1.812	.3751	.4332
8.	2.000	.1414	.1604	1.875	.3184	.3879
9.	2.149	.3866	.4271	2.093	.2156	.2600
10.	2.025	.2357	.3488	1.939	.2864	.3765
11.	2.068	.2960	.3831	1.991	.1649	.2636
12.	2.110	.3220	.4005	2.056	.1886	.3038
13.	2.155	.3443	.4102	2.086	.1920	.2895
14.	2.136	.3249	.3822	2.041	.1693	.2780
15.	2.143	.3273	.3886	2.064	.0806	.1852
16.	2.045	.2235	.2842	1.959	.1812	.2787
17.	2.008	.2195	.3081	1.919	.1849	.2853
18.	1.819	.1142	.0174	1.732	.3567	.4116
19.	2.012	.2046	.2615	1.913	.2345	.2979
20.	2.082	.2137	.2960	2.004	.1693	.3049
21.	2.064	.2819	.3774	1.991	.1604	.2484
22.	1.977	.1149	.1649	1.832	.2688	.3236
23.	1.954	.1051	.0330	1.875	.3516	.4206
24.	2.012	.2198	.2780	1.913	.2794	.3645
25.	2.130	.0927	.3236	1.995	.1212	.2911
	η'_{HWY}	ι'_{HWY}	$\eta' + \eta'$	$\iota' + \iota'$	$\beta + \beta$	$\beta' + \beta'$
1.	1.691	0.954	1.885	1.225	2.19	1.61
2.	1.468	0.834	1.970	1.387	2.29	1.76
3.	1.665	0.976	1.999	1.409	2.02	1.62
4.	1.604	1.009	2.229	1.515	2.00	1.70
5.	1.597	0.836	2.046	1.376	2.23	1.86
6.	1.680	1.123	2.397	1.855	2.29	1.90
7.	1.700	1.095	2.379	1.806	2.14	1.59
8.	1.678	1.091	2.228	1.603	2.19	1.77
9.	1.397	0.649	1.840	1.044	2.73	2.41
10.	1.679	1.064	2.129	1.551	2.27	1.96
11.	1.540	0.741	1.804	1.091	2.30	1.91
12.	1.472	0.788	1.807	1.216	2.48	2.18
13.	1.431	0.674	1.800	1.134	2.85	2.39
14.	1.416	0.584	1.755	1.069	2.67	2.08
15.	1.406	0.623	1.625	0.881	2.66	2.14
16.	1.462	0.716	1.792	1.119	2.42	1.94
17.	1.376	0.721	1.764	1.138	2.50	2.17
18.	1.892	1.251	2.426	1.747	1.93	1.69
19.	1.805	1.091	2.065	1.343	2.48	2.02
20.	1.521	0.946	1.805	1.285	2.28	1.83
21.	1.472	0.745	1.765	1.059	2.54	2.12

22.	1.563	0.919	2.037	1.324	2.18	1.75
23.	1.742	1.053	2.366	1.735	2.14	1.86
24.	1.453	0.818	2.036	1.435	2.38	2.11
25.	1.646	0.917	1.820	1.237	2.43	1.83

TABLEAU 9 – Variables indépendantes

Observation	Consommation énergétique brute	Importations par habitant
1.	.1812	1.659
2.	.1504	1.647
3.	.1793	1.691
4.	.1812	1.423
5.	.1338	1.815
6.	.1065	1.149
7.	.1277	1.212
8.	.1338	1.287
9.	.3567	2.129
10.	.2567	1.597
11.	.2129	1.530
12.	.3762	2.504
13.	.3531	1.607
14.	.3912	1.992
15.	.3098	1.795
16.	.2046	1.617
17.	.3562	2.291
18.	.1504	1.454
19.	.1734	2.009
20.	.3161	2.112
21.	.2299	1.641
22.	.2156	1.995
23.	.1504	1.167
24.	.2016	1.187
25.	.2755	1.810

Ce tableau ne présente que deux variables : x'_i (consommation énergétique brute) et x''_i (importations par habitant); toutes deux tirées de *Atlas of Economic Development*, éd. N. S. Ginsburg (Chicago : University of Chicago Press, 1961), pp. 80-104. Pour certaines régressions, ces deux variables (x'_i et x''_i) ont été introduites dans l'analyse à la place de x_1 (échelle technologique). Pour l'ensemble original des variables indépendantes (x_1, x_2, x_3, x_4) voir le tableau 3.

La robustesse des modèles est évidente dans le tableau 11.

TABLEAU 10 – Coefficients de régression

Y	Échelle technologique				Intercept a
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1. β_{RR}	-.6838	-.0055	.0007	.0015	2.2429
2. π_{RR}	-.9218	-.0050	-.0016	-.0394	.6087
3. v_{RR}	-1.3047	-.0056	.0011	-.0240	.6922
	Consommation énergétique brute				Intercept a
	x'_1	x_2	x_3	x_4	
1'. β_{RR}	.6410	-.0065	.0012	-.0097	1.9240
2'. π_{RR}	.8202	-.0294	-.0006	-.0688	.3410
3'. v_{RR}	1.1710	-.0397	.0026	-.0660	.3091

TABLEAU 11 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y	Échelle technologique				
		x_1	x_2	x_3	x_4
1. β_{RR}	R	.80	.80	.81	.81
	R^2	.64	.64	.66	.66
2. π_{RR}	R	.79	.79	.85	.86
	R^2	.62	.62	.72	.75
3. v_{RR}	R	.89	.89	.90	.90
	R^2	.80	.80	.81	.81
	Consommation énergétique brute				
		x'_1	x_2	x_3	x_4
1'. β_{RR}	R	.74	.75	.77	.77
	R^2	.55	.56	.60	.60
2'. π_{RR}	R	.73	.73	.76	.81
	R^2	.54	.54	.59	.66
3'. v_{RR}	R	.82	.82	.84	.86
	R^2	.67	.67	.70	.74

Le tableau 12 suggère lesquels des R^2 cumulés du tableau 11 augmentent significativement l'explication de la variance de la variable dépendante.

Il ressort du tableau 12 que la contribution de la première variable indépendante (x_1 et x'_1) à l'explication des variations des variables dépendantes (β_{RR} , π_{RR} , v_{RR}) est hautement significative. La variable x_3 ne contribue significativement au seuil de 5% que dans la deuxième régression. Ces résultats impliquent que seules les variables x_1 , x_2 et x_3 devraient être examinées

TABLEAU 12 – Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)

Y	Échelle technologique	Taille	Relief	Forme
	x_1	x_2	x_3	x_4
1. β_{RR}	42.08**	.01	.92	.00
2. π_{RR}	39.11**	.00	7.71*	1.93
3. v_{RR}	95.64**	.09	.73	.46
	Consommation énergétique brute	Taille	Relief	Forme
	x'_1	x_2	x_3	x_4
1'. β_{RR}	29.00**	.50	2.01	.11
2'. π_{RR}	27.36**	.76	2.31	4.26
3'. v_{RR}	47.25**	.51	2.57	2.42

*significatif au seuil de 5%.

**significatif au seuil de 1%.

pour leur signification théorique et empirique.

Le tableau 13 présente les erreurs types des estimations pour les six analyses de régression. Ces valeurs peuvent être considérées comme des valeurs complémentaires exprimant le pouvoir explicatif des régressions.

Ce tableau fournit des informations sur la fiabilité des régressions. Chaque valeur est un écart type des résidus. Les écarts de β_{RR} , de la régression (1) se situent donc dans une fourchette plus ou moins .0506 des valeurs observées dans 66% des cas.

TABLEAU 13 – Erreur type des estimations

Y	Erreur type des estimations
1. β_{RR}	.0506
2. π_{RR}	.0489
3. v_{RR}	.0610
1'. β_{RR}	.0545
2'. π_{RR}	.0573
3'. v_{RR}	.0729

Interprétation

Il est évident que l'échelle technologique et la consommation énergétique brute sont fortement corrélées à tous les indicateurs des réseaux de transport¹. Ce constat a également été fait au chapitre III². Cependant, la force

1. La signification pratique de ces résultats est discutée au chapitre VII.

2. Voir tableau 5, page 48.

des corrélations est moindre pour x'_1 (consommation énergétique brute) que pour x_1 (échelle technologique).

L'échelle technologique est corrélée négativement avec β , π et v . Par conséquent, plus le score de l'échelle technologique est faible, plus les valeurs de β , π et v sont élevées. Cela signifie que les pays plus développés économiquement ont tendance à avoir : (1) moins d'intersections et de terminaux pour un nombre constant de routes¹; (2) une forme de réseau telle que la longueur des routes du réseau par unité de diamètre est élevée²; (3) un nombre plus élevé de sommets.

La variable x'_1 (consommation énergétique brute) est positivement corrélée avec β , π et v . Plus la consommation brute d'énergie d'un pays donné est élevée, plus les valeurs de β , π et v sont élevées. En tant que mesure d'un secteur de l'économie, cet indicateur ne représente pas l'économie dans son ensemble. Il s'agit d'une mesure partielle qui présente une « corrélation partielle » avec les indicateurs. (Cette corrélation peut s'écrire en utilisant les termes définis ci-dessous à la page 70 : $s_i \ r \ t_i$). Pour cette raison, il n'est pas surprenant que cette mesure ait une corrélation plus faible avec les indicateurs de transport que le résumé synthétique exprimé par l'échelle technologique. (La corrélation de l'échelle technologique peut s'écrire : $s_i \ r \ (t_1, t_2, \dots, t_n)$; voir ci-dessous page 70).

En comparant le score de l'indice β avec les valeurs équivalentes des indices π et v (tableau 11), nous réalisons que les scores des indicateurs sont différents, même si tous les indicateurs structurels sont fortement corrélés avec les indicateurs économiques (x_1 et x'_1). Ainsi, chaque indicateur structurel évalue la structure du réseau d'une manière différente mais complémentaire. Les résultats soutiennent donc le concept de « complémentarité des indicateurs ».

Le degré de complémentarité et la direction de l'association entre les indicateurs de réseau peuvent également être déduits par une simple analyse de corrélation. Le tableau 14 présente les résultats.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette matrice : (1) aucun coefficient de corrélation n'atteint la valeur 1. Par conséquent, chaque indicateur structurel est différent de tous les autres indicateurs. (2) Il existe deux groupes d'indicateurs : (a) les indicateurs indépendants de la taille des réseaux étudiés (β , β' , π) et (b) les indicateurs dépendants de la taille (η , η' , ι , ι')³. (3) Il existe une corrélation inverse entre le premier et le second

1. Voir chapitre II, page 15 et sq.

2. Voir chapitre II, page 22.

3. Cette constatation n'est pas complètement nouvelle pour nous; la construction des indicateurs, rapportée dans le chapitre II, en témoigne. Cette conclusion prouve toutefois que les énoncés théoriques du chapitre II sont en harmonie avec ces résultats empiriques.

TABLEAU 14 – Matrice de corrélation

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. β_{RR}												
2. β'_{RR}	.95											
3. η_{RR}	-.68	-.69										
4. η'_{RR}	-.73	-.73	.98									
5. ι_{RR}	-.73	-.73	.95	.95								
6. ι'_{RR}	-.69	-.73	.93	.93	.95							
7. π_{RR}	.73	.80	-.47	-.54	-.53	-.63						
8. β_{HWY}	.02	.07	.00	-.04	-.09	-.16	.38					
9. β'_{HWY}	-.21	-.12	.34	.30	.22	.16	.19	.86				
10. η_{HWY}	-.59	-.57	.57	.60	.60	.67	-.58	-.37	-.17			
11. η'_{HWY}	-.64	-.64	.54	.59	.59	.63	-.68	-.33	-.19	.93		
12. ι_{HWY}	-.70	-.73	.64	.69	.70	.74	-.74	-.36	-.16	.90	.94	
13. ι'_{HWY}	-.72	-.74	.69	.73	.73	.78	-.73	-.33	-.08	.90	.92	.97

groupe d'indicateurs.

Facteurs exogènes

Une analyse spatiale des résidus des régressions précédentes a révélé que les pays dont les valeurs sont surestimées sont des pays dont les réseaux de transport sont fortement interconnectés avec les systèmes de transport des unités politiques environnantes¹. La carte des résidus a donc suggéré une nouvelle variable indépendante, le « degré d'influence extérieure ». Sur la base de cette suggestion, on a émis l'hypothèse que certaines caractéristiques de la structure du réseau existent en raison de facteurs, économiques et autres, situés en dehors des zones d'étude. Cette notion, bien que généralement connue, n'a été formulée que de façon intuitive dans des études antérieures².

Dans le chapitre précédent, les pays ont été considérés comme les unités de base de l'observation. Ainsi, on a supposé que les pays, tels qu'ils sont délimités par les frontières internationales, sont des régions fonctionnelles³. Cela

Les formes ajustées des indicateurs structurels (β' , η' , ι') sont définies ci-dessous à la page 61.

1. Le fait d'avoir choisi un réseau insulaire pour tester ses indicateurs ne permettait sans doute pas d'anticiper ces résultats. Dans le rapport de Garrison et Marble (1962) où certains de ces indicateurs étaient testés, seuls des réseaux aériens intra-nationaux ont été étudiés.

2. Voir par exemple William S. Peters, « The Transportation Network as a Region », *Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Conference of the Western Economic Association*, 1959.

3. Par *région fonctionnelle*, nous entendons ici un territoire qui peut être défini en fonction d'un ou de plusieurs critères fonctionnels ; par exemple, une région de transport

implique qu'une grande importance a été accordée à au moins une des fonctions des frontières internationales, à savoir l'« effet de blocage »¹. Bien que l'effet de blocage des frontières internationales disparaisse à certains endroits avec l'organisation récente de communautés économiques supranationales, les frontières internationales peuvent être considérées comme limitant les régions fonctionnelles et il est certain qu'historiquement, une grande partie du développement des transports a été réalisée à l'intérieur de ces frontières sur la base de politiques nationales distinctes.

Pour tenir compte de cette présomption, nous avons modifié le modèle de régression original et inclus un « facteur exogène » dans l'analyse de régression. Il y avait deux possibilités : (1) mesurer le « facteur exogène » et inclure les valeurs obtenues dans la formule de régression en tant que nouvelle variable indépendante ; (2) ajuster les indicateurs des réseaux de transport en fonction du « facteur exogène ». Pour des raisons opérationnelles, nous avons opté pour la deuxième méthode.

Les indicateurs initiaux des réseaux de transport ont été adaptés² en conséquence sur la base du raisonnement suivant : puisqu'il est évident que les voies de transport qui traversent les frontières des zones étudiées sont des instruments d'échanges, économiques et autres, le nombre ou le caractère des voies qui se terminent dans les régions situées en dehors des zones étudiées est une mesure approximative des échanges interrégionaux ou une mesure du « facteur exogène ». En appliquant cette notion aux indices β et η , les définitions originales de ces indicateurs ont été adaptés comme suit :

(1) Indice bêta $\beta = \frac{e}{v}$ adapté

$$\beta' = \frac{e}{v + v_E} \quad (4.1)$$

où v_E est le nombre d'arêtes traversant la frontière³.

(2) Indice éta $\eta = \frac{M}{e}$ adapté

$$\eta' = \frac{M + M_e}{e} \quad (4.2)$$

où M est le kilométrage total du réseau de la région, M_e est le kilométrage total de toutes les routes traversant la frontière et e le nombre total d'arêtes.

peut être définie par ses flux de circulation.

1. Par le terme *effet de blocage*, nous entendons dans cette étude le fait que les frontières internationales limitent à des degrés divers les flux de communication entre les zones situées de part et d'autre des frontières considérées. Ce phénomène a été examiné notamment par J. Ross MacKay, « The Interactance Hypothesis and Boundaries in Canada : A Preliminary Study », *The Canadian Geographer*, No. 11 (1958), pp. 1-8.

2. J'ai parfois traduit « adjusted » par adapté, le plus souvent par ajusté.

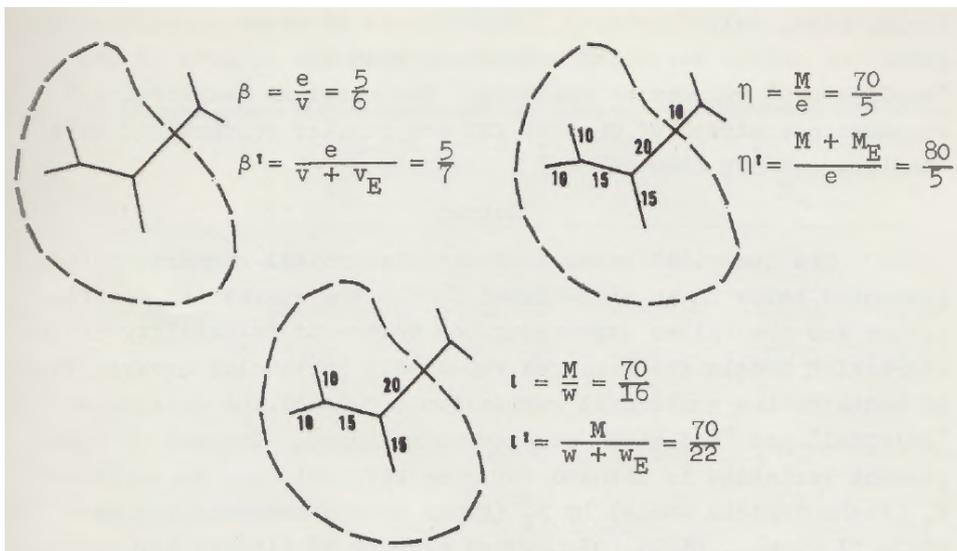
3. Le fait de choisir le symbole v pour un ensemble d'arêtes est surprenant d'un point de vue logique.

(3) Indice iota $\iota = \frac{M}{w}$ adapté ainsi

$$\iota' = \frac{M}{w + w_E}, \quad (4.3)$$

où M est le kilométrage total, w le nombre total de sommets pondérés et w_E le nombre total de sommets pondérés situés à l'étranger et adjacents à des routes traversant les frontières (voir figure 21).

FIGURE 21 – Indices ajustés



À l'aide de ces indicateurs ajustés, un ensemble différent de données a été calculé et inclus dans les analyses de régression « explicatives ». Une comparaison mutuelle entre les résultats des analyses « originales » et « ajustées » devrait contribuer à notre compréhension de la nature et de l'ampleur du facteur exogène.

Données

Les valeurs des indicateurs ajustés sont présentés dans le tableau 8. Les valeurs de β'_{RR} , η'_{HWY} , et ι'_{HWY} ont été transformées en logarithmes décimaux ; les indices η'_{RR} et ι'_{RR} en logarithme décimal [du logarithme décimal¹] de la valeur observée. Les caractéristiques régionales ont été illustrées par le même ensemble de variables indépendantes que dans les analyses précédentes². La variable d'échelle technologique a de nouveau été dupliquée par

1. La répétition est présente dans le texte original, les crochets soulignent une probable coquille.

2. Voir ci-dessus, page 53.

l'indice de consommation énergétique brute et par la mesure des importations par habitant.

Afin d'accroître la fiabilité de la comparaison entre les valeurs « originales » et « ajustées », et pour éviter d'éventuelles divergences et de possibles objections, nous avons répété les analyses de régression « exploratoires » du chapitre III sous une forme modifiée. Nous avons soumis, simultanément aux analyses de régression de ce chapitre, les valeurs de η'_{RR} , η'_{HWY} , ι'_R et ι'_{HWY} à des analyses de régression multiple avec le nouvel ensemble de variables indépendantes (échelle technologique, taille, relief, forme). Les résultats de ces régressions répétées doivent servir à la comparaison avec les résultats des analyses de régression « explicatives ». Les analyses de régression « exploratoires » du chapitre III sont similaires à celles de ce chapitre mais elles ne sont pas comparables¹.

Résultats

Les résultats des comparaisons statistiques sont présentés ci-dessous sous une forme abrégée. Les coefficients de régression et les valeurs exprimant le degré de fiabilité des modèles de régression sont présentés de manière répétée dans des tableaux. Le tableau 15 contient les modèles de régression des indicateurs structurels « originaux » et « ajustés ». L'ensemble des variables indépendantes a été modifié pour certaines régressions. Nous avons remplacé x_1 (échelle technologique) par x'_1 (consommation énergétique brute) pour β'_{RR} , η'_{RR} , ι_{RR} , η'_{HWY} , ι'_{HWY} et par x_1'' (importation par habitant) pour η'_{RR} et ι'_{RR} .

Interprétation

Une comparaison visuelle des tableaux 16 et 17 suggère qu'il n'y a pas de tendance régulière dans les scores qui représentent l'intensité et la fiabilité des régressions étudiées ; pour certains indicateurs, la forme « ajustée » de l'indicateur semble être une estimation plus puissante de la relation entre la structure du réseau et les caractéristiques géographiques ; pour d'autres mesures, c'est le contraire. Une plus grande part de la variance de la forme ajustée des indices β et η (β'_{RR} , η'_{RR} , η'_{HWY}) est expliquée par les variables indépendantes que dans la forme « originale » de ces indicateurs. L'augmentation du pourcentage de variance « expliquée » est due, dans tous les cas, au degré plus élevé d'association entre les indices ajustés β' et η' et les caractéristiques économiques (échelle technologique). Une comparaison entre la forme ajustée et la forme originale de ι révèle une tendance inverse. L'échelle

1. Comme le lecteur peut s'en souvenir, dans le chapitre III les variables dépendantes η_{RR} , η_{HWY} , ι_R et ι_{HWY} étaient corrélées avec un ensemble de cinq variables indépendantes, disposées dans un ordre différent (échelle technologique, échelle démographique, taille, forme et relief).

technologique représente un pourcentage de variance plus faible dans les régressions avec la forme ajustée de l'indice ι que dans les régressions avec la forme originale. Cependant, toutes les variables indépendantes expliquent le même pourcentage global (.84 pour ι_{RR} et ι'_{RR}).

TABLEAU 15 – Coefficients de régression

	Échelle technologique	Taille	Relief	Forme	Intercept
	x_1	x_2	x_3	x_4	a
1. β'_{RR}	-.9480	.0121	.0001	.0024	2.1298
2. η_{RR}	.3646	.0852	-.0019	-.0051	-.3112
3. η'_{RR}	.4193	.0798	-.0012	-.0051	.2724
4. ι_{RR}	2.0341	.3505	-.0076	.1498	-1.4732
5. ι'_{RR}	.3844	.0745	-.0009	.0410	-.2585
6. η_{HWY}	.2319	.0408	-.0000	.0053	-.1007
7. η'_{HWY}	1.0567	.0990	.0013	-.0285	.8077
8. ι_{HWY}	1.4799	.1141	.0010	-.0015	-.0813
9. ι'_{HWY}	1.4177	.1507	.0006	.0140	-.3421
	Consommation énergétique brute	Taille	Relief	Forme	Intercept
	x'_1	x_2	x_3	x_4	a
1'. β'_{RR}	.8870	-.0107	.0011	-.0289	1.8363
3'. η'_{RR}	-.4190	.0886	-.0016	.0094	-.1314
5'. ι'_{RR}	-.3768	.0829	-.0013	.0542	-.1323
7'. η'_{HWY}	-.8730	.1305	.0000	.0033	1.0863
9'. ι'_{HWY}	-1.1721	.1929	-.0010	.0569	.0321
	Importations par habitant	Taille	Relief	Forme	Intercept
	x_1''	x_2	x_3	x_4	a
3''. η'_{RR}	-.0943	.0834	-.0019	-.0031	-.0070
5''. ι'_{RR}	-.0793	.0797	-.0016	.0429	-.0377

Pour les différences entre les valeurs de β_{RR} et β'_{RR} , comparez le modèle de régression 1. avec les valeurs correspondantes du chapitre IV, page 56.

TABLEAU 16 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Échelle technologique			
		x_1	x_2	x_3	x_4
1. β'_{RR}	R	.83	.83	.83	.83
	R^2	.69	.69	.69	.69
2. η_{RR}	R	.65	.77	.82	.82
	R^2	.42	.59	.68	.68
3. η'_{RR}	R	.69	.80	.83	.83
	R^2	.47	.65	.69	.70
4. ι_{RR}	R	.73	.80	.83	.84
	R^2	.53	.64	.69	.71
5. ι'_{RR}	R	.71	.80	.81	.84
	R^2	.50	.64	.65	.70
6. η_{HWY}	R	.66	.79	.79	.79
	R^2	.44	.63	.63	.63
7. η'_{HWY}	R	.76	.85	.85	.85
	R^2	.58	.72	.73	.73
8. ι_{HWY}	R	.83	.89	.89	.89
	R^2	.70	.79	.80	.80
9. ι'_{HWY}	R	.80	.88	.88	.88
	R^2	.64	.77	.78	.78
		Consommation énergétique brute			
		x'_1	x_2	x_3	x_4
1'. β'_{RR}	R	.80	.80	.80	.81
	R^2	.64	.64	.65	.66
3'. η'_{RR}	R	.66	.80	.84	.84
	R^2	.44	.64	.71	.71
5'. ι'_{RR}	R	.65	.77	.79	.84
	R^2	.43	.60	.62	.71
7'. η'_{HWY}	R	.68	.80	.80	.80
	R^2	.47	.64	.64	.64
9'. ι'_{HWY}	R	.70	.82	.82	.82
	R^2	.49	.67	.67	.68
		Importations par habitant			
		x_1''	x_2	x_3	x_4
3''. η'_{RR}	R	.60	.75	.82	.82
	R^2	.36	.56	.68	.68
5''. ι'_{RR}	R	.61	.74	.77	.81
	R^2	.38	.55	.60	.65

TABLEAU 17 – Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)

Y	Échelle	Taille	Relief	Forme
	technologique			
	x_1	x_2	x_3	x_4
1. β'_{RR}	51.49**	.20	.03	.00
2. η_{RR}	17.30**	8.89**	5.88*	.03
3. η'_{RR}	21.17**	11.12**	3.20	.03
4. ι_{RR}	26.52**	6.96*	3.30	1.70
5. ι'_{RR}	23.46**	9.08**	.42	3.50
6. η_{HWY}	18.69**	11.12**	.01	.12
7. η'_{HWY}	32.95**	10.79**	.70	.39
8. ι_{HWY}	55.00**	10.34**	.70	.00
9. ι'_{HWY}	42.01**	13.08**	.36	.06
	Consommation	Taille	Relief	Forme
	énergétique brute			
	x'_1	x_2	x_3	x_4
1'. β'_{RR}	41.13**	.01	.80	.63
3'. η'_{RR}	18.39**	12.16**	5.12*	.12
5'. ι'_{RR}	17.49**	9.74**	1.24	6.24*
7'. η'_{HWY}	20.76**	10.77**	.00	.00
9'. ι'_{HWY}	22.76**	11.81**	.04	.77
	Importations	Taille	Relief	Forme
	par habitant			
	x_1''	x_2	x_3	x_4
3''. η'_{RR}	13.46**	10.15**	8.07**	.01
5''. ι'_{RR}	14.14**	8.29**	2.82	3.30

*significatif au seuil de 5%.

**significatif au seuil de 1%.

TABLEAU 18 – Erreur type des estimations

Y	Erreur type des estimations
1. β'_{RR}	.0597
2. η_{RR}	.0497
3. η'_{RR}	.0479
4. ι_{RR}	.1986
5. ι'_{RR}	.0378
6. η_{HWY}	.0263
7. η'_{HWY}	.0782
8. ι_{HWY}	.0833
9. ι'_{HWY}	.0925
1'. β'_{RR}	.0624
3'. η'_{RR}	.0468
5'. ι'_{RR}	.0372
7'. η'_{HWY}	.0908
9'. ι'_{HWY}	.1113
3''. η'_{RR}	.0489
5''. ι'_{RR}	.0408

Un test de Fisher a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre la régression originale et la régression ajustée¹. Nous concluons donc que (1) les facteurs exogènes n'ont aucune influence sur la structure des réseaux de transport. Cette conclusion n'est toutefois valable qu'à cette échelle. L'effet de blocage des frontières internationales est suffisamment fort pour que les réseaux de transport nationaux soient principalement développés en tant que régions fonctionnelles. (2) Malheureusement, il existe une deuxième interprétation et nous ne savons pas laquelle est vraie : la conclusion (1) ci-dessus est fautive. Les indicateurs ajustés de la structure du réseau ne sont pas des mesures satisfaisantes de l'influence externe.

Pour décider laquelle de ces conclusions est valable, ou pour reformuler les conclusions de manière plus complète, nous reviendrons au concept de « facteur exogène » dans le chapitre suivant, en traitant de plus petites unités de recherche.

Additivité des réseaux de transport

Le tableau 2 et la figure 20 suggèrent qu'il n'y a pas de correspondance stable entre la structure des réseaux ferrés et celle des réseaux autoroutiers. Il est généralement admis qu'un réseau ferré très développé, à la structure complexe et au tracé dense, s'accompagne d'un réseau routier de structure similaire. Cela est vrai pour un certain nombre de pays. Cependant, dans

1. Au seuil de 5%.

d'autres pays, un réseau ferré très développé coexiste avec un réseau autoroutier moins développé et vice versa. Cela implique qu'il n'existe pas de relation fonctionnelle simple entre ces deux réseaux de transport.

Comme le montre le tableau 5, les deux réseaux de transport étudiés présentent des coefficients de corrélation élevés. Si l'on interprète cette corrélation de manière déterministe, on peut s'attendre à ce que, pour un niveau donné de développement économique et pour des caractéristiques régionales données, les réseaux ferrés et routiers présentent une structure tout à fait similaire. Une structure très complexe des réseaux ferrés serait associée à une structure similaire des autoroutes. La figure 20 prouve que ce n'est pas le cas. Même s'il existe une forte corrélation entre les variables dépendantes et indépendantes, il y a une certaine variation des valeurs en dessous et au-dessus de la ligne zéro qui représente les « valeurs déterministes » (c'est-à-dire les valeurs qui ont un écart nul par rapport aux valeurs prédites par les caractéristiques régionales). Dans les limites exprimées par l'étendue des résidus, les scores individuels de la structure du réseau fluctuent de telle sorte que certaines valeurs surestimées des réseaux ferrés s'accompagnent de valeurs sous-estimées des réseaux autoroutiers et vice versa.

Cela suggère la complémentarité des réseaux de transport. Dans de nombreux pays, le réseau ferré est complété par un réseau autoroutier et vice versa. L'équilibre ou le déséquilibre du degré de développement de la structure entre chemins de fer et autoroutes suppose que les réseaux de transport servent les économies des pays à des degrés différents et variables¹. Étant donné que les réseaux ferrés et routiers sont fortement corrélés avec les caractéristiques, économiques et autres, des régions étudiées, cela implique que le déséquilibre entre la structure des réseaux ferrés et routiers n'est pas très important.

La notion de réseaux de transport complémentaires implique, en outre, que les réseaux de transport sont des formes spécifiques de réseaux sur lesquels prennent place les activités de transport. Les caractéristiques régionales sont fonctionnellement associées aux activités de transport dans leur ensemble. Les réseaux de transport prennent en charge diverses parties de l'ensemble des activités de transport. Étant donné que les proportions d'activités de transport évoluent², un réseau de transport donné (autoroute) peut assumer une part sans cesse croissante des services de transport et se substituer progressivement à un autre réseau de transport (chemin de fer)³. Cela

1. Ce phénomène est évidemment bien connu. Nous ne l'avons énoncé ici que pour servir de base à notre raisonnement déductif.

2. En raison de l'évolution de la technologie du transport, de la concurrence des organisations institutionnelles et de nombreux autres facteurs.

3. Le concept de substituabilité des réseaux de transport proposé par Ullman et Fogel est une forme du concept de complémentarité. Voir Edward L. Ullman, *American Commodity Flow; a geographical interpretation of rail and water traffic based on principles*

signifie également qu'un système de transport particulier ayant une relation fonctionnelle spécifique avec l'économie d'un pays peut « perdre » cette relation fonctionnelle à un moment donné. Quelles que soient les variations des services de transport acquis par les différents systèmes de transport au cours d'une période donnée, le volume total des services de transport et l'économie du pays devraient conserver une relation fonctionnelle constante, dans les limites des décalages temporels.

Le même raisonnement semble s'appliquer à la structure des réseaux de transport. La relation fonctionnelle entre les indicateurs structurels des réseaux de transport et l'économie du pays peut varier. La structure d'un réseau de transport donné peut être « surdéveloppée » ou « sous développée » par rapport aux caractéristiques économiques du pays et à d'autres caractéristiques régionales¹. Mais les paramètres structurels de tous les systèmes de transport d'un pays devraient être en relation fonctionnelle étroite avec les caractéristiques régionales. Cela implique immédiatement que la relation entre les paramètres structurels, représentatifs de tous les systèmes de transport, et les caractéristiques régionales du pays est une relation fonctionnelle directe. Les réseaux de transport ont des relations partielles avec les caractéristiques régionales. Les relations partielles, mesurées par les coefficients de corrélation, peuvent être fortes si le réseau considéré assume une part prépondérante de l'ensemble des activités de transport et faibles dans le cas contraire. Cela signifie qu'en mesurant une seule relation partielle, nous pouvons obtenir des coefficients de corrélation forts ou faibles. Cependant, en additionnant deux ou plusieurs paramètres de la structure du réseau, et en les considérant comme une seule relation partielle, nous devrions obtenir des valeurs de plus en plus fortes des coefficients de corrélation. Cet argument devrait apparaître clairement dans l'énoncé récapitulatif présenté ci-dessous sous une forme conceptuelle.

Imaginons un ensemble T tel que toutes les routes et tous les nœuds prenant en charge n'importe quel type d'activité de transport soient membres de l'ensemble T . Nous écrivons $e \in T$ et $v \in T$, où e est l'arête ou la route et v est un sommet, une intersection ou un terminal. L'ensemble T peut contenir de nombreux sous-ensembles s_1, s_2, \dots, s_n tels que $e_1 \in s_1$ et $v_1 \in s_1$ où e_1 est toute arête constituant un réseau ferré et v_1 toute intersection ou terminal constituant ce même réseau ferré, $s_2 =$ réseau autoroutier, s_3

of spatial interchange. (Seattle : University of Washington Press, 1957). Robert William Fogel, « The Social Saving Attributable to American Railroads in the Interregional Distribution of Agricultural Products in 1890 : An Application of Mathematical Models to a Problem in History », Document non publié (ronéotypé).

1. Les termes caractéristiques économiques et autres caractéristiques régionales, caractéristiques régionales, caractéristiques zonales, caractéristiques géographiques, caractéristiques économiques et autres caractéristiques géographiques sont utilisés de manière interchangeable dans ce texte. Cette précision étant faite, j'utilise le plus souvent « caractéristiques régionales » dans la suite de la traduction.

= réseau aérien et ainsi de suite. Cela peut s'écrire $s_i \in T$ (chaque sous-ensemble s est membre de l'ensemble T) et $s_1 \cup s_2 \cup s_3 \cup \dots \cup s_n \equiv T$ (la somme de tous les sous-ensembles s est égale à l'ensemble T)¹.

Exprimons de façon similaire l'économie d'un pays comme un ensemble E . Nous écrivons $e \in E$, où e est une élément de l'économie d'un pays². L'ensemble E peut contenir de nombreux sous-ensembles t_1, t_2, \dots, t_n tels que $t_1 \in E$ et $t_1 \cup t_2 \cup t_3 \cup \dots \cup t_n \equiv E$, où $t_1 =$ secteur primaire (ou industrie extractive), $t_2 =$ secteur secondaire (ou industrie manufacturière), $t_3 =$ secteur tertiaire (ou commerce de détail). Les sous-ensembles t_1, t_2 et t_3 sont localisés à des endroits différents (bien qu'ils puissent se chevaucher) et sont interdépendants. On peut affirmer que les activités de transport sont nécessaires aux secteurs primaire, secondaire et tertiaire. L'industrie du transport fait donc partie intégrante de l'économie E . Puisque les activités de transport sont nécessaires à toute activité économique, nous pourrions appeler les activités de transport secteur pré-primaire ou secteur primaire et écrire $t_O \in E$, où $t_O =$ secteur primaire = ensemble T (tel que défini ci-dessus). Par conséquent, t_O peut être défini comme $t_O = t_1 \cap t_2 \cap t_3 \cap \dots \cap t_n$ ³. Cette inclusion de t_O (ou ensemble T) dans l'ensemble E serait parfaitement justifiable. Ce n'est que pour mettre l'accent sur le secteur (primaire) du transport que nous considérons les activités de transport comme un ensemble T distinct de l'ensemble E ⁴. Le concept peut maintenant être formulé de manière symbolique. Supposons que

$$T R E^5 \tag{4.1}$$

où R est une relation fonctionnelle entre l'ensemble T et l'ensemble E . Les termes T et E peuvent être substitués comme suit :

$$(s_1, s_2, \dots, s_n) R (t_1, t_2, \dots, t_n) \tag{4.2}$$

1. $s_1 \cup s_2$ symbolise l'union ou la somme des sous-ensembles s_1 et s_2 . Cela signifie que $s_1 \cup s_2$ est l'ensemble de tous les éléments qui sont membres soit de s_1 soit de s_2 .

2. Nous ne cherchons pas ici à définir le terme e . Le lecteur peut imaginer tout « objet » qui est généralement et intuitivement accepté comme faisant partie ou appartenant à l'économie d'un pays.

3. $t_i \cap t_j$ symbolise une intersection de l'ensemble t_i et t_j . [Kansky postule ici que l'activité transport est le plus petit dénominateur commun à l'ensemble des activités économiques.](#)

4. Ce schéma organisationnel n'influence en aucune façon l'objectif ou les résultats de cette étude. Le changement du schéma organisationnel ne modifierait que partiellement la formalisation conceptuelle de ce texte. Par exemple, la relation entre structure du réseau et caractéristiques géographiques serait considérée comme la relation entre un sous-ensemble t_O (réseaux de transport) et l'ensemble E (économie) au lieu d'une relation entre les ensembles T (réseaux de transport) et E (économie).

5. [Dans le texte original, Kansky utilise ici la numérotation 4.1 alors que des équations numérotées 4.1 à 4.3 sont présentes plus haut dans ce chapitre.](#)

Dans le chapitre III, nous avons mesuré les relations partielles r

$$s_1 \ r \ (t_1, t_2, \dots t_n) \quad (4.3)$$

et

$$s_2 \ r \ (t_1, t_2, \dots t_n) \quad (4.4)$$

où s_1 = réseau ferré, s_2 = réseau autoroutier et $(t_1, t_2, \dots t_n)$ = échelle technologique représentative de l'économie du pays dans son ensemble. Puisque $s_1 \cup s_2$ se rapproche de la somme de tous les sous-ensembles s_i (i.e. l'ensemble T) en

$$(s_1 \cup s_2) \ r \ (t_1, t_2, \dots t_n) \quad (4.5)$$

la valeur r devrait être supérieure aux valeurs r individuelles de 4.3 et 4.4. Si c'est le cas alors 4.1 est une relation fonctionnelle.

Comme le montre le chapitre III, s_1 et s_2 sont fortement corrélés avec l'échelle technologique et les autres caractéristiques géographiques. Il s'ensuit, si notre raisonnement est juste, que l'ensemble T devrait également être fortement corrélé avec les mêmes variables indépendantes. De plus, cette corrélation devrait être plus forte que les corrélations des sous-ensembles s_1 et s_2 (si nous ne tenons pas compte des variations possibles dues aux éventuelles erreurs de mesure). Afin d'étudier cette hypothèse, nous avons additionné les valeurs représentant les réseaux ferrés et routiers et les avons incluses comme indicateurs synthétiques dans les analyses de régression explicatives qui suivent.

Données

Les analyses « explicatives » de cette partie du chapitre sont basées sur les données des tableaux précédents : l'ensemble original de variables indépendantes x_1, x_2, x_3, x_4 dans le tableau 3 ; les variables dupliquées des caractéristiques économiques (consommation brute d'énergie [x_1'] et importations par habitant [x_1'']) dans le tableau 8 ; les variables dépendantes $(\beta_{RR} + \beta_{HWY}), (\beta'_{RR} + \beta'_{HWY}), (\eta'_{RR} + \eta'_{HWY})$ et $(\iota'_{RR} + \iota'_{HWY})$ dans le tableau 9 ; les variables dépendantes originales $(\eta_{RR} + \eta_{HWY})$ et $(\iota_{RR} + \iota_{HWY})$ dans le tableau 2. Les scores de $(\eta'_{RR} + \eta'_{HWY})$ et $(\iota'_{RR} + \iota'_{HWY})$ ont été transformés en logarithme décimal de la valeur observée. Ces données ont été rassemblées dans dix tableaux et soumises à une analyse de régression multiple.

Résultats

Par souci de simplicité et afin d'éviter les répétitions, les quatre mêmes tableaux de coefficients de régression, de coefficients de détermination, de rapports de variance et d'erreur type se suivent sans aucun commentaire¹. Une section interprétative suit.

TABLEAU 19 – Coefficients de régression

Y	Échelle	Taille	Relief	Forme	Intercept
	technologique				
	x_1	x_2	x_3	x_4	a
1. $\beta_{RR} + \beta_{HWY}$	-2.2750	-.0316	-.0011	-.1145	3.4444
2. $\beta'_{RR} + \beta'_{HWY}$	-2.5031	.0995	-.0037	-.0914	2.3884
3. $\eta_{RR} + \eta_{HWY}$	1.3303	.2720	-.0036	.0444	.1019
4. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	1.6138	.2372	-.0015	-.0109	.3402
5. $\iota_{RR} + \iota_{HWY}$	1.9147	.2674	-.0037	.0952	-.7147
6. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	1.8243	.2968	-.0026	.1269	-.9900
	Consommation	Taille	Relief	Forme	Intercept
	énergétique brute				
	x'_1	x_2	x_3	x_4	a
4'. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	-1.4767	.2780	-.0033	.0417	.8259
6'. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	-1.6845	.3421	-.0046	.1868	-.4346
	Importations	Taille	Relief	Forme	Intercept
	par habitant				
	x_1	x_2	x_3	x_4	a
4''. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	-.3049	.2671	-.0044	-.0023	1.1772
6''. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	-.3347	.3335	-.0059	.1367	-.0757

1. On croit que le lecteur est capable, à ce stade, d'interpréter les tableaux présentés ici. La raison d'être des variables dépendantes et leurs descriptions ont été décrites aux pages 69-71.

TABLEAU 20 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Échelle technologique			
		x_1	x_2	x_3	x_4
1. $\beta_{RR} + \beta_{HWY}$	R	.80	.80	.82	.84
	R^2	.65	.65	.67	.70
2. $\beta'_{RR} + \beta'_{HWY}$	R	.78	.81	.86	.87
	R^2	.62	.67	.74	.76
3. $\eta_{RR} + \eta_{HWY}$	R	.74	.87	.89	.89
	R^2	.55	.76	.79	.80
4. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	R	.80	.91	.91	.91
	R^2	.64	.83	.84	.84
5. $\iota_{RR} + \iota'_{HWY}$	R	.81	.88	.89	.90
	R^2	.66	.78	.80	.81
6. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	R	.78	.88	.88	.90
	R^2	.61	.77	.78	.81
		Consommation énergétique brute			
		x'_1	x_2	x_3	x_4
4'. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	R	.74	.88	.90	.90
	R^2	.55	.78	.81	.81
6'. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	R	.71	.84	.85	.88
	R^2	.51	.71	.72	.78
		Importations par habitant			
		x_1''	x_2	x_3	x_4
4''. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	R	.66	.82	.86	.86
	R^2	.43	.67	.74	.74
6''. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	R	.64	.78	.81	.83
	R^2	.41	.61	.66	.69

TABLEAU 21 – Rapports de variance avec 1 et $m - j$ degrés de liberté (25 observations)

Y	Échelle technologique	Taille	Relief	Forme
	x_1	x_2	x_3	x_4
1. $\beta_{RR} + \beta_{HWY}$	43.68**	.00	1.36	2.04
2. $\beta'_{RR} + \beta'_{HWY}$	37.94**	3.32	6.40*	1.73
3. $\eta_{RR} + \eta_{HWY}$	28.86**	19.88**	3.10	.47
4. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	41.17**	25.72**	1.16	.03
5. $\iota_{RR} + \iota_{HWY}$	45.10**	13.17**	1.63	1.76
6. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	37.50**	16.00**	.26	3.09
	Consommation énergétique brute	Taille	Relief	Forme
	x'_1	x_2	x_3	x_4
4'. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	28.81**	23.65**	3.03	.42
6'. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	24.07**	15.10**	1.28	5.92*
	Importations par habitant	Taille	Relief	Forme
	x_1''	x_2	x_3	x_4
4''. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	18.05**	16.19**	5.54*	.00
6''. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	16.21**	11.63**	3.08	2.25

*significatif au seuil de 5%.

**significatif au seuil de 1%.

TABLEAU 22 – Erreur type des estimations

Y	Erreur type
1. $\beta_{RR} + \beta_{HWY}$	.1386
2. $\beta'_{RR} + \beta'_{HWY}$	.1202
3. $\eta_{RR} + \eta_{HWY}$	.1119
4. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	.1018
5. $\iota_{RR} + \iota_{HWY}$	.1239
6. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	.1247
4'. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	.1101
6'. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	.1319
4''. $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$	.1301
6''. $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$	.1576

Interprétation

Il a été postulé¹ que les réseaux ferrés et autoroutiers, caractérisés par un indicateur synthétique ($s_1 \cup s_2$)², devraient avoir une corrélation plus forte avec les variables indépendantes que les corrélations des réseaux de transport considérés de façon individuelle. Comparer les tableaux 20 et 21 avec les tableaux 11 et 12 pour β et avec les tableaux 16 et 17 pour η , η' , ι et ι' révèle que notre hypothèse est probablement valide. L'hypothèse est en accord avec les résultats pour tous les indicateurs de la structure du réseau et également pour les analyses « dupliquées ». Cependant, l'augmentation du pouvoir explicatif avec l'« indicateur synthétique » n'est pas très élevé.

Un test de Fisher pour toutes les analyses, comparant les variances entre les régressions sur les « indicateurs synthétiques » ($\beta_{RR} + \beta_{HWY}$, $\beta'_{RR} + \beta'_{HWY}$, $\eta_{RR} + \eta_{HWY}$, $\eta'_{RR} + \eta'_{HWY}$, $\iota_{RR} + \iota_{HWY}$, $\iota'_{RR} + \iota'_{HWY}$) et les régressions des mesures individuelles (β_{RR} , β'_{RR} , η_{RR} , η'_{RR} , ι_{RR} , ι'_{RR} , η_{HWY} , η'_{HWY} , ι_{HWY} , ι'_{HWY}) a révélé que l'augmentation de l'intensité des régressions de l'« indicateur synthétique » est significative au seuil de 5% pour la forme ajustée de l'indice η appliqué aux réseaux ferrés ($\eta'_{RR} + \eta'_{HWY} > \eta'_{RR}$). L'augmentation de l'intensité des corrélations pour les autres indices se rapproche plutôt du seuil de significativité de 5%.

Le résultat n'est pas décevant. Les coefficients de corrélation des réseaux étant très élevés (.79 à .88), ils sont très proches de la limite maximale (1). Nous ne pouvons pas nous attendre à de fortes augmentations des analyses de l'« indicateur synthétique » dans de telles circonstances. L'augmentation de l'intensité serait plus importante si l'indicateur de synthèse des réseaux ferrés et routiers ($s_1 \cup s_2$) devait être remplacé par un indicateur représentant le système de transport dans son ensemble (T) ou si les coefficients de corrélation des réseaux étaient faibles.

Le postulat de l'« additivité des réseaux de transport » n'a pas été réfuté et les résultats empiriques obtenus lui apportent un certain soutien. Toutefois, ces preuves ne sont pas entièrement satisfaisantes. Nos résultats étant proches de la limite de la significativité statistique, nous considérons que le concept de l'« additivité des réseaux de transport » n'est vérifié que partiellement ; nous ne le considérerons donc pas comme théoriquement significatif dans la discussion du chapitre VII.

1. Voir pages 69-71

2. Défini à la note 1 page 70.

Chapitre V

Relations transversales pour des unités spatiales plus petites

La structure des réseaux de transport et les caractéristiques économiques des pays semblent être fonctionnellement liées bien que des facteurs supplémentaires, tels que la taille des pays et le relief, puissent affecter de manière significative la géométrie de certains types de réseaux. L'objectif principal du présent chapitre est d'explorer si cette relation fonctionnelle présente une certaine stabilité à différentes échelles d'observation. Nous tentons donc d'examiner dans quelle mesure la relation entre la structure du réseau et les caractéristiques géographiques se vérifie pour les unités politiques d'ordre inférieur - régions et comtés². L'analyse est limitée aux États-Unis.

On sait généralement qu'il existe une relation logique entre l'échelle des unités observées et le degré de généralité des résultats obtenus. Certaines généralisations ne sont valables qu'au niveau agrégé. En modifiant l'échelle d'observation, on peut obtenir des résultats différents³. Le sens de cette affirmation devrait être clarifié par la discussion qui suit.

Pour des raisons de brièveté, distinguons trois unités d'observation : (1) les pays, (2) les régions et (3) les comtés⁴. Nous pouvons imaginer un pays comme un ensemble C . Toutes les régions sont des sous-ensembles indivi-

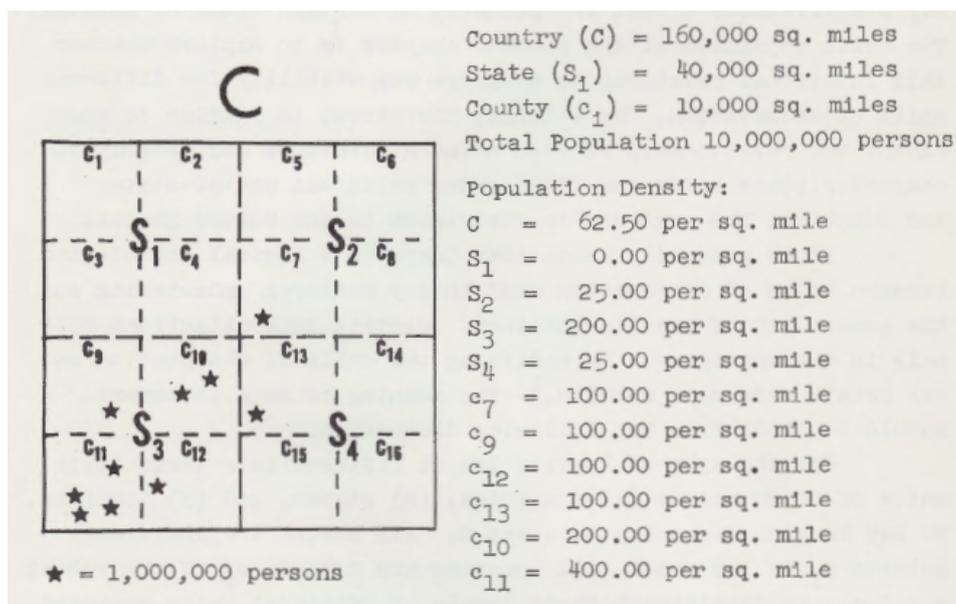
2. Dans ce chapitre, lorsque Kansky parle de manière générale, *state* est traduit par région; lorsqu'il présente les résultats, le terme pays désigne les États-Unis et État désigne les États fédéraux.

3. Pour une discussion de cette idée, voir Otis Duncan, *Statistical Geography : Problems in Analyzing Areal Data* (Glencoe, Ill. : Free Press, 1961).

4. Pour les besoins de cette étude, nous acceptons les définitions intuitives suivantes : *un pays* est un territoire contrôlé par un gouvernement internationalement reconnu; *une région* est l'unité politique d'ordre inférieur, tel que le territoire de toutes les régions est égal au territoire du pays; *un comté* est l'unité politique d'ordre inférieur suivant, tel que le territoire de tous les comtés au sein d'une région est égal au territoire de la région.

duels S_i de l'ensemble C , tous les comtés sont des sous-ensembles c_i du sous-ensemble S_i ; autrement dit, nous distinguons trois niveaux d'unités politiques disposées selon une hiérarchie telle que $c_i \in S_i$ et $S_i \in C$. Si nous incluons une notion d'échelle (dimension de taille) dans le système, nous pouvons écrire : $c_i \leq S_i \leq C$. Le résultat d'une mesure ou une généralisation représentative d'un pays C peut être considéré comme une « valeur moyenne » ou une « généralisation moyenne » qui ne dit rien des anomalies locales. On peut dire la même chose des unités d'observation d'ordre inférieur (c_i et S_i). En descendant dans la hiérarchie des unités d'observation, les « valeurs moyennes » ou les « généralisations moyennes » (représentatives des unités c_i ou S_i) deviennent plus représentatives des caractéristiques locales et éventuellement moins représentatives des unités d'ordre supérieur (voir la figure 22).

FIGURE 22 – Niveaux de recherche : l'exemple de la densité de population



En comparant la valeur 62.5 (densité de population) du pays C dans la figure 22 avec les valeurs individuelles de tous les comtés (c_i), on peut observer les variations des densités des comtés par rapport au score moyen du pays. Il est également évident, d'après les valeurs présentées, que les scores des régions sont de « meilleures » estimations des densités de population locales; les valeurs du pays gomment les caractéristiques et les variations locales.

La dépendance entre l'échelle des unités étudiées et les valeurs agrégées peut être appliquée à n'importe quelle caractéristique géographique; le même schéma peut être utilisé dans le contexte des variations spatiales des carac-

téristiques régionales et des réseaux de transport. Puisqu'il existe toujours certaines variations d'intensité entre les valeurs agrégées (valeurs des unités C) et les scores d'ordre inférieur (valeurs des unités S et c), cela implique que nous obtenons toujours des variations d'intensité dans la force de l'association entre les caractéristiques géographiques et la structure des réseaux de transport pour les unités C , S ou c .

Puisque nous avons mesuré, dans le chapitre précédent, la relation entre les réseaux de transport et les caractéristiques régionales au niveau du pays (unités d'ordre 1), nous allons tenter d'étudier dans le présent chapitre la relation entre les unités d'ordre 2 (région) et d'ordre 3 (comté). Ainsi, nous avons l'intention de décrire les relations entre certaines caractéristiques géographiques des unités S et c et les sous-graphes partiels ($P_{RR}^{2^e}$, $P_{HWY}^{2^e}$, $P_{RR}^{3^e}$ et $P_{HWY}^{3^e}$) des réseaux de transport¹.

États

Les États suivants ont été sélectionnés par échantillonnage aléatoire comme représentatifs des États-Unis d'Amérique : (1) Connecticut, (2) Wisconsin, (3) Dakota du Nord, (4) Utah, (5) Washington, (6) Caroline du Sud, (7) Oklahoma, (8) Indiana, (9) Oregon, (10) Tennessee, (11) Californie, (12) Virginie occidentale, (13) Nebraska, (14) Floride, (15) Colorado. L'utilisation des indices η , η' , ι et η' a permis de mesurer les réseaux de voies ferrées et d'autoroutes de ces régions². Les valeurs obtenues sont incluses comme variables dépendantes individuelles dans 12 tableaux.

1. Soit toutes les voies de transport d'un pays (sentiers, pistes, autoroutes, voies ferrées, voies navigables, voies aériennes, etc.) représentées sous la forme d'un graphe G . Les unités politiques d'ordre inférieur (régions) délimitent l'étendue de tous les sous-graphes de sorte que toutes les voies de transport incluses dans les unités politiques d'ordre deux sont appelées sous-graphes de G (R^{2^e}) et que toutes les voies de transport incluses dans les unités politiques d'ordre trois (sous-graphes de sous-graphes du graphe G) sont appelées sous-graphes de G (R^{3^e}), où l'exposant 2^e ou 3^e désigne l'ordre du sous-graphe R . Un graphe partiel est par définition un graphe qui contient certains éléments du graphe G tels que les éléments qui sont membres du sous-graphe partiel sont situés dans au moins deux des sous-graphes. Cela implique que chaque sous-graphe S peut avoir quelques éléments qui construisent un graphe partiel d'un sous-graphe S . Ainsi, tous les réseaux de transport des États-Unis sont appelés graphe G . Tous les réseaux de transport des différents États sont appelés des sous-graphes R^{2^e} du graphe G . Tous les réseaux de transport de tous les comtés sont des sous-graphes R^{3^e} du graphe G . Le réseau ferré complet des États-Unis est par définition un graphe partiel P_{RR} du graphe G . Toutes les autoroutes des États-Unis forment un autre graphe partiel P_{HWY} du graphe G . Le réseau ferré de l'État de l'Indiana est un graphe partiel $P_{RR}^{2^e}$ du sous-graphe R^{2^e} . Cette différenciation des termes et des symboles est basée en partie sur Berge, *op.cit.*, p. 6 et König, *op. cit.*

2. L'emplacement et l'étendue des réseaux ferroviaires et routiers ont été déterminés à l'aide de : U. S. Aeronautical Charts, 1 : 1 000 000 ; *Encyclopaedia Britannica World Atlas*, *op. cit.* et *Gousha American Highway Atlas* (4^e éd., San Jose-Chicago : H. M. Gousha Company, 1956).

Deux indicateurs économiques ont été choisis comme variables indépendantes : (1) les ventes par habitant¹ comme variable illustrant la structure des échanges et (2) les ventes d'énergie électrique par habitant², considérées comme une mesure indirecte du degré de développement industriel³. Étant donné qu'il n'existe aucune mesure exprimant les économies des États dans leur ensemble⁴, ces deux mesures peuvent éclairer de manière indirecte la relation entre les réseaux de transport régionaux et l'économie.

Les autres variables indépendantes sont équivalentes à celles des régressions précédentes : taille, relief et forme⁵. Comme nous avons choisi deux indicateurs des caractéristiques économiques, nous avons conçu deux séries de régressions. Dans la première série, nous avons inclus les ventes par habitant comme première variable indépendante avec la taille, le relief et la forme⁶ ; dans la deuxième série, la première variable indépendante est la vente d'énergie électrique par habitant.

Après le raffinement⁷ habituel des variables dépendantes et indépendantes, les données ont été soumises à une analyse de régression multiple. Les résultats de ces régressions sont présentés sous forme de tableaux ci-dessous. Par souci de concision, nous ne présentons ici que les valeurs statistiques qui contribuent à la discussion.

1. U. S. Bureau of the Census, *County and City Data Book* (Washington, D. C. : U. S. Government Printing Office, 1949-).

2. Federal Power Commission, *Electric Power Statistics*, rapport n° 58-1E, section 5.

3. Les résultats de l'indicateur « vente d'énergie électrique par habitant » sont généralement « fortement » corrélés avec l'indicateur « consommation industrielle d'énergie électrique » ; il illustre simultanément le degré de développement industriel des zones et les modèles de consommation totale d'énergie électrique.

4. À la connaissance de l'auteur, il n'existe pas encore d'indicateur identique ou similaire à l'échelle technologique pour les unités d'ordre deux ou trois.

5. La variable taille a été déterminée en utilisant : U. S. Bureau of the Census, *Census of Population : 1960* (Washington, D. C. : U.S. Government Printing Office, 1961) Vol. I, Part A. Les valeurs ont été arrondies à deux décimales. La variable de relief : USA Aeronautical Charts, *op. cit.*. La variable de forme : *Encyclopaedia Britannica World Atlas*, *op. cit.*

6. Pour les descriptions et définitions de ces mesures, voir le chapitre III, pages 43-45.

7. Par « raffinement », nous entendons test de normalité et transformations en logarithmes si nécessaire (pour une discussion plus approfondie, voir le chapitre III, page 45).

TABLEAU 23 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Ventes par habitant	Taille	Relief	Forme
1. η_{RR}	R	.12	.72**	.80	.81
	R^2	.01	.52**	.64	.66
2. η'_{RR}	R	.08	.72**	.80	.82
	R^2	.00	.52**	.64	.67
3. ι_{RR}	R	.01	.64*	.65	.68
	R^2	.00	.41*	.42	.47
4. ι'_{RR}	R	.12	.71**	.71	.74
	R^2	.01	.50**	.51	.55
5. η_{HWY}	R	.21	.70**	.75	.78
	R^2	.04	.49**	.56	.62
6. ι_{HWY}	R	.23	.66*	.71	.77
	R^2	.05	.44*	.51	.60

*significatif au seuil de 5%¹.

**significatif au seuil de 1%.

TABLEAU 24 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Ventes par habitant	Taille	Relief	Forme
1. η_{RR}	R	.46	.70*	.72	.73
	R^2	.22	.50*	.52	.53
2. η'_{RR}	R	.48	.70*	.71	.72
	R^2	.23	.49*	.51	.53
3. ι_{RR}	R	.26	.54	.54	.60
	R^2	.06	.29	.29	.36
4. ι'_{RR}	R	.30	.66*	.66	.70
	R^2	.09	.44*	.44	.49
5. η_{HWY}	R	.27	.68*	.77	.78
	R^2	.07	.46*	.59	.62
6. ι_{HWY}	R	.23	.65*	.73	.77
	R^2	.05	.42*	.53	.60

*significatif au seuil de 5%.

Les résultats fournis par les tableaux 23 et 24 ne sont pas très satisfaisants. Aucune des mesures des caractéristiques économiques (ventes par habitant et ventes d'énergie électrique par habitant) n'est significativement corrélée avec les réseaux étudiés. Seuls les augmentations liés à la variable

1. En utilisant les astérisques ici, nous combinons les informations offertes par deux tableaux (tableau de R et R^2 et tableau des rapports de variance) dans les chapitres précédents.

taille sont significatifs au seuil de 5%. Néanmoins, les modèles de régression complets atteignent des coefficients de corrélation assez importants.

En comparant les augmentations de la variance expliquée liées aux deux premières variables (tableaux 23 et 24)¹, il est évident que les ventes d'énergie électrique par habitant ont des coefficients de corrélation plus élevés avec les réseaux de chemins de fer et d'autoroutes que les ventes par habitant. Cela signifie que les variations des ventes d'énergie électrique par habitant sont associées à la structure des réseaux de chemins de fer et d'autoroutes dans une plus large mesure que les structures commerciales locales. D'autre part, les ventes par habitant peuvent être liées à la structure des réseaux de transport d'ordre inférieur (autoroutes d'État et de comté) ou n'être associées à aucun réseau de transport.

La différence entre les mesures « originales » (η et ι) et les mesures « ajustées » (η' et ι') ne sont pas significatives. Ce résultat est similaire aux conclusions précédentes des analyses de régression des pays et ne soutient pas l'hypothèse de « facteurs exogènes » présentée ci-dessus (voir chapitre IV, pages 60-62).

États - analyses répétées

Les résultats ci-dessus, bien que peu satisfaisants, ont suggéré une autre piste de recherche. Les ventes par habitant se sont révélées non significatives. Comme nous nous attendions à une relation significative entre la structure commerciale des États et les réseaux de transport², nous avons décidé de tester une nouvelle régression en mettant l'accent sur différents réseaux de transport. Conformément à la notion « d'additivité des réseaux de transport » (voir chapitre IV, pages 68-71), nous avons décidé d'ajouter des autoroutes d'ordre inférieur aux autoroutes d'ordre supérieur (utilisées auparavant) et d'élargir ainsi le volume de données empiriques. En combinant les autoroutes d'ordre inférieur (État) et supérieur (États-Unis), nous obtenons un réseau différent, avec des propriétés structurelles différentes, qui, nous l'espérons, devrait être associé plus étroitement aux caractéristiques géographiques des États que les réseaux d'autoroutes d'ordre supérieur étudiés précédemment. Étant donné la notion d'« additivité des réseaux de transport », cette forme d'addition de deux réseaux devrait être un moyen plus efficace d'exprimer la structure des deux réseaux d'autoroutes que la simple addition de deux valeurs estimées séparément.

1. Nous comparons deux ensembles de données qui représentent des augmentations de la variance expliquée non significatives dans le modèle de régression. Mais comme il existe une tendance persistante dans ces résultats, nous sommes tout de même en mesure de suggérer certaines conclusions à partir de ces valeurs.

2. Cette relation présumée est contenue dans la « théorie des lieux centraux » et elle est largement validée par notre expérience empirique.

Les indices η et η' ayant des valeurs similaires et les indices η et η' étant fortement corrélés avec les indices ι et ι' , nous avons décidé, par souci de concision, de ne répéter qu'une seule régression de la mesure η ¹ appliquée aux réseaux routiers composés d'autoroutes fédérales et nationales². Les ventes par habitant, la taille, le relief et la forme ont de nouveau été utilisés comme variables indépendantes. Les résultats sont présentés ci-dessous.

TABLEAU 25 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Ventes par habitant	Taille	Relief	Forme
1. η_{HWY}	R	.56*	.79**	.85	.85
	R^2	.32*	.63**	.73	.73

*significatif au seuil de 5%.

**significatif au seuil de 1%.

Le tableau 25 montre que les coefficients de corrélation et les coefficients de détermination des deux premières variables (ventes par habitant et taille) sont significatifs. En comparant ces résultats avec les équivalents du tableau 23 (η_{HWY}), on observe des coefficients de corrélation et des coefficients de détermination plus élevés. De plus, les ventes par habitant sont significatives au seuil de 5%.

L'augmentation générale des coefficients de corrélation et des coefficients de détermination suggère une direction pour des recherches plus approfondies. En diminuant la taille des unités d'observation, nous devons inclure des réseaux de transport d'ordre inférieur dans nos enquêtes pour spécifier la forme précise et la significativité de la relation³.

La relation significative entre les ventes par habitant et l'indice η_{HWY} semble confirmer la notion d'« additivité des réseaux de transport » (voir chapitre IV pages 68-71). On peut donc dire qu'une relation plus significative entre les caractéristiques économiques locales, telles qu'elles s'expriment dans les structures commerciales locales, et les réseaux de transport peut être formulée en considérant le plus grand nombre possible de réseaux de transport, d'ordre et de formes différents.

1. La similarité entre les indices η et η' est évidente dans les tableaux 15 et 16 du chapitre IV et les tableaux 23 et 24 du chapitre V; la corrélation entre η , η' et ι , ι' dans le tableau 14 du chapitre IV.

2. Ce réseau autoroutier est constitué de toutes les lignes pleines bleu foncé, rouges et jaunes présentes dans le *Gousha American Highway Atlas*, *op. cit.*

3. Cette affirmation pourrait avoir un sens général et cette notion devrait être applicable à un champ plus large de la recherche géographique. Pour de nombreux lecteurs, cette affirmation peut sembler évidente et la notion triviale. Si c'est le cas, l'apparente banalité de la notion est un bon signe de la validité de l'énoncé. Toute affirmation qui semble être évidente et correspondre à la construction logique du monde et à notre expérience intuitive est toujours évidente après avoir été formulée.

Comtés

Les comtés américains considérés dans les analyses comme les unités d'ordre trois » sont les suivants : (1) Bernalillo (N.M.), (2) Luna (N.M.), (3) Eddy (N.M.), (4) Union (N.M.), (5) Muhlenberg (Ky.), (6) Mercer (Ky.), (7) Fayette (Ky.), (8) Leslie (Ky.), (9) Dickenson (Va.), (10) Henry (Va.), (11) Cumberland (Va.), (12) Clarke (Va.), (13) Surry (Va.), (14) Culpeper (Va.), (15) Salem, (N.J.) , (16) Cape May (N.J.), (17) Mercer (N.J.), (18) Sussex (N.J.), (19) Robeson (N.C.), (20) Jones (N.C.), (21) Wake (N.C.), (22) Burke (N.C.), (23) Pitt (N. C.), (24) Cambria (Pa.), (25) Lebanon (Pa.), (26) McKean (Pa.), (27) Mercer (Pa.), (28) Clearfield (Pa.), (29) Clinton (Pa.), (30) Adams (Pa.).

Les réseaux ferrés et les réseaux d'autoroutes d'ordre supérieur ont été mesurés par les indices β , β' , η , η' , ι et ι' ¹. Les caractéristiques géographiques des zones sélectionnées étaient représentées par : (1) les ventes par habitant², (2) taille³, (3) relief⁴ et (4) forme⁵. En manipulant ces données de la manière habituelle (voir note 7 page 79), nous avons composé neuf tableaux qui ont été soumis à une analyse de régression multiple. Les résultats de ces régressions sont présentés sous une forme abrégée dans le tableau 26.

Trois conclusions essentielles peuvent être tirées du tableau 26 (1) il n'y a pas de différence significative entre les indicateurs « originaux » (β , η et ι) et les indicateurs « ajustés » (β' , η' et ι'). Les résultats ne confirment donc pas l'hypothèse de « facteurs exogènes » (voir chapitre IV, page 60). Étant donné que des conclusions similaires ont été tirées des autres analyses (voir chapitre IV, page 67 et chapitre V, page 81), cette hypothèse n'est donc pas justifiée par les preuves empiriques réunies. Cela implique que (a) l'hypothèse et les indicateurs ajustés sont faux ou (b) l'hypothèse est fautive et les indicateurs ajustés sont valides ou (c) l'hypothèse est valide et les indicateurs ajustés sont faux. Notre analyse nous permet d'éliminer la quatrième alternative : (d) l'hypothèse est valide et les indicateurs ajustés sont également valides (voir tableau 27).

Étant donné qu'une autre élimination serait nécessaire pour déterminer la signification de l'hypothèse, d'autres preuves empiriques et un test plus rigoureux sont nécessaires. Cela dépasse toutefois le cadre de la présente étude. (2) Il existe une corrélation significative entre les réseaux ferrés et les ventes par habitant. Une seule régression (ι'_{RR}) a révélé des coefficients de

1. Tels que définis dans les chapitres II et IV.

2. Les statistiques de ventes pour 1954 sont basées sur : U.S. Bureau of the Census, *County and City Data Book*, 1956, tableau 2. Les statistiques de population pour 1955 proviennent de *Sales Management. Survey of Buying Power* (New York, 1955).

3. U.S. Bureau of the Census, *County and City Data Book*, 1956, Tableau 2.

4. Mesuré sur les cartes U.S.G.S. au 1 : 500 000.

5. Mesurée sur les cartes U.S.G.S. au 1 : 500 000.

TABLEAU 26 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Ventes par habitant	Taille	Relief	Forme
1. β_{RR}	R	.56**	.57	.59	.60
	R^2	.32**	.34	.37	.37
2. β'_{RR}	R	.56**	.58	.60	.60
	R^2	.32**	.34	.37	.37
3. η_{RR}	R	.49**	.50	.52	.52
	R^2	.24**	.25	.27	.27
4. η'_{RR}	R	.48**	.71	.71	.72
	R^2	.23**	.51	.51	.52
5. ι_{RR}	R	.51**	.55	.58	.58
	R^2	.26**	.30	.34	.34
6. ι'_{RR}	R	.32	.67**	.69	.70
	R^2	.10	.46**	.48	.49
7. β_{HWY}	R	.39*	.41	.42	.51
	R^2	.15*	.17	.17	.26
8. η_{HWY}	R	.00	.85**	.85	.86
	R^2	.00	.73**	.73	.74
9. ι_{HWY}	R	.05	.83**	.83	.86
	R^2	.00	.70**	.70	.71

*significatif au seuil de 5%.

**significatif au seuil de 1%.

TABLEAU 27 – Évaluation de l'hypothèse des facteurs exogènes

(a)	-	H	-	M
(b)	-	H		M
(c)		H	-	M
(d)		H		M

-H signifie que l'hypothèse est fausse.

M signifie que les indicateurs sont valides.

corrélations non significatives. L'indicateur ajusté ι' ne semblant pas être valide, le résultat pour ι'_{RR} n'a pas de signification importante. (3) Contrairement à nos attentes, les réseaux autoroutiers d'ordre supérieur et inférieur des comtés étudiés ne sont pas significativement associés aux ventes par habitant. Seule la régression de β_{HWY} révèle des coefficients de corrélation significatifs au seuil de 5%. Cela suggère que des réseaux autoroutiers supplémentaires doivent être inclus dans nos mesures (selon l'idée d'« additivité des réseaux de transport », présentée au chapitre IV, page 68 et appliquée également au chapitre V, page 81) si nous voulons formuler la relation entre la structure des réseaux autoroutiers et les ventes par habitant pour les comtés américains

sélectionnés. C'est ce que nous tentons de faire ci-dessous.

Régression répétée des comtés

En suivant le même raisonnement que précédemment (voir page 81, États - Analyses répétées), nous nous sommes concentrés sur les réseaux autoroutiers des comtés sélectionnés. Une fois encore, nous avons appliqué η . Cependant, les réseaux autoroutiers considérés étaient différents des réseaux mesurés précédemment (voir page 83) dans le sens où, cette fois, toutes les routes figurant sur les cartes U.S.G.S. (1 : 500 000) et toutes les rues principales de toutes les agglomérations figurant sur les cartes U.S.G.S. (1 : 62 500) ont été mesurées. Les valeurs de η pour ces réseaux routiers élargis ont été statistiquement comparées avec l'ensemble habituel de données des caractéristiques régionales.

TABLEAU 28 – Coefficients de corrélation (R) et de détermination (R^2)

Y		Ventes par habitant	Taille	Relief	Forme
1. η_{HWY}	R	.30	.82**	.82	.83
	R^2	.09	.68**	.68	.70

*significatif au seuil de 5%.

**significatif au seuil de 1%.

En comparant ces résultats avec les valeurs de la régression des η_{HWY} dans le tableau 26, nous distinguons un changement certain dans les intensités des incréments individuels ; une augmentation notable de l'intensité du premier incrément et une diminution variable des autres incréments. Ces changements d'intensité ne sont pas satisfaisants. Nous nous attendions à une augmentation significative de l'incrément des ventes par habitant qui démontrerait une corrélation significative entre la structure des réseaux routiers et les structures commerciales des zones. Les augmentations des coefficients de corrélation et des coefficients de détermination par rapport aux régressions précédentes (tableau 26) permettent d'approcher le seuil de significativité de 5%. Cela suggère que la notion d'« additivité des réseaux de transport » (voir ci-dessus le chapitre IV, pages 68-71) peut également être employée pour de petites unités de recherche. Ainsi, en incluant des rues supplémentaires et le réseau routier non pavé, on pourrait obtenir des coefficients de corrélation plus élevés. Cela implique, si l'on accepte ce raisonnement, que les relations les plus significatives entre les structures commerciales et les réseaux de transport des petites zones d'étude devraient être formulées à l'aide de régressions étudiant l'impact de la structure des réseaux de circulation sur les ventes par habitant et d'autres variables.

Chapitre VI

Variations temporelles

La corrélation entre la structure du réseau et les caractéristiques économiques des zones étudiées a été définie plus haut comme une relation fonctionnelle². Cela implique que nous nous attendons à des variations d'intensité des paramètres décrivant la relation au fil du temps, à mesure que les caractéristiques économiques changent. Au cours d'une période donnée, la force de la relation fonctionnelle devrait changer. L'objectif de ce chapitre est de caractériser ce changement et d'évaluer numériquement la variabilité de la relation fonctionnelle entre la structure du réseau et les caractéristiques géographiques.

En définissant la relation de manière empirique, nous avons traité à plusieurs reprises cinq ensembles de valeurs numériques disposées sous forme de vecteurs. Chaque vecteur exprime une caractéristique géographique surfacique, telle que

$$n \ s \ o, \tag{6.1}$$

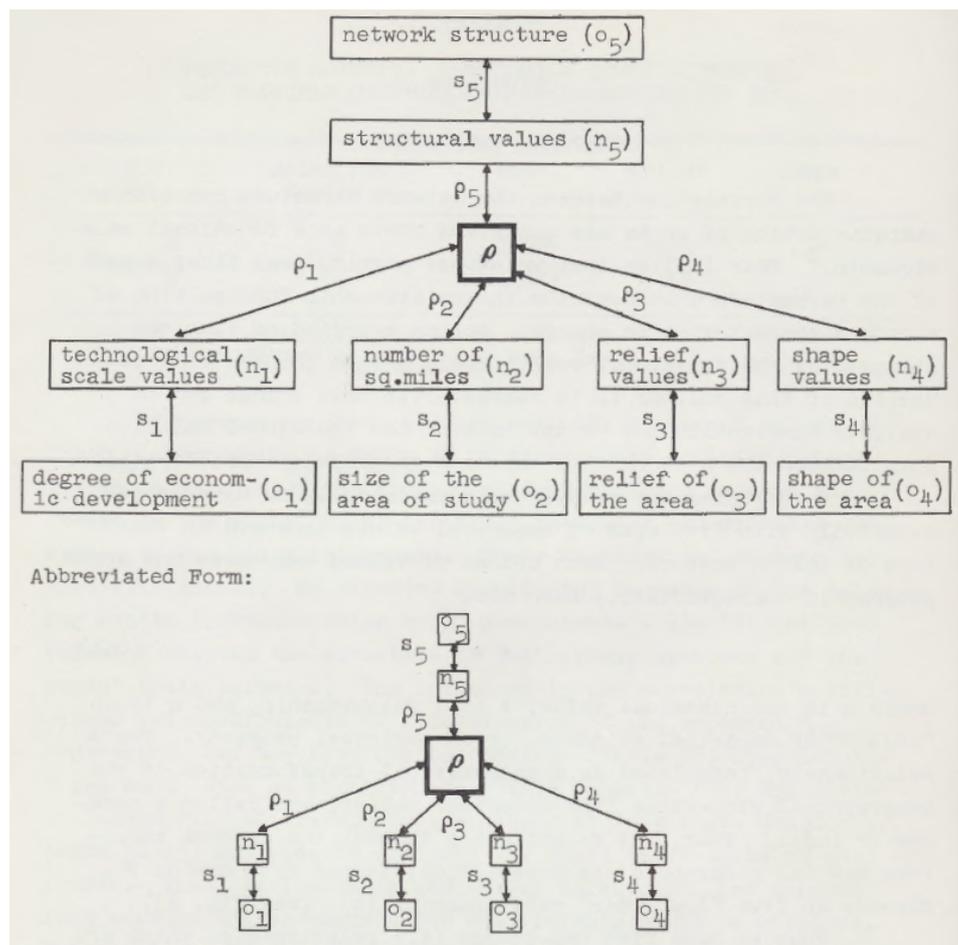
où n est la valeur numérique, s une relation et o un « objet » de preuve empirique ou une propriété empirique. La relation s , formulée comme une transformation mathématique des propriétés géographiques en valeurs numériques, est appelée mesure ou indicateur. Ainsi, la relation entre la structure du réseau et les caractéristiques géographiques, appelée désormais ρ , dépend de cinq relations d'« ordre inférieur » (s) (voir figure 23).

Nous avons donc cinq relations fonctionnelles (s_i) qui sont contenues dans la relation ρ . Comme les relations d'ordre inférieur (s_i) sont des règles de transformation des caractéristiques régionales en valeurs numériques, en

2. Voir chapitre III, page 38. Pour une discussion complémentaire de ce concept, voir ci-dessous le chapitre VII, page 98 et les pages 103-107.

changeant les mesures des caractéristiques régionales, nous changeons automatiquement l'ampleur de la relation ρ . De même, si les objets o_i changent avec la constante s_i , ρ change¹.

FIGURE 23 – Composition interne de la relation entre structure du réseau et caractéristiques régionales



Un autre facteur peut accroître la variabilité de la relation ρ au cours d'une période donnée : l'incohérence temporelle des mesures. Selon les théories de la mesure, toute mesure peut perdre ou gagner en validité ou en signification au cours d'une période donnée². Ceci est généralement compris de manière intuitive. Nous sommes d'accord, par exemple, pour dire

1. On peut dire la même chose de la relation non fonctionnelle R et de la relation non fonctionnelle r . Pour les définitions et une discussion des relations R et r , voir le chapitre VII, pages 98-100.

2. Voir par exemple C. West Churchman, *Prediction and Optimal Decision* (Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall Inc., 1961), pp. 95-96.

que l'indicateur « vente d'énergie électrique » peut être une mesure valable du degré de développement économique au moment t_i . Le même indicateur employé au temps t_{i-k} ou t_{i+k} peut être une mesure inutile (par exemple t_{i-k} = économie préindustrielle)¹. Nous avons supposé dans la partie précédente du texte que les relations s_i (telles que définies dans la figure 23) sont des mesures significatives des caractéristiques régionales. Cependant, si les mesures s_i sont employées à d'autres périodes de temps (t_{i-k} ou t_{i+k}), leur validité peut diminuer ou augmenter. Cela suggère que certaines variations de l'intensité de ρ peuvent être attribuées à des fluctuations temporelles de la validité des mesures employées.

La figure 23 montre que la relation ρ est un ensemble de relations d'ordre inférieur (s_i et ρ_1). Les relations s_i et ρ_1 unissent les propriétés empiriques concernées (variables dépendantes et indépendantes) d'une manière définie - elles constituent la structure du coefficient de corrélation. Pour exprimer les variations temporelles de la relation ρ , il faut comparer une série de « structures ρ ² » qui ont été estimées individuellement pour différentes périodes de temps. La complexité d'une comparaison temporelle entre de multiples coefficients de corrélation est donc prévisible. Cette complexité est accentuée, en outre, par la prise de conscience d'un autre fait : l'interdépendance temporelle des objets empiriques : le changement de l'ampleur des caractéristiques régionales (entre t_i et t_{i+k}) dépend de l'ampleur des caractéristiques individuelles³ à l'instant t_i . Ce phénomène, ainsi que l'incohérence temporelle des mesures, impliquent que les variations de la relation entre la structure du réseau et les caractéristiques régionales doivent être évaluées en utilisant les énoncés théoriques de l'analyse de séries temporelles multiples⁴ et les théories de la mesure.

Afin d'éviter toute redondance⁵ et en raison du manque de données à l'échelle et à la période souhaitées, l'investigation et l'analyse intensives de la relation ρ par de multiples séries chronologiques n'ont pas été tentées dans ce texte. Nous présentons ci-dessous quelques éléments susceptibles d'illustrer, à un niveau d'investigation superficiel, les variations longitudinales de la

1. En ignorant le fait que la valeur des unités monétaires change au fil du temps.

2. Par « structure ρ », nous entendons l'ensemble organisé des relations s_1 et ρ_1 comme illustré dans la figure 23.

3. Par exemple, un changement des valeurs de « ventes d'énergie électrique par habitant » entre 1960 et 1961 dépend de l'intensité des valeurs en 1960. On peut dire la même chose des autres caractéristiques géographiques. Ces caractéristiques sont des variables stochastiques, c'est-à-dire que leurs propriétés, ou plus précisément leurs variations d'intensité, sont décrites par des distributions de probabilité.

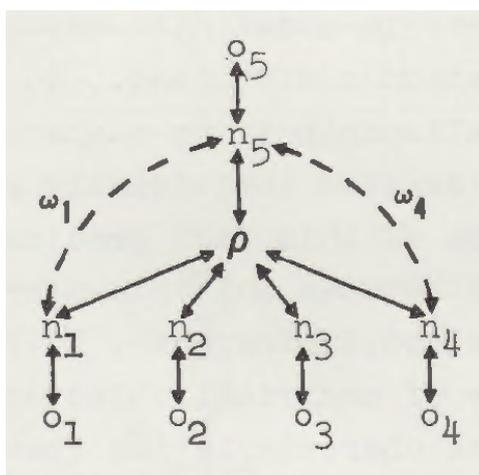
4. Pour un exemple et d'autres références voir Maurice H. Quenouille, *The Analysis of Multiple Time-Series* (Londres : Ch. Griffin and Co., 1957).

5. E. D. Perle, *Time Series Analysis of Transportation Development A Regional Econometric Analysis of the Demand for Transportation* (Chicago : University of Chicago, Department of Geography) (Forthcoming in its Research Series.)

relation entre les réseaux de transport et les caractéristiques géographiques.

Une fois encore, l'analyse qui suit est exploratoire. L'objectif est de tirer des conclusions provisoires sur les éventuelles variations temporelles de ρ à partir de données partielles. En raison du manque de données, nous nous concentrons uniquement sur un ensemble simplifié de valeurs. L'approche exploratoire est illustrée dans la figure 24 et discutée ci-dessous.

FIGURE 24 – Examen exploratoire des variations temporelles



La figure 24 illustre le raisonnement sous-jacent de l'analyse exploratoire. Dans les analyses de régression des chapitres précédents, les ensembles de variables indépendantes ont toujours été disposés de manière à ce que les valeurs représentant les caractéristiques économiques régionales soient les premières. La variable des caractéristiques économiques a toujours été considérée comme la variable indépendante la plus importante. En raison de cet ordre, c'est cette variable qui influence fondamentalement l'intensité de la relation ρ . Étant donné que les autres variables indépendantes (taille, relief et forme) ont été, dans la plupart des cas, reconnues comme des variables non significatives, une comparaison entre les variations de la variable des caractéristiques économiques (n_1) et la variable dépendante (n_5) devrait suggérer un comportement temporel de la relation ρ . Par conséquent, la relation ω_1 (dans la figure 24) devrait indiquer si la relation entre structure du réseau et caractéristiques régionales est « stable ».

Il est proposé de comparer graphiquement un ensemble de données des analyses de « séries spatiales » avec des observations individuelles de pays sélectionnés pour des périodes de temps variables. En observant les motifs de localisation des observations individuelles des séries temporelles par rapport à la pente et à la dispersion des observations des séries spatiales, nous devrions alors être en mesure de suggérer la variabilité temporelle de la relation

ρ . Cependant, cette évaluation de la variabilité de la relation ρ n'a qu'une signification théorique et pratique limitée, car la variabilité ou la stabilité de la relation ρ ne peut être formulée que par l'analyse de séries temporelles multiples.

Les pays suivants ont été sélectionnés comme échantillon pour l'analyse graphique : Algérie, Indochine et Italie. En appliquant les indices β , η et ι aux réseaux ferrés de ces pays à différentes périodes de temps¹, des valeurs numériques (n_5 dans la figure 24) ont été obtenues (voir tableau 29). Ces valeurs ont été corrélées individuellement avec les valeurs des « importations par habitant » (voir tableau 30) et reportées dans les graphiques des analyses de « séries spatiales » (voir figures 25 et 26)².

La mesure des « importations par habitant » a été choisie comme une caractéristique représentative du degré de développement économique d'un pays. Bien que cette mesure soit fortement corrélée avec les deux autres caractéristiques économiques utilisés dans ce document (l'échelle technologique et la consommation énergétique brute³), elle n'est pas très fortement corrélée aux indices structurels des réseaux de transport (comparer par exemple le R^2 du tableau 16). Cependant, étant donné que les données des deux autres caractéristiques économiques étaient impossibles à obtenir, les importations par habitant ont été choisies comme variable indépendante de la comparaison simplifiée entre les observations de la série « spatiale » et « temporelle ».

En raison de la faible corrélation entre la structure du réseau et les importations par habitant, la dispersion des observations individuelles dans les figures 25 et 26 est assez grande. Néanmoins, la tendance générale est assez évidente.

Dans la figure 25, quatre observations ont des emplacements spécifiques : Thaïlande, Soudan et Nigeria dans la partie inférieure du graphique et Algérie dans la partie supérieure. Ces résultats sont faciles à expliquer. Les réseaux ferrés de la Thaïlande, du Soudan et du Nigeria, d'après la figure 25, ont un degré de connectivité plus élevé que prévu. Puisque $\beta = 1$, les trois réseaux ferrés possèdent un circuit⁴. Dans le cas de la Thaïlande, ce circuit (qui porte la valeur de β à 1) entre Bangkok et Ban Pachi est de faible étendue et de moindre importance par rapport à l'ensemble du réseau ferré. Au Nigeria, le circuit de la structure ferroviaire est constitué par une route à voie étroite (2 pieds 6 pouces) entre Jos et Zaria. Inclure cette ligne de

1. Les différentes périodes de temps ont été choisies arbitrairement en fonction des cartes et des statistiques d'importation disponibles.

2. Les observations des séries spatiales sont équivalentes à celles de la figure 17. L'échantillon original de 18 pays est utilisé à plusieurs reprises ici afin de pouvoir les comparer avec les observations de la série temporelle

3. Voir Ginsburg, *op. cit.*, p. 113.

4. Pour une description de l'indice β , voir ci-dessus le chapitre II, page 15.

TABLEAU 29 – Résultats des mesures structurelles

		β	η	ι
1. Algérie	1870	0.50	68.75	45.83
	1880	0.90	90.50	32.32
	1890	0.97	56.60	16.53
	1900	0.97	48.88	14.25
	1910	1.02	51.36	14.40
	1920	1.03	45.94	12.92
	1930	1.12	38.77	11.91
2. Indochine ^a	1900	0.50	49.50	24.74
	1910	0.66	123.16	46.18
	1920	0.76	91.70	30.56
	1930	0.81	120.55	38.75
3. Italie ^b	1875	1.15	31.80	8.57
	1880	1.22	31.76	8.68
	1884	1.27	26.48	7.23

^a Les cartes des réseaux ferrés d'Algérie et d'Indochine française ont été construites en utilisant les informations de l'étude suivante : Henri Lartilleux, *Géographie des Chemins de Fer Français* (Paris : Librairie Chaix, 1959), tomes I, III.

^b Les réseaux ferrés de l'Italie ont été mesurés sur les cartes suivantes : Ministero dei Lavori Pubblici, Direzione Generale delle Strade Ferrate, *Carta delle Ferrovie Italiane* (Turin : 1875, 1880, 1884).

chemin de fer à voie étroite porte la valeur de β à 1. Étant donné que cette ligne à voie étroite est la seule de ce type dans tout le réseau et qu'elle est plutôt courte et importante uniquement pour le trafic local, elle aurait peut-être dû être exclue des mesures. Le degré de connectivité du réseau ferré du Soudan est accru par les activités de transport complémentaires sur le Nil. L'interaction étroite entre le transport ferroviaire et le transport fluvial peut expliquer la valeur plus élevée de β pour le Soudan. En Algérie, des raisons militaires et politiques semblent augmenter considérablement les valeurs des importations par habitant au cours de la dernière décennie. Le statut politique de l'Algérie (au moment de nos recherches) au sein de l'Union française et les opérations militaires sur le territoire algérien ont pu être à l'origine d'importations exceptionnellement élevées en provenance de France.

Bien que les positions exceptionnelles des quatre pays susmentionnés brouillent quelque peu le tableau d'ensemble, la tendance générale est assez nette. Plus le degré de connectivité des réseaux ferrés est élevé, plus les importations par habitant sont élevées. Cette régularité semble également s'appliquer aux séries chronologiques. Apparemment, la structure du réseau ferré change au cours du processus de développement économique en pro-

TABLEAU 30 – Importations par habitant^a

1. Algérie	1870	24.49
	1880	27.07 (Est.)
	1890	34.63
	1900	32.63
	1910	39.34
	1920	49.44
	1930	52.04
2. Indochine	1900	27.74
	1910	28.18
	1920	30.33 (Est.)
	1930	29.62
3. Italie	1875	36.69
	1880	36.47
	1884	41.73 (Est.)

^a Les valeurs sont exprimées en dollars américains. Elles ont été calculées en comparant et en transformant diverses statistiques plus ou moins fiables de l'époque. La série de scores pour chaque pays a été ajustée en fonction de l'évolution de la valeur des unités monétaires, afin de rendre comparables les observations des séries « spatiales » et « temporelles ». L'ajustement a été basé sur des décisions plus ou moins subjectives. Puisque la tendance au sein de chaque pays est importante à nos yeux (pente de la courbe pour chaque pays), la technique subjective d'ajustement de la valeur des unités monétaires n'est pas pertinente.

Les publications suivantes ont été utilisées : France, Ministère du Commerce, de l'Industrie et des Colonies, *Statistiques Coloniales pour l'année 1870-* (Paris : Imprimerie Nationale, 1870-). *Statesman's Year-Book* (Statistical and Historical Annual of the States of the World ; London : MacMillan and Co. Ltd., 1865-). Allemagne, Kaiserliches Statistisches Amt, *Statistisches Jahrbuch für das Deutsche Reich* (Berlin : Verlag Von Putting, 1865-). (Berlin : Verlag Von Puttkammer and Muhlbrecht, 1880-). Italie, Ministero delle Finanze, *Movimento Commerciale del Regno d'Italia*. (Rome : 18-).

portion de l'augmentation des importations du pays. Cela semble être vrai pour tous les pays considérés. Les trois lignes brisées entre les observations des séries chronologiques individuelles dans les figures 25 et 26 suggèrent que la pente des observations des séries chronologiques suit approximativement la tendance générale des observations des séries spatiales. Bien qu'il faille toujours s'attendre à des fluctuations à court terme des importations (par exemple, dans la figure 25, les observations 3 à 6 pour l'Algérie), la figure 25 peut être considérée comme une preuve faible que la corrélation entre les valeurs n_5 et n_1 (appelée relation ω_1 dans la figure 24) est stable.

La même correspondance générale entre les observations des séries spatiales et temporelles est évidente sur la figure 26. Les deux indices ι et η renforcent la conclusion obtenue pour l'indice β (figure 25). Les observations individuelles des séries temporelles estimées par ι et η suivent la pente générale des observations des séries spatiales. Étant donné que les deux indicateurs dépendent de la taille des réseaux mesurés¹, les fluctuations des observations individuelles des séries temporelles sont différentes, comparées à celles de β dans la figure 25, principalement pour l'Indochine française. Cela est dû à l'ajout soudain d'une longue liaison ferroviaire au réseau existant, de sorte que les valeurs de η et de ι augmentent. Il s'agit de la caractéristique des systèmes de transport au stade initial de la construction².

Le caractère évident des figures 25 et 26 soutient l'hypothèse selon laquelle la corrélation entre le degré de développement économique des pays et le degré de développement structurel des réseaux ferrés des pays est une association persistante dans l'espace et dans le temps. Bien que l'examen ci-dessus soit superficiel, on peut déduire des figures 25 et 26 que la relation ρ est une relation fonctionnelle relativement stable.

La figure 26 révèle une autre caractéristique intéressante. Les fluctuations des indices η et ι en Indochine suggèrent que ces deux indicateurs sont moins applicables aux réseaux de transport pendant la phase initiale de développement. Ceci n'est pas surprenant. L'indicateur 1), également appelée indicateur de « lien moyen » (voir ci-dessus le chapitre II, page 22) est par construction nécessairement trompeur s'il est appliqué aux réseaux de transport les plus simples, dans la phase initiale de la construction d'un réseau³. Ceci peut être illustré par l'exemple suivant. Imaginons un pays C qui contient une voie ferrée d'une longueur de 1 mile à l'instant t_1 : si nous appliquons l'indice η à l'instant t_1 , la valeur de t_1 sera de 1. En reportant

1. Voir ci-dessus chapitre IV, page 60.

2. Voir la discussion ci-dessous.

3. Cette limite (importante) des indicateurs proposés concerne nombre de méthodes développées en analyse spatiale qui supposent des infrastructures étatiques importantes, ne serait-ce que pour cartographier finement le territoire et produire des séries statistiques fiables et exhaustives. Par ailleurs, le cadre conceptuel de l'époque est celui des étapes de la croissance de Rostow, modèle supposé linéaire et universel.

cette valeur sur une échelle des pays (voir la figure 17), le pays C fera partie des pays les plus développés économiquement et dont les importations par habitant sont les plus élevées. Il se peut que le pays C au temps t_1 soit économiquement moins développé avec des importations par habitant égales à zéro. Au moment t_2 (au fur et à mesure que le processus de développement avance), la voie ferrée peut servir au transport de marchandises importées. Si nous calculons l'indice η au temps t_2 , nous obtenons une valeur qui peut correspondre à notre modèle de la « série spatiale » ; c'est-à-dire que nous pouvons considérer l'indice η comme une mesure significative. Cela pourrait suggérer que l'indice η , en tant qu'indicateur de la structure du réseau mettant l'accent sur les longueurs des éléments des réseaux, acquiert sa signification à un certain moment t_1 . On peut en dire autant de l'indice ι et de tous les indicateurs du réseau. Cette constatation empirique, qui est en accord avec les énoncés de la théorie de la mesure (voir page 87 ci-dessus), doit être prise en compte lors de l'interprétation des résultats des analyses de séries chronologiques à « long terme ».

FIGURE 25 – Comparaison des séries spatiales et temporelles - indice β

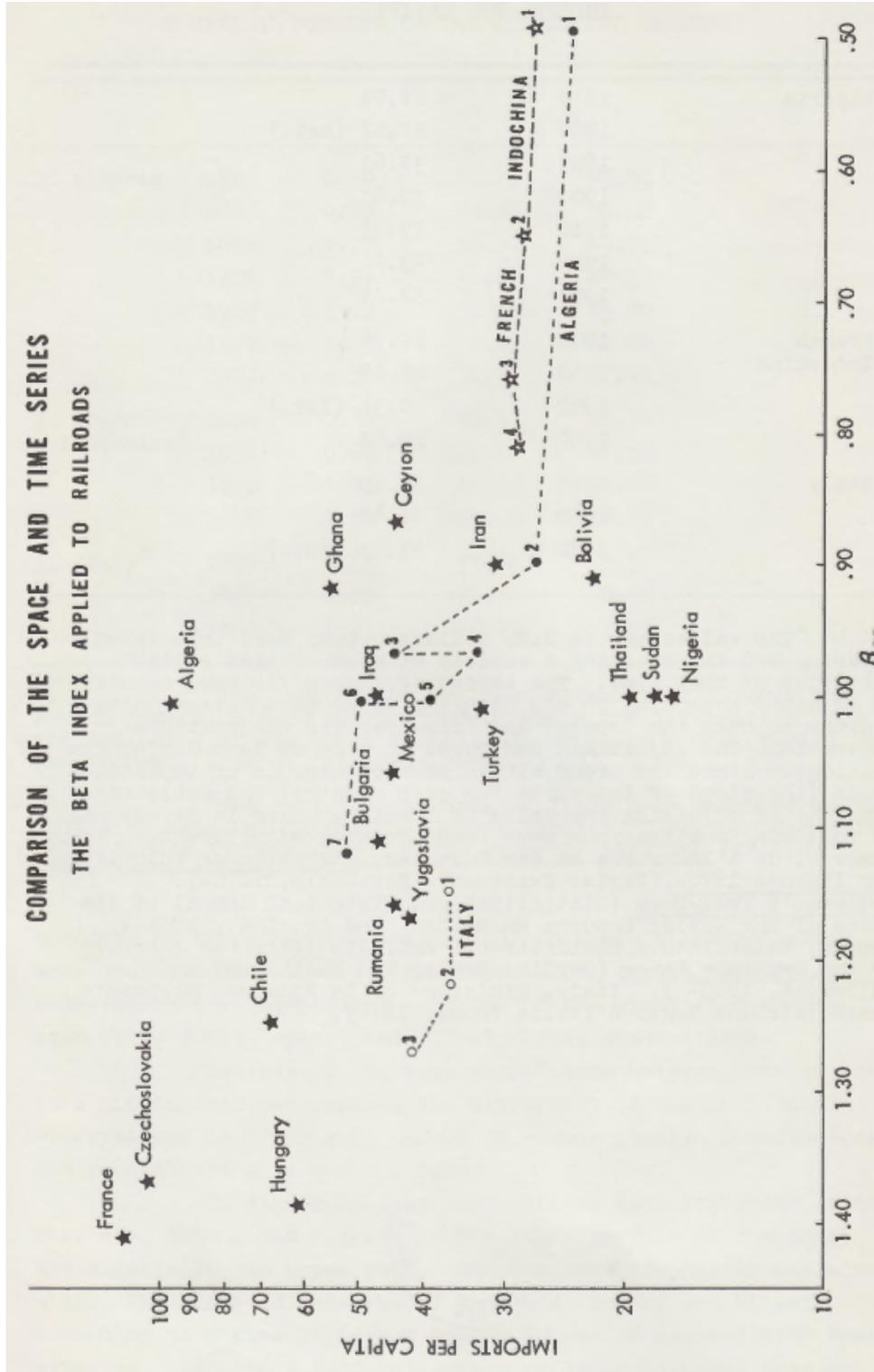
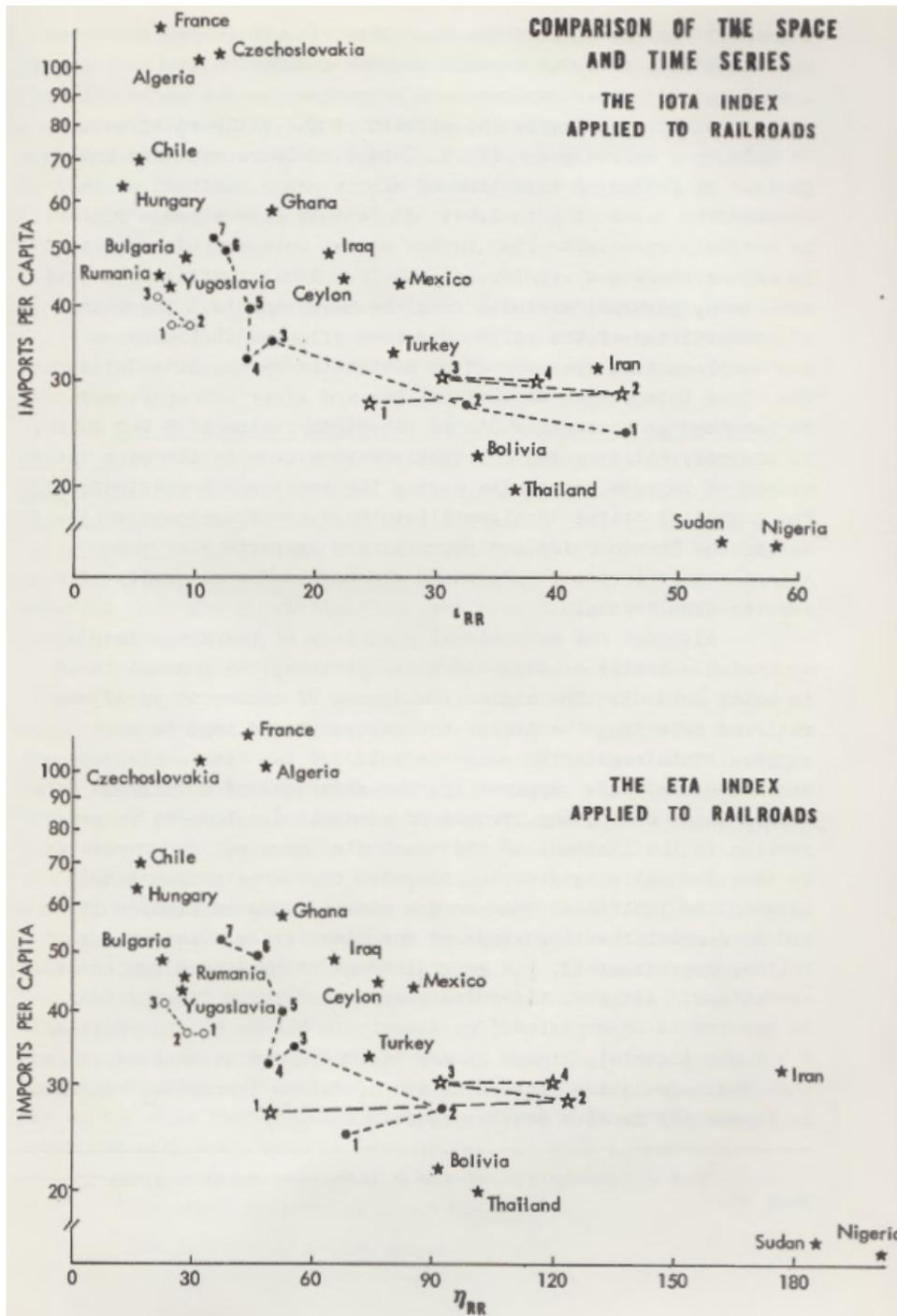


FIGURE 26 – Comparaison des séries spatiales et temporelles - indices ι et η



Chapitre VII

Examen des résultats et déductions

Le but de ce chapitre est de résumer et d'ordonner les résultats de notre étude ainsi que d'interpréter leur signification pratique et d'esquisser des possibles applications concrètes. Par conséquent, le chapitre condense certains résultats, hypothèses et concepts, et discute de leur portée et de leur signification pratiques.

Résumé des résultats empiriques

Dans le chapitre [I](#), la structure des réseaux de transport a été identifiée comme l'objet de notre enquête. Au chapitre [II](#), nous avons défini de nombreux indicateurs caractérisant la structure des réseaux, i.e. nous avons proposé des règles mathématiques pour transformer les observations élémentaires en nombres. Dans le chapitre [III](#), la validité des indicateurs proposés a été démontrée par une analyse statistique dans laquelle les observations chiffrées ont été comparées à des séries relatives aux caractéristiques régionales des pays. En généralisant les résultats des analyses, trois hypothèses ont été formulées dans le chapitre [IV](#) pour rendre compte des écarts observés entre structures de réseau et caractéristiques économiques : (1) complémentarité des indicateurs, (2) facteurs exogènes et (3) additivité des réseaux de transport. Ces hypothèses ont servi d'outils pour faciliter la construction d'une théorie expliquant les relations entre structure des réseaux et caractéristiques régionales. Leur validité a été examinée dans les chapitres [IV](#) et [V](#). Le chapitre [V](#) a également examiné la variabilité spatiale des relations. La stabilité temporelle a été examinée au chapitre [VI](#).

Les résultats présentés dans ces six chapitres facilitent la formulation

d'énoncés généraux (théorie¹) expliquant la relation entre les changements structurels des réseaux de transport et les changements de localisation et d'intensité des facteurs économiques régionaux. On pense que ces énoncés théoriques pourraient constituer une partie intégrante d'une théorie générale des réseaux de transport.

Appelons la relation entre la structure du réseau et les caractéristiques régionales le *système de corrélation* ρ tel que

$$\begin{aligned} (1) \quad & \rho = \cup_i R r \\ (2) \quad & (R \in \rho) \vee (r \in \rho) \\ (3) \quad & (R \neq \emptyset) \vee (r \neq \emptyset) \end{aligned} \tag{7.1}$$

où R est une « relation partielle » et r est une « relation individuelle » (pour les définitions de R et r voir ci-dessous page 99), \cup est une union, telle que définie ci-dessus², \emptyset est une relation insignifiante ou vide, \vee signifie ou.

Nous utilisons le terme *système de corrélation* car la relation fonctionnelle entre la structure du réseau et les caractéristiques régionales (ρ) contient un nombre indéterminé de relations d'ordre inférieur (relations R et r). Ainsi, la relation peut s'écrire comme une relation binaire non fonctionnelle³

$$G \rho (E, S, T, Z) \tag{7.2}$$

où G est un graphe constitué de toutes les voies de transport et de tous les nœuds situés dans une zone A_i , E est l'économie de la zone, considérée dans son ensemble, S sa taille, T son relief et Z sa forme. L'expression 7.2 peut être considérée comme une série de relations partielles (R) et individuelles (r), telles que des graphes ou sous-graphes partiels spécifiques de l'ensemble G et des sous-ensembles définis de l'ensemble E constituent les membres individuels des relations partielles (R) et individuelles (r).

Dans le chapitre III, les réseaux ferrés et autoroutiers d'ordre 1 des pays sélectionnés ont été choisis comme observations élémentaires, c'est-à-dire que nous avons mesuré statistiquement la relation entre deux sous-graphes partiels du graphe G (P_{RR} et P_{HWY})⁴ et les caractéristiques régionales

$$P_{RR} R (E, S, T, Z) \tag{7.3}$$

1. Toute généralisation peut être qualifiée de *théorie*.

2. Voir note 1 page 70.

3. Puisque tout graphe G peut être imaginé comme un ensemble S , nous combinons ici la notation de la théorie des graphes (note 1 page 78) et la notation de la théorie des ensembles (chapitre IV, page 70) et considérons les termes *graphe* et *ensemble* comme deux expressions équivalentes.

4. Voir note 1 page 78.

et

$$P_{HWY} R (E, S, T, Z) \quad (7.4)$$

où R est la relation partielle¹.

Dans le chapitre IV, les mêmes systèmes de transport ont été comparés à plusieurs reprises et une attention supplémentaire a été accordée aux secteurs des économies des pays e_1 et e_2 :

$$P_{RR} r (e_1, S, T, Z) \quad (7.5)$$

$$P_{HWY} r (e_1, S, T, Z) \quad (7.6)$$

$$P_{RR} r (e_2, S, T, Z) \quad (7.7)$$

$$P_{HWY} r (e_2, S, T, Z) \quad (7.8)$$

où e_1 est un secteur manufacturier (représenté par la consommation d'énergie par habitant), e_2 est un secteur du commerce de détail (représenté par les importations par habitant)² et r est qualifié de relation individuelle puisque nous avons mesuré la corrélation entre les systèmes de transport et les secteurs d'activité économique. En outre, les relations suivantes ont été examinées

$$(P_{RR} + P_{HWY}) R (E, S, T, Z) \quad (7.9)$$

$$(P_{RR} + P_{HWY}) r (e_1, S, T, Z) \quad (7.10)$$

et

$$(P_{RR} + P_{HWY}) r (e_2, S, T, Z) \quad (7.11)$$

1. Nous disons relation *partielle* car nous traitons des graphes partiels.

2. L'auteur ne prétend pas que les secteurs secondaire et tertiaire sont réellement représentés par les indicateurs de la consommation d'énergie et d'importations par habitant. Chaque secteur pourrait être représenté plus efficacement par d'autres indicateurs. Il est simplement suggéré ici que ces deux indicateurs appartiennent à la classe des mesures représentatives de ces deux secteurs.

Dans le chapitre V, nous avons étudié¹

$$P_{RR}^{2e} \ r \ (e_1, S, T, Z) \quad (7.12)$$

$$P_{HWY}^{2e} \ r \ (e_1, S, T, Z) \quad (7.13)$$

$$P_{RR}^{2e} \ r \ (e_2, S, T, Z) \quad (7.14)$$

$$P_{HWY}^{2e} \ r \ (e_2, S, T, Z) \quad (7.15)$$

$$(P_{HWY}^{2e} + P_{HWY}^{2e}) \ r \ (e_1, S, T, Z) \quad (7.16)$$

$$P_{RR}^{3e} \ r \ (e_1, S, T, Z) \quad (7.17)$$

$$P_{HWY}^{3e} \ r \ (e_1, S, T, Z) \quad (7.18)$$

$$(P_{HWY}^{3e} + P_{HWY}^{3e}) \ r \ (e_1, S, T, Z) \quad (7.19)$$

où, de l'équation 7.12 à l'équation 7.19, e_1 est la mesure des ventes par habitant et e_2 la mesure des ventes d'énergie électrique par habitant.

Dans le chapitre VI, nous nous sommes concentrés sur la variabilité temporelle de la relation

$$P_{RR} \ r \ e_1 \quad (7.20)$$

où e_1 est la mesure des importations par habitant.

Les résultats des chapitres III, IV et V ont révélé lesquelles des relations R et r étaient significatives. Il est commode d'ordonner les résultats des relations 7.3 - 7.19 sous la forme d'une matrice $n \times m$ (M) en utilisant la logique booléenne à deux éléments² de sorte que $a_{i,j} = 1$ s'il existe une corrélation significative entre i et j et $a_{i,j} = 0$ dans le cas contraire³ (tableaux 31-33).

On peut construire deux matrices similaires qui illustrent les résultats obtenus pour de plus petites zones d'étude (États et comtés).

1. La notation a été définie au chapitre V, page 78, note 1.

2. George Boole, logicien anglais, a inventé la logique (ou algèbre) booléenne qui est

TABLEAU 31 – Matrices des relations - Pays

Relation	β	π	v	η	ι	Σ
$R_{(7.3)}$	1	1	1	1	1	1
$R_{(7.4)}$	0	0	0	1	1	1
$R_{(7.9)}$	1	0	0	1	1	1
.
.
$r_{(7.5)}$	1	1	1	1	1	1
$r_{(7.6)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.7)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.8)}$	0	0	0	0	0	0
.
.
$r_{(7.10)}$	1	0	0	1	1	1
$r_{(7.11)}$	0	0	0	1	1	1

TABLEAU 32 – Matrices des relations - États

Relation	β	π	v	η	ι	Σ
$r_{(7.12)}$	0	0	0	0	0	0
$r_{(7.13)}$	0	0	0	0	0	0
$r_{(7.14)}$	0	0	0	0	0	0
$r_{(7.15)}$	0	0	0	0	0	0
$r_{(7.16)}$	0	0	0	1	0	1

TABLEAU 33 – Matrice des relations - Comtés

Relation	β	π	v	η	ι	Σ
$r_{(7.12)}$	1	0	0	1	1	1
$r_{(7.12)}$	1	0	0	0	0	1
$r_{(7.12)}$	0	0	0	0	0	0

En additionnant ¹ les colonnes, les valeurs individuelles des tableaux 31, 32 et 33, les valeurs de la relation ρ sont les suivantes

maintenant utilisée sous forme binaire comme base numérique de presque tous les ordinateurs.

3. En employant cette notation, nous interprétons les résultats en termes de logique à trois valeurs, à savoir une relation est significative (1) si et seulement si le coefficient de corrélation dépasse la limite conventionnelle « significatif au seuil de 5% » (voir ci-dessus note 1 page 49) et le coefficient de corrélation (R) est non significatif ou non défini si la valeur R est inférieure au seuil de 5%. Ainsi, nous traduisons la logique à trois valeurs en classification à deux valeurs (classification binaire) où 0 est indéfini.

1. Le processus d'addition dans l'algèbre de Boole à deux éléments est défini comme suit :

TABLEAU 34 – Matrice de la relation ρ

Relation	β	π	v	η	ι	Σ
$\rho(\text{Pays})$	1	1	1	1	1	1
$\rho(\text{État})$	0	0	0	1	0	1
$\rho(\text{Comté})$	1	0	0	1	0	1
$\rho(\text{Total})$	1	1	1	1	1	1

Les tableaux 31-34 confirment nos intuitions concernant les relations entre réseaux de transport et caractéristiques régionales. Ainsi, la dernière colonne du tableau 34 suggère qu'il est concevable de définir la relation fonctionnelle ρ pour des données agrégées (pays) et des données moins agrégées (État et comté). Si nous considérons les mesures structurelles ($\beta \dots \iota$) comme des mesures individuelles de propriétés définies du réseau, la ligne $\rho(\text{Total})$ du tableau 34 indique que toutes les propriétés individuelles sont en relation fonctionnelle avec les caractéristiques régionales. Cependant, les relations entre les propriétés individuelles varient considérablement en fonction de la forme du réseau de transport et de l'échelle des zones étudiées (voir les lignes et colonnes des tableaux 31, 32 et 33)¹.

Le tableau 34 révèle également que tous les indicateurs ont un score de 1 à la ligne $\rho(\text{Pays})$. Étant donné que nous nous sommes principalement concentrés sur cette échelle, et que nous avons appliqué tous les indicateurs à plusieurs reprises, nous avons obtenu des corrélations plus significatives. Cependant, cela n'implique pas qu'une enquête empirique répétée et des analyses statistiques répétées fourniraient nécessairement des relations significatives pour tous les indicateurs aux niveaux « État » et « comté ». Comme le démontre le chapitre V (pages 80 et 83), certains coefficients de corrélation au niveau de l'État et du comté sont non significatifs. Cela signifie que la relation fonctionnelle ρ est plus généralement valable au niveau du pays.

Les tableaux 31-34 indiquent les relations significatives entre les propriétés du réseau ($\beta \dots \iota$) et les caractéristiques régionales. Ces relations ont été établies statistiquement en tenant compte simultanément des relations qui existent entre les propriétés du réseau et la taille, le relief et la forme ; par exemple, les tableaux précédents identifient les relations significatives

1	1	0	0
1	0	1	0
1	1	1	0

1. L'occurrence fréquente du score 1 dans les colonnes η et $[\Sigma]$ n'implique pas que ces deux indicateurs présentent les corrélations les plus fortes et les plus fréquentes avec les caractéristiques économiques. Elle suggère seulement que ces deux indicateurs ont été employés fréquemment. L'indice Σ est absent du texte original, d'où la présence des crochets.

entre ρ_1 ¹. Des tableaux similaires peuvent être présentés pour les autres relations ρ_1 . Étant donné que les autres relations ρ_1 ont une significativité moins constante, leurs distributions ne sont pas résumées ici; nous nous concentrons principalement sur le pouvoir explicatif des modèles complets, tels qu'ils sont appliqués à différents niveaux d'étude et à diverses formes de systèmes de transport.

En appliquant de manière répétée l'algèbre de Boole à deux éléments, nous ordonnons les coefficients de détermination (R^2) des chapitres précédents de telle sorte que $a_{i,j} = 1$ si $R^2 \geq .5$ et $a_{i,j} = 0$ si $R^2 \leq .5$. Cette interprétation devrait révéler lesquels des modèles empiriques (7.3 - 7.19) ont été acceptés comme des équations significatives à des fins théoriques et pratiques.

TABLEAU 35 – Interprétation des coefficients de détermination (R^2) - Pays

Modèle	β	π	v	η	ι	Σ
$R_{(7.3)}$	1	1	1	1	1	1
$R_{(7.4)}$	0	0	0	1	1	1
$R_{(7.9)}$	1	0	0	1	1	1
.
.
$r_{(7.5)}$	1	1	1	1	1	1
$r_{(7.6)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.7)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.8)}$	0	0	0	0	0	0
.
.
$r_{(7.10)}$	1	0	0	1	1	1
$r_{(7.11)}$	0	0	0	1	1	1

TABLEAU 36 – Interprétation des coefficients de détermination (R^2) - États

Modèle	β	π	v	η	ι	Σ
$r_{(7.12)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.13)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.14)}$	0	0	0	1	0	1
$r_{(7.15)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.16)}$	0	0	0	1	0	1

Il existe de fortes corrélations ($R^2 \geq .50$) dans la plupart des cas. Le modèle de régression 3.4 décrit de manière satisfaisante la relation entre les propriétés du réseau et les caractéristiques régionales. Le modèle peut être

1. Comme défini dans la figure 23.

TABLEAU 37 – Interprétation des coefficients de détermination (R^2) - Comtés

Modèle	β	π	v	η	ι	Σ
$r_{(7.17)}$	0	0	0	0	0	0
$r_{(7.18)}$	0	0	0	1	1	1
$r_{(7.19)}$	0	0	0	1	0	1

appliqué à une grande variété de réseaux de transport et à de nombreux niveaux d'étude. Sa structure logique contribue à la formulation d'énoncés théoriques sur le développement structurel des réseaux de transport et son intensité autorise la formulation d'un modèle prédictif de la structure du réseau assez efficace.

Signification concrète des résultats

Convertissons maintenant les relations et les résultats exprimés ci-dessus en langage symbolique en une formulation plus concrète. Les déclarations ci-dessous sont des déductions opérationnelles (explications) basées sur l'intensité des coefficients de corrélation calculés dans les chapitres III-V. Certains commentaires reposent également sur la comparaison relative entre coefficients de corrélation et valeurs mesurées ainsi que sur la comparaison logique des mesures structurelles.

Spécification et inférence de la relation fonctionnelle

Les résultats empiriques des tableaux 31 à 37 caractérisent le type de relation entre structure du réseau et caractéristiques régionales. Cette relation (ρ) a été conçue¹ comme une relation fonctionnelle, c'est-à-dire une relation entièrement différente d'une relation causale (déterministe). Une relation causale est par définition un type de relation invariante telle que, chaque fois que a se produit, b en découle

$$a = b \tag{7.21}$$

Comme les résultats de cette étude révèlent certaines variations de l'intensité de la corrélation entre les variables employées, la relation ne peut être qualifiée de relation causale. La relation fonctionnelle autorise certaines variations dans l'intensité de l'association entre les variables employées. Ainsi, la relation fonctionnelle est conçue comme une relation de probabilité telle que chaque fois que a se produit, il y a une probabilité P que b en résulte

1. Voir chapitre III, page 38.

$$a = P(b) \quad (7.22)$$

où chaque fois que b se produit, il y a une probabilité P que a en découle

$$b = P(a). \quad (7.23)$$

Par conséquent, la relation fonctionnelle ρ indique tout au plus qu'il existe une probabilité P qu'une certaine structure de réseau de transport (a) soit présente si les caractéristiques régionales de la zone A ressemblent à b et vice versa.

Étant donné qu'aucune preuve n'a été validée au cours de la recherche concernant l'existence d'une antériorité entre les variables a et b , nous qualifions la relation ρ de relation symétrique¹

$$a \equiv b. \quad (7.24)$$

Ainsi, la relation ρ n'implique pas un ordre chronologique entre réseaux de transport et économie régionale. Les deux sont fonctionnellement liés, c'est-à-dire qu'un réseau de transport a peut exister avant une activité économique b et vice versa.

Certaines conditions autres² ont été reconnues au cours de la recherche comme des conditions préalables nécessaires à la relation fonctionnelle ρ . Cette constatation peut être schématisée

$$c \supset (a \equiv b) \quad (7.25)$$

(il existe une relation fonctionnelle a et b si c est présent). Par conséquent, si d'une région à l'autre, c diminue dans le temps et l'espace, a et b ne sont pas unis par la relation fonctionnelle³. La condition c peut être une condition nécessaire mais non suffisante de la relation fonctionnelle ; c'est-à-dire qu'un ensemble de conditions conjointement nécessaires peut être la condition préalable de la relation ρ

$$(c_1, c_2, \dots, c_n) \supset (a \equiv b) \quad (7.26)$$

1. Pour la définition d'une relation symétrique, voir note 1 page 33.

2. Ces conditions peuvent être imaginées, pour des raisons méthodologiques, comme un ensemble de variables indépendantes « inconnues ». Une recherche empirique intensive serait nécessaire pour préciser certaines de ces conditions « inconnues ». Cela ne peut être tenté dans le cadre de cette étude.

3. Pour une discussion plus approfondie et un exemple de cette affirmation, voir ci-dessous la page 108.

où (c_1, c_2, \dots, c_n) est l'ensemble des conditions conjointement nécessaires de la relation $a \equiv b$.

Comme les conditions nécessaires peuvent changer dans le temps et d'une région à l'autre, la validité de la relation ρ peut également changer dans le temps et l'espace. La relation ρ peut exister en tant que relation fonctionnelle dans une région A au moment t_1 mais pas au moment t et vice versa. En d'autres termes, la relation ρ n'est pas nécessairement présente à tout moment dans toutes les zones étudiées.

La relation fonctionnelle entre structure des réseaux de transport et caractéristiques régionales a été définie ci-dessus par les expressions 7.1 comme un système de corrélation qui contient un ensemble de relations d'ordre inférieur (R, r) . Les tableaux 31-33 précisent que les relations d'ordre inférieur (R, r) contiennent des associations significatives avec les caractéristiques régionales. En d'autres termes, la structure spatiale des réseaux de transport est associée au volume des activités économiques de la région donnée. Cette relation fonctionnelle implique que les activités économiques sont également situées dans l'espace¹, c'est-à-dire qu'elles constituent également une structure spatiale. Ainsi, la relation ρ est une association spatiale telle qu'elle exprime une relation d'accessibilité entre les activités économiques et les systèmes de transport². Cela signifie que les résultats de l'étude (coefficients de corrélation) sont également des indicateurs exprimant le parallélisme entre structure des réseaux de transport et modèles de localisation des activités économiques. Cependant, cette déclaration très générale doit être interprétée avec précaution. Cela ne signifie pas que toutes les formes d'activités de transport sont spatialement liées aux schémas de localisation de toutes les activités économiques d'une région. Au contraire, un réseau de transport (par exemple, les chemins de fer d'une zone A) peut être spatialement lié au schéma de localisation d'activités économiques précises (l'extraction du charbon par exemple) et ne pas être lié à un autre sous-ensemble d'activités économiques (les puits de pétrole par exemple). Les différents systèmes de transport sont donc complémentaires, y compris d'un point de vue spatial. Néanmoins, si le réseau de transport (RR) de la zone A prend en charge la majeure partie des activités de transport, la structure du réseau devrait être

1. Cette affirmation peut être qualifiée de triviale car il est plus qu'évident que les activités économiques sont localisées dans des lieux selon des régularités sous-jacentes plus ou moins définies. Cette déclaration n'a été incluse ici que pour souligner ce fait. Pour des discussions pénétrantes et des références pertinentes, voir August Lösch, *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft* (Jena : G. Fischer, 1940). Alfred Weber, *The Theory of the Location of Industries* (Chicago : University of Chicago Press, 1929). Edgar Streeter Dunn, *The Location of Agricultural Production* (Gainesville : University of Florida Press, 1954). Brian J. L. Berry et Allan Pred, *Central Place Studies, a Bibliography of Theory and Applications* (Philadelphie : Regional Science Research Institute, 1961).

2. Il est évident, d'après toute observation empirique, que les réseaux de transport sont très accessibles depuis les nœuds d'activités économiques.

localement similaire à la structure spatiale des activités économiques dans leur ensemble ; la relation d'accessibilité entre le réseau ferré et les activités économiques devrait être minimale ¹.

La relation ρ définie par 7.2 est un modèle empirique soutenu indirectement par les résultats de notre étude. Nous disons *indirectement* parce que la relation entre l'ensemble du système de transport d'une région et l'ensemble de l'économie n'a pas été calculée ². Cependant, en considérant l'hypothèse de l'« additivité des réseaux de transport » ³ comme un concept valide, les preuves numériques rassemblées pour les relations R soutiennent la formulation du système de corrélation ρ . La structure interne de la relation ρ telle que définie dans 7.2 est donc capable d'expliquer l'équilibre fonctionnel entre les formes individuelles des systèmes de transport G . En d'autres termes, la formulation de la relation ρ suggère que toute étude sérieuse des activités de transport d'une région nécessite de comprendre le réseau de transport comme un système interdépendant de modes de transport. La façon dont les modes de transport s'équilibrent s'explique par la structure interne de la relation ρ , c'est-à-dire par la formulation des relations fonctionnelles R et r . Par conséquent, évaluer la structure spatiale d'un réseau de transport signifie comparer quantitativement la structure du réseau avec : (1) la structure spatiale de secteurs définis de l'économie (relations r), (2) la structure spatiale de l'économie régionale dans son ensemble (relations R), (3) la structure spatiale d'autres réseaux de transport (autres sous-graphes partiels P du graphe G ⁴). Ces trois règles semblent être les étapes essentielles d'une évaluation quantitative d'un réseau de transport. Elles devraient être applicables à toute zone quelle que soit sa taille ⁵.

Les résultats du chapitre V soulignent l'étendue de la relation ρ . Puisque les relations r (estimées dans ce chapitre pour les États et les comtés) sont des corrélations significatives, nous postulons l'existence de relations R et ρ également au niveau des États et des comtés. Cependant, l'ampleur des coefficients de corrélation au niveau des États et des comtés est plus faible qu'au niveau des pays. Cela suggère une limite à l'applicabilité du système de corrélation ρ à des zones d'étude plus petites ; c'est-à-dire que la taille

1. Deux « objets » a et b ont une relation d'accessibilité minimale si la distance (exprimée en termes de distance métrique et/ou de temps et/ou d'effort) entre a et b est minimale.

2. Il serait chronophage de mesurer la structure des réseaux de transport des pays définis comme G (voir note 1 page 78).

3. Voir ci-dessus page 68.

4. Voir note 1 page 78. [Ce plaidoyer pour la prise en compte simultanée des différents réseaux de transport dans un même espace a rencontré peu d'écho ; la majeure partie des études en géographie des transports se concentre à l'époque sur un mode et un seul. Il est possible que ce soit encore largement le cas aujourd'hui.](#)

5. Toutefois, cette évaluation peut être simplifiée dans certaines conditions. Voir ci-dessous page 118.

ou l'échelle des unités spatiales étudiées peut être reconnue comme l'une des conditions nécessaires (c), telle que définie ci-dessus par 7.26. La relation ρ s'applique donc principalement aux grandes unités de recherche. En diminuant l'échelle ou la taille des unités étudiées, le modèle ρ est moins applicable ; si la relation ρ est employée pour des zones d'étude de petite taille, nous devons inclure certaines corrections afin d'expliquer les relations entre la structure du réseau et les caractéristiques régionales¹.

Une variable de redressement (ou variable supplémentaire), intitulée « facteurs exogènes », a été suggérée au chapitre IV. Bien que ce « redressement » n'ait pas été vérifié par les preuves empiriques rassemblées, le raisonnement sous-jacent paraît valide. Les mesures utilisées ici peuvent simplement avoir été inadéquates. Dans l'étude des relations entre réseaux de transport et caractéristiques régionales, nous devons donc prendre en compte de manière plus intensive les facteurs pertinents situés en dehors de la zone d'étude².

La relation ρ implique un ensemble³ de conditions qui doivent être présentes pour que la relation existe. Les résultats de cette étude révèlent une condition nécessaire de la relation ρ : les domaines d'étude sont les régions fonctionnelles⁴. Les résultats du chapitre IV ont montré que si les régions étudiées sont fonctionnellement connectées avec des régions situées en dehors des zones d'étude, l'intensité de la corrélation de la relation ρ diminue. Cela implique que la corrélation entre structure des réseaux de transport et caractéristiques régionales ne doit pas être attendue dans des zones choisies arbitrairement et qui ne sont pas des régions fonctionnelles. Les résultats du chapitre V, résumés dans les tableaux 32 et 33, suggèrent que les États sélectionnés se comportent moins comme des régions fonctionnelles que les comtés sélectionnés. Cela confirme que la taille d'une unité politique n'est pas une condition suffisante de la relation ρ , puisque les États, plus grands

1. Les « corrections » peuvent également être imaginées comme des variables indépendantes supplémentaires. Ceci constitue une règle générale de la recherche géographique. Les relations entre les grandes unités de recherche (données agrégées ou grandes populations) sont explicables par des modèles de corrélation relativement simples. Si nous étudions un niveau inférieur (si nous considérons de plus petites unités ou de petites populations), nous devons inclure un plus grand nombre de variables indépendantes et donc construire des modèles plus compliqués. Cela suggère par induction que l'explication ou la prédiction d'un individu nécessite la prise en compte d'un plus grand nombre de variables. Cela implique en outre que les relations entre des données agrégées (grandes populations) sont plus stables que les relations équivalentes entre des données moins agrégées (petites populations ou petites zones d'étude) ; autrement dit, la stabilité d'une relation dépend de l'échelle de la recherche.

2. Exemple : la structure du réseau routier dans le désert du Sahara ne peut être comprise qu'en prenant en compte les facteurs pertinents situés en dehors de ce désert car les caractéristiques régionales influencent la structure du réseau de manière insignifiante.

3. L'ensemble des conditions peut contenir un seul membre, comme dans 7.25, ou plus d'un membre comme dans 7.26.

4. Comme défini note 3 60.

en taille, fonctionnent moins comme des régions fonctionnelles.

D'autres conditions de la relation ρ peuvent être avancées, comme le suggère la distribution spatiale des résidus des régressions¹ : facteurs politiques et militaires², technologie des transports, investissements étrangers, etc. Cela ne signifie pas que toutes les conditions suggérées sont toujours des conditions nécessaires et suffisantes de la relation ρ . Leur sélection et leur formulation dépendent du type de réseau de transport étudié, du caractère de l'économie régionale et de la situation géographique des zones - en bref, de nombreuses caractéristiques de l'individualité régionale.

Inférence des résultats obtenus

Les indicateurs issus de la théorie des graphes, indicateurs définis au chapitre II, sont des règles mathématiques permettant de traduire en termes numériques des propriétés structurelles des réseaux de transport. Par conséquent, les résultats numériques sont des caractéristiques de propriétés écrites dans un langage symbolique. Certains résultats des chapitres III, IV et V (résultats pertinents pour caractériser les propriétés des réseaux) peuvent toutefois être traduites en langage courant.

L'intensité variable des coefficients de corrélation dans les tableaux 5, 11, 16, 25 et 26 montre que les caractéristiques des différents réseaux (par exemple, ferrés, autoroutiers) réagissent différemment aux variations des économies des pays.

Considérons d'abord les chemins de fer. L'indice β a été conçu comme une mesure de la connectivité du réseau³. Les valeurs obtenues indiquent que les réseaux ferrés des pays changent d'une région à l'autre en fonction de l'évolution de l'économie des pays. *Les régions très développées ont des réseaux ferrés à forte connectivité et inversement. Le degré de connectivité d'un pays n'est influencé ni par sa taille, ni par sa forme, ni par son relief.*

La forme⁴ des réseaux ferrés évolue également. *Les pays très développés ont des réseaux ferrés dont la forme est telle que le diamètre du réseau représente une petite partie de la longueur totale du réseau et inversement.* Les pays moins développés économiquement ont tendance à avoir des réseaux ferrés d'une forme telle que le diamètre du réseau représente une part relativement plus importante de la longueur totale du réseau et vice versa. Les régions les moins développées ont des réseaux tels que le diamètre est égal, ou presque égal, à la longueur totale du réseau.

1. Voir figure 20.

2. Les interférences gouvernementales semblent être une force perturbatrice majeure.

3. Voir page 15.

4. Voir indice π page 22.

En outre, *les pays très développés ont des réseaux ferrés* avec un nombre de sommets plus élevé. Les pays moins développés ont un nombre de sommets relativement plus faible.

Plus le degré de développement économique d'un pays est élevé, plus l'arête moyenne du réseau ferré est courte et vice versa. Cependant, *la longueur de l'arête moyenne est également corrélée de manière significative à la taille du pays et au relief*¹.

Deux facteurs, le degré de développement économique et la taille des pays, contribuent de manière significative aux variations de l'ordre des intersections ferroviaires. *Les pays très développés ont tendance à avoir un nombre relativement plus élevé d'intersections d'ordre 1. Les grands pays ont relativement moins d'intersections d'ordre supérieur que les petits pays.*

Des conclusions similaires peuvent être présentées pour les réseaux d'autoroutes d'ordre supérieur. Les variations des propriétés structurelles des autoroutes sont équivalentes aux variations des réseaux ferrés. Seules *deux exceptions* ont été mis en évidence par les résultats. *Le lien moyen et l'ordre d'intersection des réseaux routiers ne sont pas significativement associés au relief.* Ainsi, la structure des réseaux autoroutiers d'ordre élevé n'est significativement associée qu'au niveau de développement économique et à la taille.

Les analyses des États et des comtés reproduisent dans une large mesure les analyses des pays. Les coefficients de corrélation étant plus faibles pour les analyses par État et par comté, ces analyses sont toutefois considérées comme moins satisfaisantes. Néanmoins, en raison du caractère redondant de nombreux résultats au niveau des États et des comtés, on peut conclure que les régularités de la structure du réseau révélées par la comparaison avec les caractéristiques régionales peuvent être définies également pour les zones d'étude plus petites.

1. Voir tableau 17.

Chapitre VIII

Prédire la structure des réseaux de transport

L'objectif ultime de cette étude est de formuler un modèle prédictif de la structure des réseaux de transport. L'une des conditions nécessaires à un modèle prédictif est une description ordonnée des changements structurels de la géométrie du réseau. Comme les changements suivent une séquence logique, ils peuvent être caractérisés numériquement et verbalement. Les indicateurs disponibles issus de la théorie des graphes sont des descriptions numériques des changements. Étant donné que chacun de ces indicateurs décrit ces changements à sa manière et qu'ils sont complémentaires, les descriptions numériques peuvent être complétées par une description verbale qui doit souligner la cohérence logique des changements dans un langage formel non ambigu. Cette description verbale devrait faciliter la compréhension et l'application du modèle prédictif de la géométrie du réseau. En d'autres termes, il est postulé que le modèle prédictif devrait être basé sur un système axiomatique de la structure du réseau tel que le système consiste en des descriptions théoriques écrites dans un langage formalisé² expliquant les modifications du réseau.

2. Il n'est pas pertinent de discuter si, ou dans quelle mesure, les théories géographiques peuvent être exprimées dans des langages axiomatiques. Ce n'est qu'en formalisant certaines théories ou concepts géographiques que l'on peut apprendre quelle est l'étendue et le rôle de la formalisation en géographie. Nous tentons ici de formaliser l'évolution de la structure du réseau afin d'attirer l'attention sur les potentialités de la formalisation en géographie, et d'explorer ses possibilités d'utilisation et sa pertinence. Il est évident que si un ensemble de théories géographiques est écrit dans un langage formalisé, les théories peuvent être réécrites en code et ainsi comparées, vérifiées, étendues, simplifiées et interprétées par des ordinateurs. [Dans ce plaidoyer assez timide en faveur de l'axiomatique \(si on le compare à ce que William Bunge écrit en 1962 dans *Theoretical Geography*\), Kansky utilise le terme de *theorem-making machines* traduit faute de mieux par ordinateur.](#)

Système axiomatique

Afin de clarifier les changements de la géométrie du réseau, nous tentons de décrire le développement structurel en termes d'expressions significatives. À proprement parler, nous proposons de dupliquer les indicateurs $(\beta \dots \iota)$ par une description formalisée. Chaque indicateur structurel $(\beta \dots \iota)$ est capable de décrire une propriété spécifique du réseau de telle sorte que toutes les valeurs, estimées théoriquement, puissent être attribuées individuellement à toutes les variations théoriquement possibles de la géométrie du réseau. Ainsi, l'éventail de toutes les valeurs théoriquement possibles d'un indicateur est égal en théorie à l'éventail de toutes les variations possibles de la configuration du réseau. L'étendue des valeurs (par exemple pour l'indice β de 0 à 3) est équivalent à l'ensemble des changements qui se produisent dans le processus de développement de la structure de réseau, de la forme la plus simple à la plus complexe. Étant donné que les indicateurs issus de la théorie des graphes ne décrivent qu'une seule propriété du réseau (β par exemple décrit le « degré de connectivité »), ils doivent être considérées simultanément. La structure du réseau S au moment t peut donc être estimée par un ensemble d'indicateurs $(\beta \dots \iota)$. Puisque tous les indicateurs sont complémentaires¹, ils sont tous nécessaires à l'évaluation de la structure S . Évaluer les changements signifie donc considérer toutes les variations structurelles théoriquement possibles telles qu'elles ont été révélées par les plages de valeurs théoriquement possibles de $\beta \dots \iota$. Parmi l'énorme quantité d'évolutions possibles, certains changements typiques ont été déterminés empiriquement. Ceux-ci sont postulés ici comme étant les modèles d'évolution structurelle sous-jacents de la géométrie du réseau et sont décrits par des expressions simples. En combinant ces expressions simples et significatives dans un système, nous espérons caractériser le modèle de base des évolutions d'une manière non ambiguë. Nous considérons que ces expressions sont significatives car elles consistent en un ensemble spécifique de termes, tel que cet ensemble contient certains termes non définis (termes primitifs) et certains termes définis, qui ont été construits à partir de termes non définis uniquement en employant des règles écrites spécifiques de définitions (transformations²).

A et E sont considérés comme des expressions indéfinies (primitives³). Soit A une zone fonctionnelle (région⁴) et E une voie de communication

1. Voir ci-dessus le concept de complémentarité des mesures, page 52.

2. Nous ne tentons pas de définir ces termes dans cette étude car nous supposons que le lecteur a une définition intuitive de ces termes à l'esprit. Toute définition subjective et intuitive, fondée sur des preuves empiriques, peut être substituée aux termes primitifs de ce texte.

3. Certaines de ces règles de transformation (ou opérations) ont été tirées de la théorie des ensembles et de l'algèbre ($\langle \rangle$), d'autres sont proposées par l'auteur (τ, λ).

4. Pour une définition intuitive de A voir note 3 page 60.

(lien) de toute forme et de tout type. A et E peuvent être considérés comme des ensembles A_i et E_i .

Les affirmations suivantes définissent la signification des règles de fonctionnement (ou transformations) :

$X \in Y$: X est contenu dans Y ou X est un sous-ensemble de Y .

$X = Y$: $X \in Y$ et $Y \in X$.

$X \cap Y$: l'intersection de X et Y est le sous-ensemble qui est contenu dans X et Y .

$X \cup Y$: l'union de X et Y est l'ensemble qui contient X , Y et le sous-ensemble $X \cap Y$.

$X \supset Y$: X implique¹ Y .

$X \tau Y$: X précède Y dans le temps.

$X \lambda Y$: X est situé avant Y (la distance entre un point arbitraire 0 et X est inférieure à celle entre 0 et Y).

$x \in X$: x est un élément de l'ensemble X .

$X > Y$: X est plus grand que Y ou X est plus développé que Y ou X est plus long que Y et ainsi de suite.

Définitions

$N =_{df.} \cup E_i$: le réseau N est l'union de toutes les voies de communication E_i .

$P =_{df.} P \in N$: le réseau partiel P est le sous-ensemble du réseau N .

$v^0 =_{df.} E_0 \cap E_0$: le sommet d'ordre 0 v^0 est l'intersection de deux voies de communication inexistantes.

$v^1 =_{df.} E_0 \cap E_i$: le sommet d'ordre 1 v^1 est l'intersection de la route E_i avec une route inexistante E_0 .

$v^2 =_{df.} E_i \cap E_j$: le sommet d'ordre 2 v^2 est l'intersection de deux routes E_i et E_j .

$v^n =_{df.} E_i \cap E_j \cap \dots \cap E_n$: le sommet d'ordre n est l'intersection des n routes $E_i \dots E_n$.

$F =_{df.} v^1$: le terminal F est un sommet d'ordre 1.

$C =_{df.} v^2 \cup v^2$: le circuit est l'union d'au moins deux sommets d'ordre 2.

Axiomes²

-
1. Cette implication peut être définie : $p \supset q =_{df.} (\neg p \vee q)$ comme l'écrit Russell.
 2. Les axiomes de cette étude sont des phrases primitives qui sont déduites des résultats de l'étude, nous les considérons donc comme des affirmations en partie validées par des preuves empiriques.

Axiome 1.

$N \in A$: le réseau de transport N est situé dans une région fonctionnelle A .

Axiome 2.

$v_i \lambda v_j$: il existe un ordre topologique entre deux sommets tel que la distance entre le sommet v_i et un point arbitraire 0 est inférieure à la distance entre le sommet v_j et le point 0 ¹.

Axiome 3.

$(N_i \tau N_j) \supset (N_i < N_j)$: il existe un processus évolutif de changements structurels tel que le réseau N_i antérieur au réseau N_j est de structure plus simple.

Axiome 4.

$(P_i > P_{i+1}) \supset P_j$: si la structure d'un réseau P_i (qui est antérieure au réseau P_{i+1}) est plus développée que la structure de P_{i+1} , il doit exister au moins un autre réseau P_j (autre mode de transport) dans la zone A .

Axiome 5.

$v^n \tau v^{n+1}$: les sommets d'ordre inférieur précèdent dans le temps les sommets d'ordre supérieur.

Axiome 6.

$(N_i \tau N_j) \supset (v_i < v_j)$: lorsque le réseau N_i évolue vers le réseau N_j , cela signifie que le nombre de sommets du réseau N_j (v_j) est supérieur au nombre de sommets du réseau N_i (v_i) et/ou que le nombre de sommets est constant mais que l'ordre d'au moins un sommet a augmenté.

Axiome 7.

$(N_i \tau N_j) \supset (E_i > E_j)$: lorsque le réseau N_i évolue vers le réseau N_j , la longueur métrique des arêtes de N_j (E_j) tend à être plus courte que la longueur métrique des arêtes de N_i (E_i).

Axiome 8.

$(N_i > N_j) \supset (F_i > F_j)$: lorsque le réseau N_i est plus développé que N_j , cela signifie que le réseau N_i possède relativement plus de terminaux que N_j .

Axiome 9.

$(N_i > N_j) \supset (C_i < C_j)$: lorsque le réseau N_i est plus développé que N_j , cela signifie que le réseau N_i a relativement moins de circuits que le réseau N_j .

Cette combinaison de neuf axiomes ne satisfait pas aux exigences d'un système axiomatique tel que le conçoivent les logiciens pour au moins deux

1. Cette relation λ est également valable pour la distance métrique puisqu'il n'y a pas de contradiction dans la structure du réseau entre les distances topologique et métrique.

raisons : (1) les axiomes, bien que déduits de preuves empiriques, ne sont que partiellement validés par des observations empiriques et (2) le système ne contient pas d'énoncés démontrables (théorèmes) et, par conséquent, il ne peut pas être complet et cohérent¹. Néanmoins, ce système « semi-axiomatique » peut être considéré comme la première et nécessaire base d'un système axiomatique entièrement formalisé des évolutions de la structure d'un réseau.

Un test intensif des axiomes devrait révéler si tout ou partie des axiomes est empiriquement valide. Un test formel des axiomes peut ensuite être tenté, ce qui devrait valider les théorèmes. En organisant les théorèmes dans un système axiomatique complet et cohérent, les modifications de la géométrie du réseau seraient entièrement décrites par un langage formalisé.

L'ensemble des neuf axiomes ainsi que les indicateurs de la théorie des graphes suggèrent certaines tendances générales de localisation dans les changements de la géométrie du réseau. La séquence suivante de relations spatiales au sein d'une zone A semble être valable pour tout réseau de transport N_i .

1. La surface de A n'est pas différenciée par le réseau de transport N_i ; seuls les v^0 existent.
2. La surface de A est différenciée par le réseau de transport N_i ; certains sous-ensembles de A contiennent le réseau de transport N_i , certains sous-ensembles ne le contiennent pas ; v^0, v^1, v^2, v^3, v^4 existent dans la surface A .
3. La surface entière de A contient le réseau de transport N_i ; v^0 n'existe pas, v^1 et v^2 sont en nombre décroissant, v^3 est prédominant.
4. La zone A contient des centres de forte concentration de voies de transport : v^3 et v^4 sont prédominants, $v^8 \dots v^n$ existent dans la zone A .

Ces tendances suggèrent que les changements de la géométrie du réseau peuvent être caractérisés comme un processus de centralisation² de sorte que le nombre et l'ordre des sommets augmentent continuellement. L'augmentation peut être comprise comme un processus d'addition (ou de soustraction, voir l'axiome 4) arithmétique. Puisque tout système pouvant être décrit par une manipulation arithmétique est un système logique, cela implique que les changements des structures de réseau sont logiques et, par conséquent, peuvent être entièrement expliqués et prédits.

La structure logique des changements de la géométrie des réseaux est apparue grâce aux indicateurs de la théorie des graphes et aux axiomes. Les axiomes assurent une économie de pensée lorsqu'ils sont appliqués aux modèles de réseau. Ainsi, pour évaluer la géométrie du réseau ou pour expliquer

1. Le terme *cohérent* signifie que les axiomes du « système » sont non contradictoires.

2. Centralisation à de nombreux niveaux : les arêtes se concentrent simultanément à des sommets d'ordre variable ($v^1, v^2 \dots$)

le modèle spatial existant d'un réseau de transport donné, il faut confronter les axiomes aux modèles de réseau existants. Cette confrontation devrait révéler le degré de développement structurel et esquisser les tendances futures de la géométrie du réseau. Par conséquent, les neuf axiomes peuvent être considérés comme un modèle général explicatif et prédictif de nature qualitative. L'applicabilité concrète d'un modèle qualitatif étant limitée, le système axiomatique, tel que présenté ci-dessus, est utilisé comme base logique du modèle prédictif quantitatif de la structure du réseau.

Modèle prédictif

Notre intention est de présenter un modèle prédictif viable de la structure des réseaux. Les preuves empiriques des chapitres précédents ont révélé des régularités dans la géométrie des réseaux ainsi que des relations fonctionnelles stables dans le temps et l'espace entre structure des réseaux et caractéristiques régionales. Les preuves empiriques rassemblées ont montré que la relation de succession qui existe entre les stades d'évolution de la géométrie du réseau est contrôlée par l'ampleur et la localisation des caractéristiques régionales. Cette succession de changements de la géométrie du réseau dans le temps et l'espace ainsi que la formulation numérique de la relation ρ nous permettent de concevoir un modèle prédictif quantitatif. Puisque la relation fonctionnelle ρ a été définie par des outils statistiques¹, la relation ρ peut être considérée comme une régularité (loi) statistique. Ce qui est reconnu comme étant le plus prévisible, c'est qu'un groupe défini de nœuds de transport a une probabilité donnée d'être relié par certaines routes dans un système de transport. En d'autres termes, la prédiction sera de nature statistique plutôt que causale (déterministe).

Le « système axiomatique » précédent a caractérisé les changements dans la structure du réseau comme le processus d'ajout de voies de transport. Les paramètres de la relation entre géométrie du réseau et caractéristiques régionales ont démontré que le processus d'ajout est contrôlé par les caractéristiques régionales et peut être déduit statistiquement de celles-ci. Les indicateurs issus de la théorie des graphes sont capables de décrire quantitativement les modèles de réseau et les valeurs de ces indicateurs peuvent être calculées statistiquement à partir des caractéristiques régionales. Un modèle quantitatif de prédiction de la structure du réseau peut donc être construit, de telle sorte que l'ensemble des caractéristiques régionales ($c_1 \dots c_4$) soit proportionnel aux valeurs des indicateurs définissant la structure du réseau T_S :

1. Il a été supposé que les variables du système de corrélation ont un caractère stochastique.

$$(c_1, c_2, c_3, c_4) = (\beta, v, \eta, \iota) = T_S. \quad (8.1)$$

Cependant, le modèle prédictif 8.1 générerait une géométrie de réseau qui ne serait pas limitée à la zone dont elle fait partie. Par conséquent, l'expression 8.1 ne définit pas la relation spatiale entre la structure du réseau T_S et la zone A . Pour ce faire, l'expression 8.1 doit être complétée de manière à ce que la structure du réseau T_S soit localisée dans la zone A : le modèle de localisation des caractéristiques régionales doit donc être incorporé dans 8.1.

Puisque deux aspects des caractéristiques régionales, l'intensité et la localisation, ont été identifiés comme des éléments nécessaires, le modèle prédictif peut être écrit sous une forme générale étendue :

$$(T_S)^i = (QC_i) + (LC_i). \quad (8.2)$$

La structure du réseau T_S est proportionnelle à l'intensité des caractéristiques régionales (QC_i) et à leur distribution géographique (LC_i). Si nous remplaçons QC_i par un ensemble de variables individuelles caractérisant la région et LC_i par leurs localisations, nous pouvons écrire :

$$T_S = Q(c_1, c_2, \dots, c_n) + L(c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (8.3)$$

où c_1 est le degré de développement économique de la zone A , c_2 la taille et c_n sa n^e caractéristique. La première moitié de 8.3 rappelle la relation non fonctionnelle¹ qui est le modèle statistique appliqué aux preuves empiriques dans les chapitres précédents. Par conséquent, 8.3 peut être réécrit en changeant la notation :

$$T_S = (a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e) + L(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (8.4)$$

où $x_1 = c_1$ et où, de manière générale, $x_n = c_n$, comme défini dans 8.3.

Le modèle prédictif 8.4 est construit comme une régularité statistique et il incorpore deux hypothèses : (1) on suppose que la structure des réseaux de transport a tendance à passer de stades improbables à des stades plus probables au cours de son développement ; (2) la géométrie la plus probable du réseau est localement la plus similaire au schéma de localisation des activités économiques, du relief physique et d'autres éléments et elle est limitée par la taille et la forme du réseau. Par conséquent, le modèle 8.4 permettrait de prédire les étapes les plus probables de la structure du réseau.

1. Voir ci-dessus page 39.

Comme le suggère l'axiome 4, la structure d'un réseau de transport spécifique T_S dépend des autres réseaux de transport de la zone A . Le modèle 8.4 devrait tenir compte de cette dépendance avec les autres modes de transport. Puisqu'un réseau de transport N d'une zone A peut interagir avec les autres réseaux de transport de A , la structure de N sera influencée par les structures des autres réseaux de transport de la zone A . Cela suggère que la géométrie de N ne peut être prédite qu'en tenant compte des modèles spatiaux des autres réseaux de transport de la zone A . Étant donné qu'il existe un grand nombre de réseaux de transport dans une zone A , de formes et d'étendues diverses, il semble impossible de prédire la structure de N . Heureusement, la notion d'« additivité des réseaux de transport »¹ permet une approche simplifiée du problème. Ce concept indique que les différents réseaux de transport sont des sous-ensembles du système de réseau qui contient tous les réseaux de transport de toutes les formes. Les différents réseaux de transport, ou les sous-ensembles, sont fonctionnellement interdépendants et leur étendue et leur localisation sont limitées par l'étendue de l'ensemble du système de transport. La structure des principaux réseaux de transport (chemins de fer, autoroutes d'ordre supérieur. . .) est similaire, du point de vue de la localisation, à la structure et à l'étendue de l'ensemble du système de transport. Cela signifie que la structure des chemins de fer et des autoroutes est dans une large mesure redondante mais que la redondance spatiale concerne principalement les réseaux de transport hautement développés. Néanmoins, la formule 8.4 semble être un modèle prédictif satisfaisant de la structure du réseau.

Le modèle 8.4 peut être utilisé pour la prédiction des réseaux de transport de zones d'étude plus petites et d'ordre inférieur. Cependant, nous nous attendons alors à des probabilités plus faibles que notre prédiction soit valide. Étant donné que les réseaux de transport contenus dans les unités d'ordre inférieur font partie intégrante des réseaux des unités d'ordre supérieur et qu'ils sont fonctionnellement liés, cela implique que les prédictions générées par 8.4 pour les unités d'ordre inférieur dépendent des prédictions d'ordre supérieur et inversement². Si nous essayons de prédire la structure du réseau d'un comté c_i , nous devons appliquer le modèle 8.4 à c_i , et confronter le résultat avec la prédiction du réseau de transport de la région et du pays. Cet argument peut être résumé :

$$(T_S)^3 = (T_S)^2 = (T_S)^1 \quad (8.5)$$

où T_S signifie la structure du réseau, 3 est l'unité d'ordre 3, c'est-à-dire

-
1. Voir ci-dessus page 68.
 2. Cela signifie que la structure d'un réseau de transport T_S dans la zone A est la somme des structures des sous-ensembles (ou sous-graphes) de A .

le comté, 2^e l'unité d'ordre 2, c'est-à-dire la région, et l' l'unité d'ordre 1, c'est-à-dire le pays. On peut lire : la structure d'un réseau du comté c_i est proportionnelle au réseau équivalent de la région s_i (où $c_i \in s_i$) et est proportionnelle au réseau équivalent du pays C_i (où $s_i \in C_i$). En substituant 8.2 à 8.5, il est évident que

$$(QC_i)^3 + (LC_i)^3 = (QC_i)^2 + (LC_i)^2 = (QC_i)^1 + (LC_i)^1 \quad (8.6)$$

d'où, *via* 8.4

$$\begin{aligned} (T_S)^1 &= [(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4) + L(x_1, x_2, x_3, x_4)]^2 \\ &= [(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4) + L(x_1, x_2, x_3, x_4)]^3 \end{aligned} \quad (8.7)$$

ou sous forme générale

$$(T_S)^1 = (QC_i)^n + (LC_i)^n. \quad (8.8)$$

Les règles suivantes précisent l'ordre des étapes logiques de l'application de 8.4 en tant que modèle prédictif de la structure des réseaux de transport : (1) déterminer les unités d'observation de la recherche ; c'est-à-dire, définir l'ordre 1, 2, ... le x^e ordre ; (2) calculer un indicateur des activités économiques de la zone A , la taille de la zone A , le degré de variabilité du relief et la forme de la zone A à chaque ordre ; (3) localiser les centres des activités économiques et les zones de plus grande variabilité du relief ; (4) calculer les indicateurs de la théorie des graphes ($\beta \dots \iota$) à chaque niveau à partir des équations de ce texte (présentées dans le chapitre IV) et calculer les indices $\beta \dots \iota$ à partir d'une série chronologique de la zone A si nécessaire¹ (5) construire la carte la plus probable de la structure du réseau en utilisant les indicateurs de la théorie des graphes et localiser ce réseau dans la zone A par une technique de simulation, comme illustré ci-dessous.

Application du modèle prédictif

Le modèle prédictif général 8.4 est appliqué ici afin de souligner ses potentialités et sa valeur pratique. Puisqu'il possède une large gamme de validité temporelle, il peut être utilisé ici à des fins prédictives et rétrospectives. Ces fins étant équivalentes², nous avons choisi à titre d'exemple de reconstruire

1. Les coefficients de régression de la série « spatiale » devraient être suffisants pour calculer les indicateurs de la théorie des graphes. Cependant, en considérant les coefficients de corrélation de la série « temporelle », nous pouvons augmenter la probabilité de notre prédiction car, ce faisant, nous pouvons tenir compte des variations locales à un degré plus élevé.

2. Le processus rétrospectif peut également être nommé *explication*.

le réseau ferré de la Sicile en 1908. Cette région semble être suffisamment petite et simple pour être présentée ici comme un exemple instructif. L'année 1908 a été sélectionnée car les cartes du réseau ferré et les statistiques économiques des villes siciliennes sont disponibles pour cette année-là. Les cartes ont été conçues comme un moyen de contrôler les résultats obtenus par la technique rétrospective.

Le développement structurel d'un réseau de transport peut être compris comme un processus d'addition, tel que révélé par le système axiomatique, de sorte que les voies de transport sont progressivement ajoutées dans une zone fonctionnelle et réunies en un système. Comme il existe une relation fonctionnelle entre structure du réseau et caractéristiques régionales, le nombre de voies ferrées et leur longueur moyenne en Sicile en 1908 peuvent être estimés à partir de l'importance des activités économiques¹, la taille de la Sicile, la variabilité du relief et la forme de l'île. L'ordre d'apparition des routes peut être déterminée à partir des modèles de distribution des caractéristiques économiques et de la variabilité régionale du relief.

On suppose que la Sicile en 1908 était une région fonctionnelle isolée par la mer Méditerranée. On suppose également que le réseau ferré en 1908 était le reflet des caractéristiques régionales de l'île. Bien que certaines influences « exogènes » aient pu être superposées au réseau ferré par le gouvernement italien pour des raisons politiques, militaires ou autres, on espère que ces influences « exogènes » n'ont pas été les principaux facteurs de la structure d'ensemble du réseau ferré sicilien.

Imaginons que la répartition de la population de la Sicile soit aléatoire. Les gens se livrent individuellement à diverses activités économiques. Chaque personne possède son propre réseau de sentiers (ou d'autres formes primitives de réseaux de transport) qui change rapidement d'un jour à l'autre. Puis les individus commencent à s'organiser selon une forme d'économie plus efficace. Les réseaux de transport individuels (sentiers) sont progressivement remplacés et/ou complétés par d'autres formes de transport plus efficaces². La concentration des activités économiques dans des lieux déterminés s'accompagne de leur intensification. Lorsque le nombre d'activités économiques

1. Les résultats empiriques de cette étude confirment notre intuition selon laquelle plus une région est économiquement importante, plus la demande de transport est élevée. Pour une étude détaillée de cette relation, voir : N. A. Boukidis, David Boyce, W. L. Garrison, Waldo Tobler, « The Location of Transportation Routes. Connections Between Two Points » ; Partie d'un rapport non publié : Transportation Geography Study, par le Transportation Center of Northwestern University pour l'U. S. Army Transportation Research Command, Fort Eustis, Virginie, et Perle, *op. cit.*. [Le fait de choisir une fois encore une île permet de contourner les problèmes liés à l'impact des réseaux des territoires voisins sur les indicateurs.](#)

2. Puisque la relation ρ est une relation symétrique (voir page 104), on peut dire que la concentration des activités économiques ne peut être réalisée que par un réseau de transport d'un mode supérieur aux sentiers.

atteint un certain niveau ou un certain « seuil », certaines formes de transport plus développées voient le jour.

Le montant total des activités économiques en Sicile en 1908 a permis à l'économie sicilienne d'avoir un nombre donné de voies ferrées¹. Comme l'équation 3.4 a été résolue empiriquement, nous sommes en mesure de déduire le nombre probable de voies ferrées à partir des caractéristiques géographiques de la Sicile. Il s'ensuit que le problème de la reconstruction du réseau ferré se limite à la localisation des voies ferrées.

La répartition des voies ferrées peut être exprimée en termes de probabilité de concentration d'activités économiques. Chaque concentration d'activités économiques a une certaine probabilité d'être reliée au réseau ferré. Plus le nombre d'activités économiques concentrées en un lieu donné est important, plus la probabilité que ce lieu soit relié au réseau ferré est élevée ; de plus, ce lieu serait un sommet d'ordre supérieur du système ferroviaire. Chaque forme d'activité économique nécessitant un niveau variable de services ferroviaires, les scores de probabilité des lieux peuvent être ajustés en conséquence.

Conformément aux règles d'application (voir page 118), la Sicile a été considérée comme une région fonctionnelle. Par souci de brièveté, la reconstruction n'est tentée qu'à un seul niveau : la Sicile, en tant qu'unité de recherche d'ordre 2, est la plus petite unité politique considérée ici. L'unité de recherche d'ordre 1 (Italie) est utilisée à des fins de comparaison uniquement pour estimer la valeur de l'échelle technologique. Les modèles de localisation des activités économiques sur le territoire italien ne sont probablement pas significatifs dans ce cas puisque la Sicile est une partie isolée de l'unité d'ordre 1.

Le degré de développement économique (échelle technologique) de la Sicile en 1908 a été estimé en utilisant les équations de l'étude comparative de Berry². Étant donné que la Sicile est traitée comme un pays (ordre 1) et que plusieurs critères approximatifs sont utilisés³ pour estimer l'intensité de

1. On peut soutenir que l'économie sicilienne a atteint un montant donné d'activités économiques grâce au réseau ferré existant. Les deux arguments sont valables comme le spécifie la propriété symétrique de la relation ρ .

2. Voir Berry in Ginsburg, *op. cit.*, la première régression, p. 118 : $Y = 312.95 - 20.72 - 52.68 + 50.22 = 253.60$. Cette valeur de Y a été ajustée en comparant les variations du degré d'urbanisation entre 1908 et 1955, les variations du nombre de médecins par habitant et les variations de la circulation des journaux ; la valeur est estimée de manière approximative à 260.

3. Les données relatives au degré d'urbanisation, au nombre de médecins par habitant et à la diffusion des journaux pour la période comprise entre 1908 et 1955 sont rares. Pour cette raison, les informations offertes par ces indicateurs du degré de développement économique ne sont pas très fiables et l'ajustement temporel de l'échelle technologique est donc basé, dans une certaine mesure, sur des estimations approximatives qui peuvent être fausses.

l'échelle technologique, il se peut que la valeur 81 (206 = 2^e valeur) ne soit pas une estimation fiable du « vrai » degré de développement économique¹.

La superficie de la Sicile est de 9 925 miles carrés². L'indicateur de relief est de 14³. La forme de l'île a été estimée à 2.53 à l'aide de l'équation 3.5. En utilisant l'équation des tableaux 10 et 15, nous avons calculé les mesures structurelles de la Sicile pour 1908 :

- $v_{RR} = 16.48$ (+1 erreur type = 17.78 ; -1 erreur type = 15.44)⁴,
- $\beta_{RR} = 1.13$ (+1 erreur type = 1.27 ; -1 erreur type = 1.00)⁵,
- $\eta_{RR} = 17.62$ (+1 erreur type = 24.27 ; -1 erreur type = 12.92)⁶.

Ces trois valeurs sont considérées comme les indicateurs de base de la structure du réseau. Pour la démonstration de l'applicabilité du modèle, elles constituent également des indicateurs suffisants. Elles décrivent la structure probable du réseau ferré sicilien en 1908 en spécifiant des limites précises à certaines propriétés de base du système ferroviaire. Cependant, ces indications ne disent rien sur les schémas de localisation du réseau probable. Ils ne déterminent que le caractère structurel d'un système qui doit être localisé (comme le suggère l'expression 8.2).

1. La validité de la valeur de l'échelle technologique n'est pas très importante à ce stade de la discussion puisque l'objectif principal de cette partie du chapitre est de montrer comment le modèle prédictif peut être appliqué de manière concrète. Les résultats de cette application comptent moins que la méthode. Nous aurions pu utiliser une région hypothétique comme exemple de l'applicabilité du modèle. Comme il existe une certaine antipathie pour les exemples hypothétiques dans la littérature géographique récente, nous avons choisi la Sicile comme exemple pratique en espérant que cet exemple soit plus illustratif qu'une région hypothétique.

2. *Encyclopaedia Britannica World Atlas, op. cit.*

3. Pour la définition de cet indicateur, voir 3.6.

4. [La note de bas de page originale est ici divisée en trois, une note par indicateur.](#) - $v_{RR} = .6922 + (-1.3047 \times .260) + (-.0056 \times 3.9967) + (+.0011 \times 14.00) + (-.0240 \times .4031) = .6922 - .3392 - .0223 + .0154 - .0096 = .3365$. On obtient $v_{RR} = 16.48$ sommets. L'erreur type est de 0.0610, (voir tableau 13). Donc, en ajoutant 1 erreur type, $v_{RR} = 17.78$ et en soustrayant 1 erreur type, $v_{RR} = 15.44$. La plage de valeurs entre +1 erreur type et -1 erreur type spécifie que nous avons 66% de chance que la valeur observée de v_{RR} se situe entre 17.78 et 15.44.

5. $\beta_{RR} = 2.2429 + (-.6838 \times .260) + (-.0055 \times 3.9967) + (+.0007 \times 14.00) + (+.0015 \times .4031) = 2.2409 - .1777 - .0219 + .0098 + .0006 = 2.0537$. On obtient $\beta_{RR} = 1.13$. L'erreur type est de 0.0506 (voir tableau 13). Par conséquent, l'intervalle entre +1 erreur type et -1 erreur type est : 1.27 - 1.00.

6. $\eta_{RR} = -.3112 + (+.3646 \times .260) + (+.0852 \times 3.9967) + (-.0019 \times 14.00) + (-.0051 \times .4031) = -.3112 + .0947 + .3405 - .0266 - .0020 = .0954$. On obtient $\eta_{RR} = 17.62$ miles ; l'intervalle entre +1 erreur type et -1 erreur type est de 24.27 - 12.92. (Erreur type = 0.497 ; voir tableau 18). La valeur de η_{RR} est évidemment fortement surestimée car cette mesure est significativement corrélée à la variable taille (voir tableau 17). L'équation empirique du tableau 15 a été estimée pour les pays, c'est-à-dire pour des unités politiques plus grandes. Comme nous appliquons cette équation à la Sicile (qui est considérablement plus petite que les pays, voir tableau 3), la variable de taille fausse considérablement la valeur de η_{RR} .

Afin de localiser le réseau ferré imaginaire sur le territoire, nous utilisons une technique de simulation simple. Étant donné que la structure du réseau ferré est liée à l'importance et à la localisation¹ des activités économiques et du relief, et qu'elle est influencée par la taille de la région (voir tableaux 12 et 17), nous pouvons localiser le réseau imaginaire sur le territoire en observant les localisations de ces caractéristiques et en comparant leur intensité.

Le tableau 38 présente les statistiques sur les revenus de certaines grandes agglomérations siciliennes². En simulant ces valeurs, qui sont considérées comme un indicateur illustrant la quantité relative d'activités économiques dans chaque ville (par exemple, le degré de développement économique), nous espérons établir la liste des localités qui auraient la plus forte probabilité d'être situées sur le réseau ferré. En raison de la relation ρ , on suppose que plus le niveau d'activité économique d'une ville est élevé, plus la probabilité que cette ville soit située sur le réseau ferré est élevée.

Les statistiques de revenu de toutes les localités ont été transformées en scores de probabilité de la manière suivante : les données de revenu ont été sommées en colonne et transformées en base 100 (voir tableau 38, colonne 2 ; $29\,820 = 100\%$). Le pourcentage de revenu par ville dans le total est donc le score de probabilité. La colonne 4 du tableau 38 contient ces scores de probabilité, scores convertis en nombres entiers en déplaçant la virgule (de 0.0083 à 83, de sorte que $1.00 = 10\,000$). Nous pouvons décider quelle ville serait un carrefour ferroviaire en tirant un nombre aléatoire dans une table de chiffres aléatoires. Si le nombre aléatoire se situe entre 00001 et 00083, Alcamo sera considérée comme un sommet situé sur le réseau ferré³. Si le nombre aléatoire se situe entre 00084 et 00140, la deuxième ville sera considérée comme le sommet situé sur le réseau ferré, etc. Comme $v_{RR} = 16.48$, nous avons sélectionné à l'aide de cette procédure 16 (18) localités comme premier ensemble de villes susceptibles d'être reliées par chemin de fer en 1908.

En répétant ce processus de sélection aléatoire, nous avons obtenu les deuxième, troisième, quatrième et cinquième séries de villes. Puisque certaines localités ont été tirées à plusieurs reprises, nous avons considéré que ces localités étaient celles ayant la plus grande probabilité d'être situées sur le réseau ferré de 1908. La figure 27 présente ces villes. Dix-huit villes ont

1. Voir discussion au chapitre VII, page 106.

2. On suppose que la majeure partie des activités économiques siciliennes se situe dans ces agglomérations ; de plus, on suppose que plus le revenu total d'une ville donnée est élevé, plus le niveau des activités économiques dans cette agglomération est élevé. Ces valeurs sont donc considérées comme l'indicateur du volume total des activités économiques dans chaque localité. L'auteur ne prétend pas que les statistiques sur les revenus constituent la meilleure mesure du niveau des activités économiques. Elle a été introduite dans l'analyse parce que c'était le seul indicateur pertinent disponible pour cette année-là.

3. Voir observation 1. dans le tableau 38, colonnes 5 et 6.

TABLEAU 38 – Principales villes siliciennes - Revenus en 1908

Ville	Revenu en milliers de lires	Population en milliers	Probabilité relative	Scores simulés
1. Alcamo	<i>250</i>	<i>27</i>	83	00001-00083
2. Augusta	170	16	57	00084-00140
3. Avola	167	17.7	56	00141-00196
4. Bagheria	180	21	60	00197-00256
5. Biancavilla	206	14.2	69	00257-00325
6. Caltagirone	985	45	330	00326-00655
7. Caltanissetta	1 098	46	368	00656-01023
8. Castel-Termini	150	15.5	50	01024-01072
9. Castelvetro	<i>340</i>	24.5	114	01074-01187
10. Castrogiovanni	258	28	86	01188-01273
11. Catania	4 945	164	1 658	01274-02931
12. Comiso	154	27.3	51	02932-02982
13. Corleone	187	15.6	62	02983-03044
14. Girgenti	828	26	277	03045-03321
15. Leonforte	103	21.5	34	03321-03355
16. Marsala	633	64	212	03356-03567
17. Mazzarino	109	15	36	03568-03603
18. Messina	<i>4 000</i>	<i>150</i>	1 341	03604-04944
19. Naro	155	14	51	04945-04995
20. Nicosia	174	15	58	04996-05053
21. Noto	327	23	109	05053-05162
22. Palermo	11 082	321	3 716	05163-08878
23. Ragusa	264	36	88	08879-08966
24. Riesi	163	17	54	08967-09020
25. Sciacca	339	24.8	113	09021-09133
26. Scicli	133	18	44	09134-09177
27. Siracusa	740	37.7	248	09178-09425
28. Terra Nova	300	25	100	09426-09525
29. Trapani	1 204	70	403	09526-09928
30. Vizzini	176	18.5	59	09929-09987
Total	29 820		9 987	

Source : *Annuario Statistico delle Città Italiane, Anno III - 1909-1910* (Firenze : Alfani e Venturi, Editori, 1910), Table : I Grandi Comuni Italiani Nell'anno 1908, pp. 338-345. Les valeurs en italique sont des estimations.

été localisées sur cette carte, puisque $v_{RR} + 1$ erreur type = 17.73. Sur ces dix-huit sommets, quinze (ceux représentés par des points noirs sur la figure 27) sont considérés comme les sommets de base qui auraient été sélection-

nés même si la valeur la plus basse $v_{RR} = 15.44$ était prise comme valeur représentative.

En utilisant les valeurs de β_{RR} , on a construit un réseau imaginaire qui relie tous les sommets sélectionnés selon la règle suivante : connecter les deux plus grands centres d'activité économique ; ajouter progressivement des arêtes de manière à ce que le centre le plus grand suivant rejoigne le centre le plus grand et le plus proche¹ se trouvant déjà sur le réseau. Une fois que tous les sommets sélectionnés sont situés sur le réseau et qu'il reste des arêtes à allouer, la même règle peut à nouveau être utilisée, sous une forme légèrement différente, afin de localiser les arêtes supplémentaires : « si cela a un sens »², ajoutez l'arête de manière à compléter le circuit entre les premier, deuxième et troisième plus grands centres ; puis compléter le circuit entre les premier, deuxième et quatrième sommets ; ensuite compléter le circuit entre les premier, troisième et quatrième sommets et ainsi de suite. Puisque $\beta = 1.13 = \frac{18.10}{16}$ (ou $\frac{20.34}{18}$ ou $\frac{16.95}{15}$) si l'on considère 18 ou 15 sommets), nous pouvons utiliser 18 (ou 20 ou 17) arêtes pour construire le réseau. En appliquant la règle ci-dessus, la première phase du réseau « rétrospectif » a été localisée (voir figure 28) avec des arêtes numérotées selon l'ordre de reconstruction³.

Bien que la valeur de l'arête moyenne soit surestimée⁴, nous avons appliqué la valeur de η_{RR} sous une forme inchangée. La valeur de $\eta_{RRi} = 42.60$ miles (41.87 miles si on considère le réseau de 20 arêtes)⁵ diffère fortement de $\eta_{RRc} = 17.62$, ce qui suggère que le kilométrage total du réseau imaginaire doit être diminué afin de se rapprocher des valeurs de η_{RRc} . Comme le montre la figure 28, un certain nombre d'arêtes sont situées dans la même direction générale (par exemple les arêtes 14 et 4, 9 et 16, 13 et 8). Pour diminuer le kilométrage total du réseau imaginaire, les arêtes parallèles ont été combinées en une structure simplifiée (voir figure 29) tout en conservant le même nombre d'arêtes. Ce faisant, nous avons diminué la valeur de l'arête moyenne à $\eta_{RRi} = 36.97$ (36.24 si on considère le réseau de 18 arêtes). Étant donné que cette diminution ne se rapproche pas suffisamment de η_{RRc} , le concept de transformation « Y- Δ »⁶ a été employé comme méthode complémentaire

1. Distance à vol d'oiseau mesurée en miles.

2. « Si cela a un sens » est une expression indéfinie de la règle. Bien qu'indéfinie, un exemple peut en illustrer le sens. Il est sensé de compléter le circuit entre Palerme, Catane et Messine avec l'arête 18 (voir figure 28). Il n'est pas sensé de compléter le circuit entre Palerme, Catane et Trapani, car la route supplémentaire suivrait de très près la direction générale des arêtes 1 et 3.

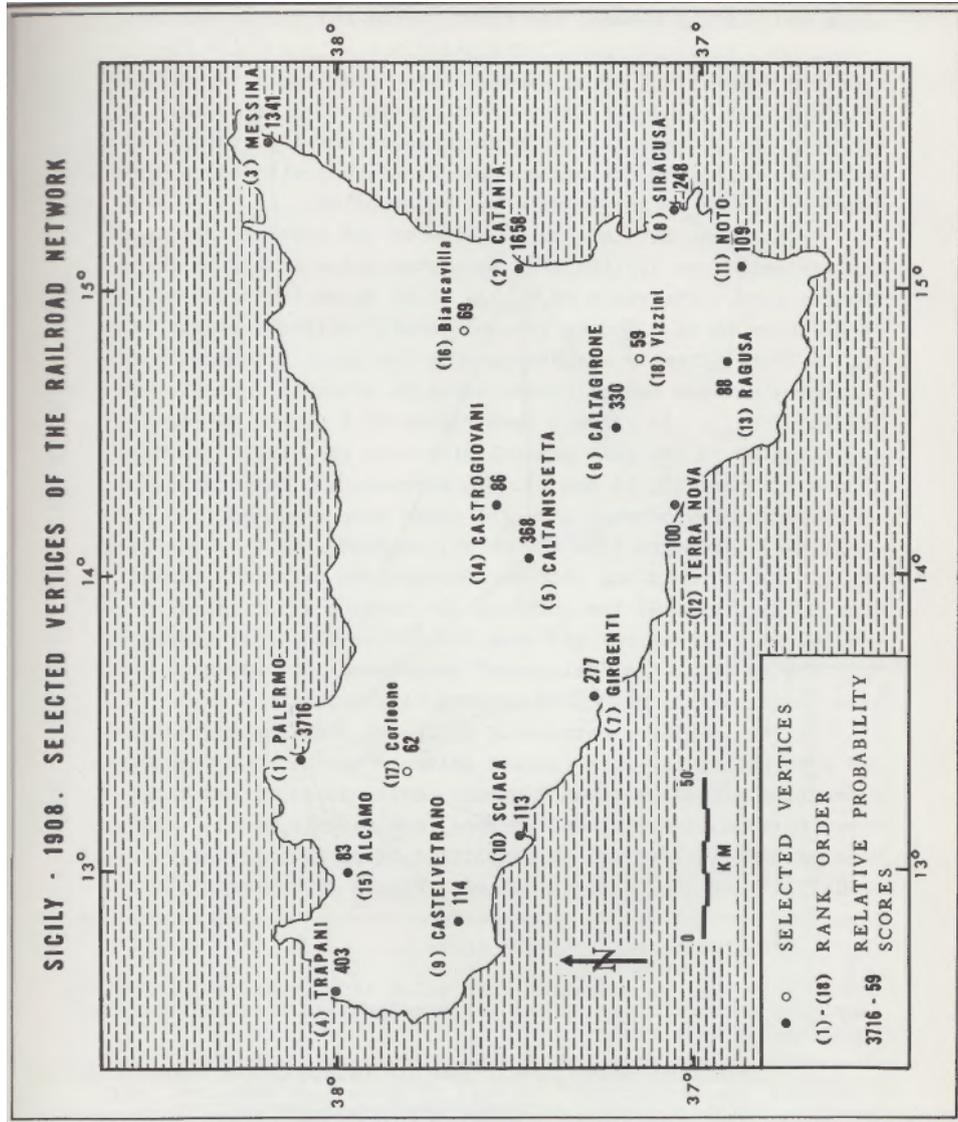
3. Tout ou partie des cartes qui suivent ont été reproduites sous une forme simplifiée dans Haggett, 1965, *Locational Analysis in Human Geography*, p. 305 et dans Haggett et Chorley, 1969, *Network Analysis in Geography*, p. 300.

4. Voir note 4 page 122.

5. Par η_{RRi} nous entendons que cette valeur est représentative du réseau imaginaire ; η_{RRc} est la valeur calculée à partir des équations empiriques de cette étude.

6. Sheldon B. Akers, Jr, « The Use of Wye-Delta Transformations in Network Simpli-

FIGURE 27 – Sicile-1908. Sommets du réseau ferré sélectionnés



de simplification des réseaux.

« fication », *Journal of Operations Research*, VIII (mai-juin 1960), 311-323. L'importance théorique de ce concept pour les systèmes de transport a été examinée mathématiquement par Boukidis, Boyce, Garrison et Tobler, *op. cit.* Ce concept peut être résumé géométriquement : il existe une tendance dans les systèmes de transport telle que trois sommets v_1, v_2, v_3 sont connectés sous la forme de Y au lieu d'un Δ . La transformation delta-Y, appelée également théorème de Kennelly, est issue des travaux sur les réseaux électriques.

FIGURE 28 – Sicile-1908. Réseau ferré simulé. Première phase

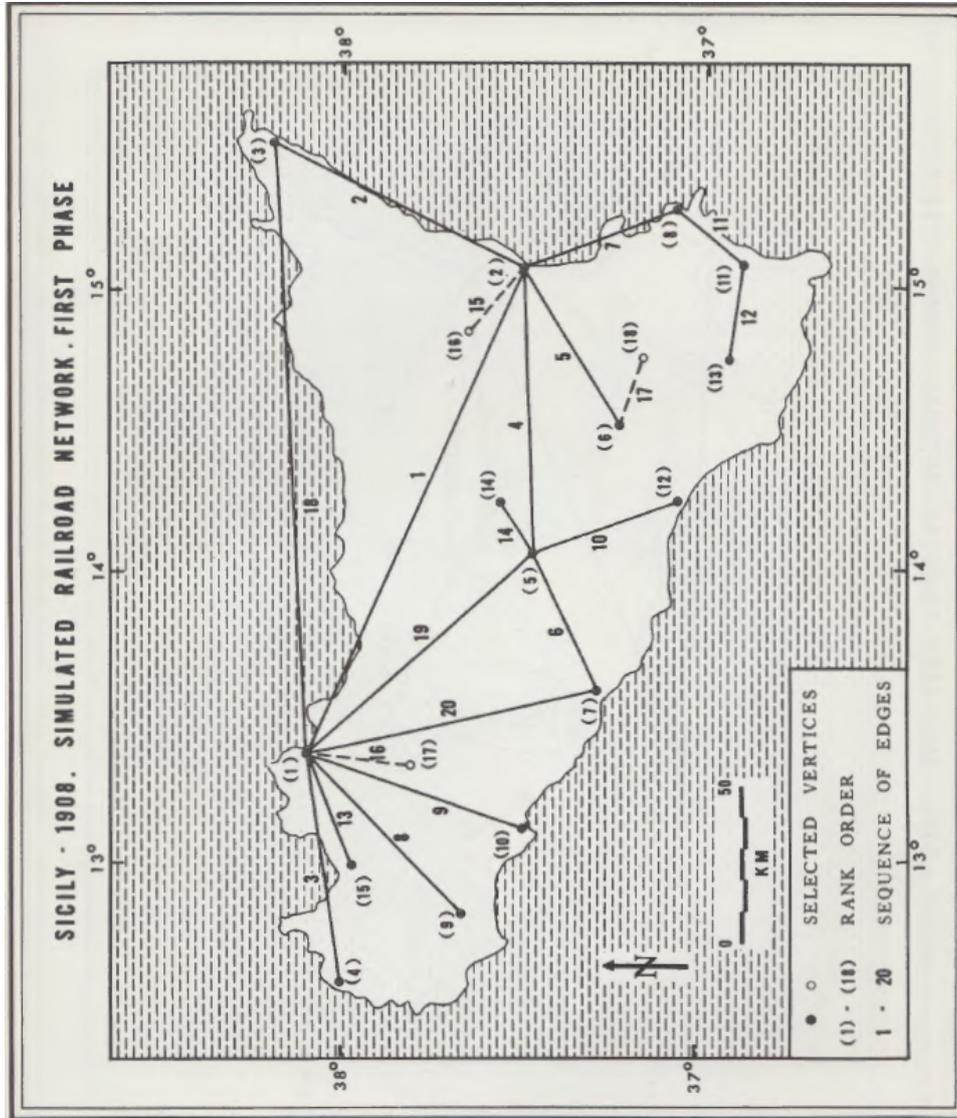


FIGURE 29 – Sicile-1908. Réseau ferré simulé. Deuxième phase

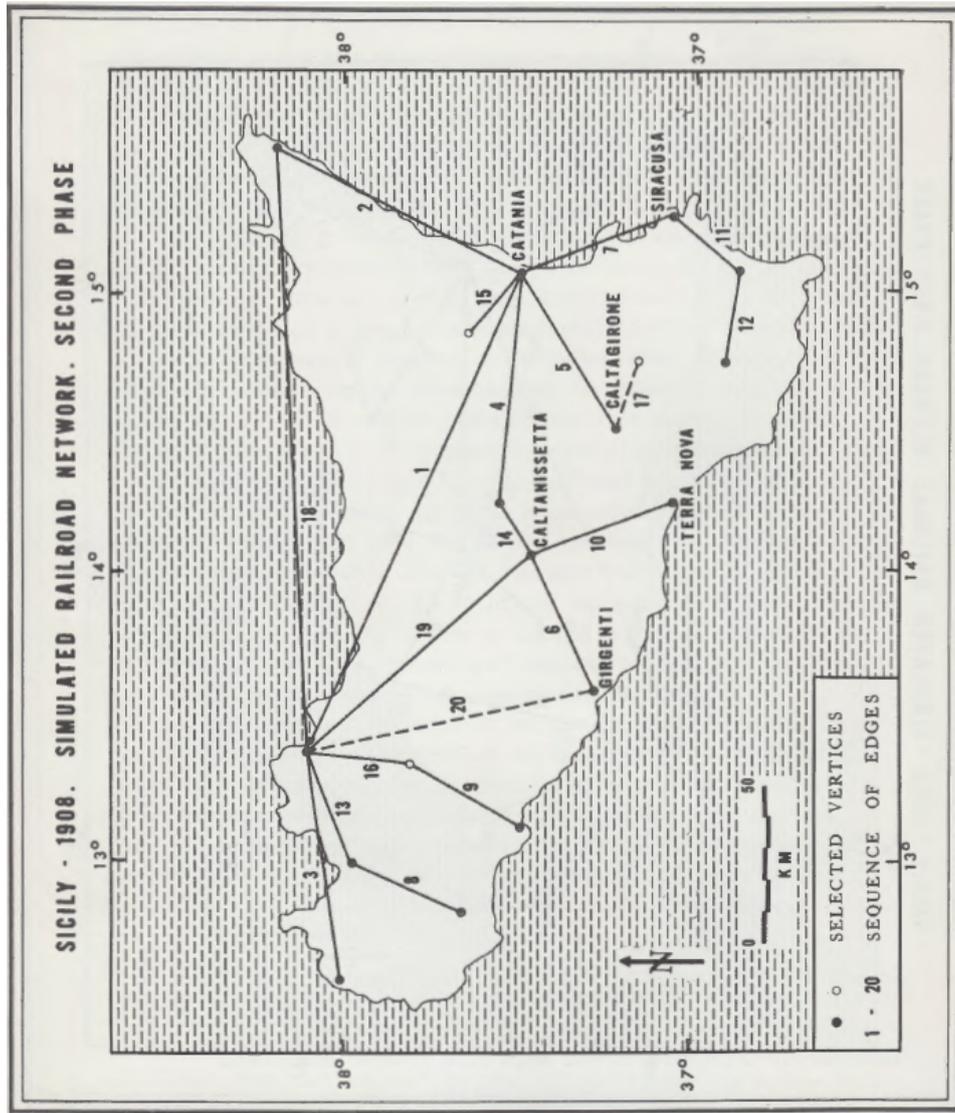
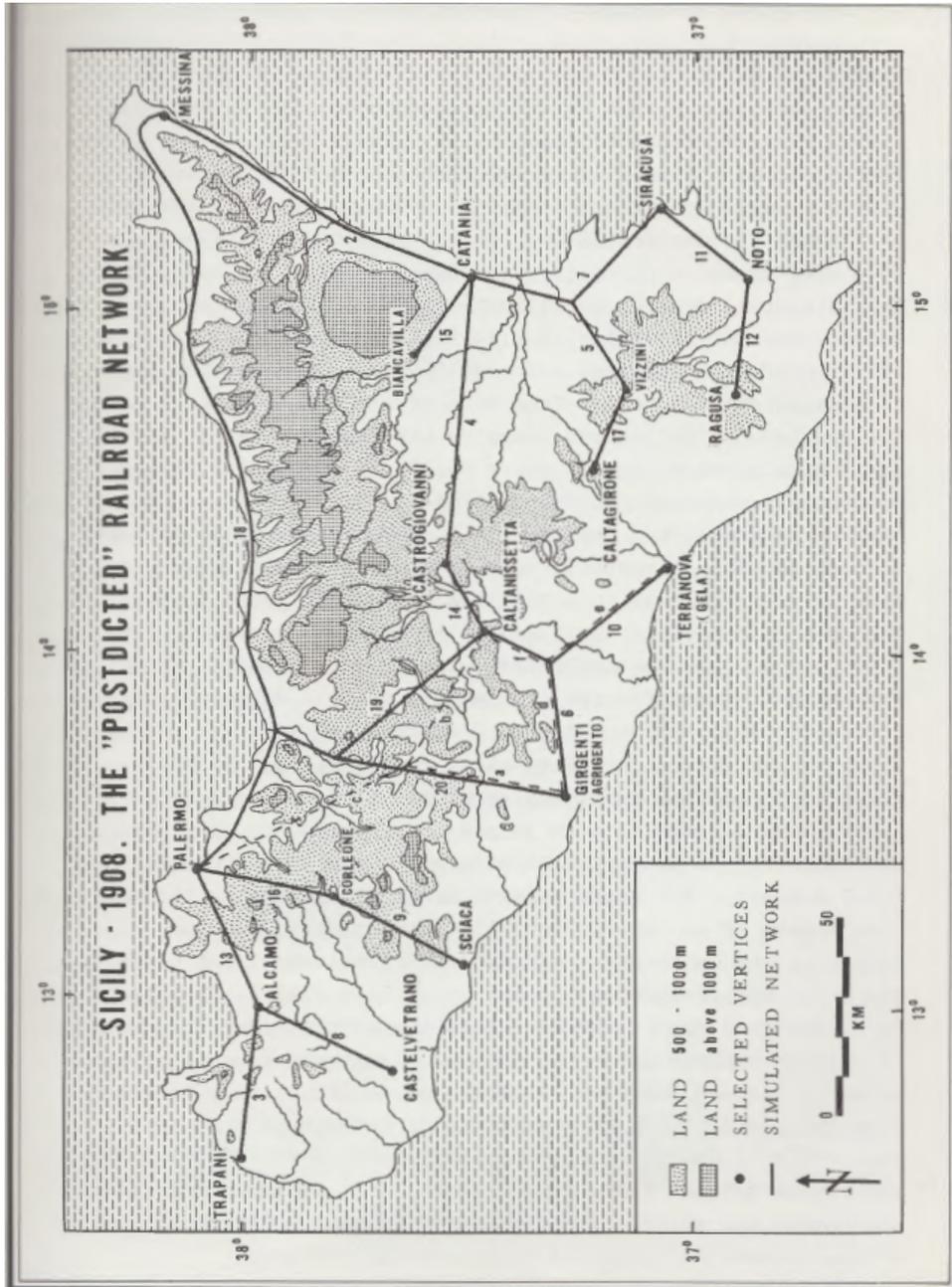


FIGURE 30 – Sicile-1908. Le réseau ferré « rétrospectif »



Le réseau imaginaire de la figure 29 contient trois circuits de forme triangulaire (appelés delta Δ) et plusieurs deltas incomplets (par exemple entre Girgenti, Caltanissetta et Terra Nova, entre Siracusa, Caltagirone et Catane, etc.). Tout ou partie de ces deltas peut être simplifié si la variabilité locale du relief le permet. La figure 30 présente les parties montagneuses de l'île délimitées comme des zones supérieures à 500 et 1 000 mètres au-dessus du niveau de la mer, tandis que certains « grands » fleuves suggèrent des endroits au relief moins prononcé. Le premier circuit entre Palerme, Catane et Messine encercle une zone au relief montagneux accidenté. Un tel phénomène de relief exclut l'application d'une transformation en Δ -Y. Puisque les voies 18 et 2 sont situées le long de la côte et qu'il n'y a pas de réseau ferré possible dans les zones situées au nord et à l'est de ces deux routes, ils peuvent être localisés en considérant uniquement le relief (voir figure 30.) Le second circuit (delta entre Palerme, Catane et Caltanissetta) traverse un relief variable principalement dans sa partie nord et nord-ouest, mais il est légèrement déformé par la localisation de Castrogiovani. La transformation en Δ -Y ne peut être appliquée qu'en partie. Sur une grande partie de sa longueur, le tracé 1 traverse le relief montagneux et semble avoir une localisation peu réaliste. Il est fort probable que les arêtes 4, 14 et 19, qui suivent approximativement la même direction générale, se substituent à cette arête théorique et remplissent ses fonctions. Comme la partie nord-ouest de la route 19 traverse un terrain accidenté et que la route 18 suit une direction parallèle, la route 19 peut suivre un chemin au relief moins variable et rejoindre la route 18. Le troisième circuit peut être entièrement simplifié par la transformation en Δ -Y (entre Palerme, Caltanissetta et Girgenti). Les lignes en pointillé (a, b, c) de la figure 30 suggèrent l'emplacement des bords de l'Y. Le relief variable le long de la route 20 renforcerait l'emplacement des bords a , b et c . Puisque les arêtes b et c sont situées à proximité de l'arête 19 et qu'elles vont toutes deux dans la direction souhaitée, la route 19 peut être considérée comme le substitut des arêtes b et c . La route entre Girgenti et Caltanissetta fait également partie d'un delta incomplet entre Caltanissetta, Girgenti et Terra Nova. En raison d'un terrain relativement plat, la transformation en Δ -Y peut être appliquée intégralement. Les lignes d , e et f de la figure 30 constituent les connexions Y simplifiées de ce circuit incomplet. Le circuit imaginaire suivant du réseau, entre Palerme, Girgenti et Sciacca, ne peut être simplifié en raison du terrain très montagneux de cette zone. Les routes 9 et 16 suivent donc la direction de la ligne droite. Comme les routes entre Trapani et Alcamo, Castelvetro et Alcamo, et Alcamo et Palerme constituent une formation en Y, aucune simplification de la structure du réseau n'est nécessaire dans cette zone.

La partie sud-est du réseau ferré peut être construite en utilisant la même approche de transformation en Δ -Y. Les plus grands centres de cette zone, Siracusa et Caltagirone, forment un delta incomplet avec Catane. Ce delta

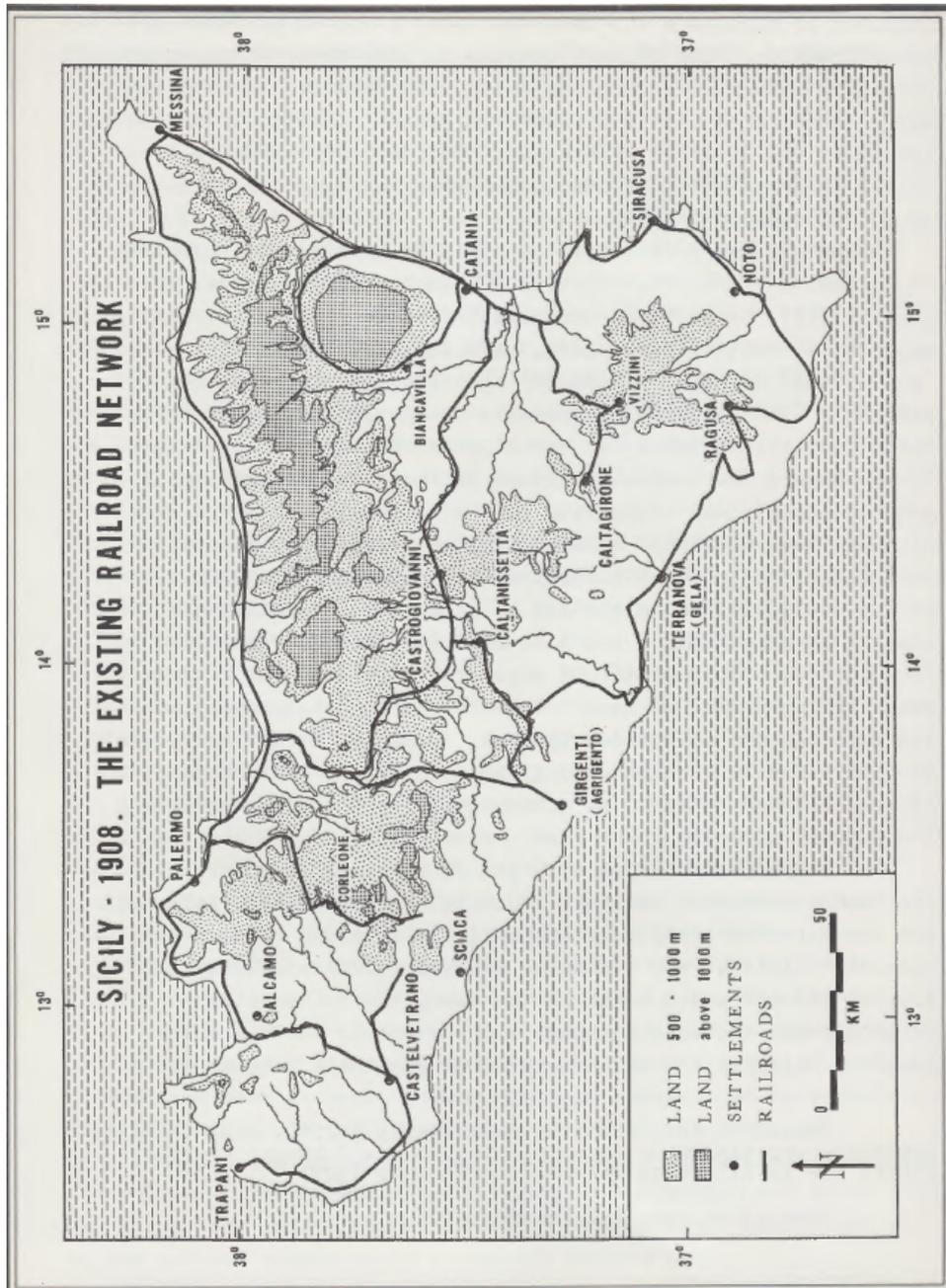
peut être simplifié en une formation en Y légèrement déformée par l'emplacement de Vizzini. En raison du relief des zones situées au nord de Ragusa et de Noto, l'emplacement des routes 12 et 11 reste inchangé.

Le réseau de la figure 31 pourrait être localisé plus précisément en suivant un ensemble d'estimations locales du relief. Comme cela n'est pas pertinent pour l'objectif de cette étude, aucune tentative n'a été faite ici. Une comparaison visuelle entre le réseau « rétrospectif » (figure 30) et le système ferré existant en 1908¹ (figure 31) révèle des différences de localisation qui résultent de la variabilité locale du relief. Si l'on compare la structure d'ensemble de ces deux réseaux, on constate une similitude géométrique générale entre les deux. Bien que le réseau rétrospectif n'ait pas rendu compte de plusieurs caractéristiques de la structure du réseau, l'application superficielle de la technique de prédiction peut être acceptée comme une tentative relativement réussie. Puisque les données utilisées dans cette technique de prédiction étaient incomplètes et superficielles et que plusieurs décisions ont été prises de manière subjective, nous ne pouvons pas nous attendre à une concordance parfaite entre le système existant et le système prédit. Une meilleure prédiction pourrait probablement être accomplie si nous utilisions une analyse des séries chronologiques du réseau ferré² comme méthode comparative pour construire les modèles de réseau pour une période donnée.

1. Basé sur la carte suivante : Italie Méridionale, in *Atlas Universel* par Vivien de Saint-Martin et Fr. Schrader (Paris : Librairie Hachette et Comp., 1908).

2. Voir ci-dessus note 1 page 119.

FIGURE 31 – Sicile-1908. Le réseau ferré existant



La comparaison des figures 30 et 31 suggère un phénomène intéressant. Certains sommets (Catane, Caltanissetta, Palerme) sont déplacés complètement ou partiellement dans des zones situées en dehors des limites de la commune. Par exemple, le sommet Caltanissetta est situé à environ 4 miles au nord de la ville ; la route entre Castrogiovani et Catane crée un sommet à environ 6 miles au sud de Catane ; la route entre Girgenti et Palerme rejoint la route de Messine à environ 27 miles à l'est de Palerme. Pour des raisons de relief et/ou pour éviter la redondance inutile des voies ferrées, certaines arêtes ne se terminent pas exactement dans les centres d'activités économiques. Ils constituent des sommets intermédiaires qui peuvent cependant être considérés comme des sommets fonctionnels des villes les plus proches. Ceci suggère que deux types de sommets doivent être différenciés dans l'évaluation de la structure du réseau : (a) les sommets adéquats qui sont situés dans les limites des centres d'activités économiques et (b) les sommets intermédiaires qui sont situés en dehors des centres. Bien que cette différenciation ne soit pas importante pour cette étude, elle peut être nécessaire pour d'autres évaluations de la géométrie des réseaux.

Le modèle empirique 8.4 a été appliqué dans ce chapitre non pas pour démontrer sa validité mais pour illustrer son applicabilité concrète. L'objectif principal de l'application du modèle était de montrer comment on peut intégrer les mesures structurelles proposées dans la technique prédictive (ou rétrospective) et de suggérer une utilisation possible des techniques de simulation dans la construction de systèmes de transport futurs ou passés. Un objectif secondaire était de révéler que, dans la géométrie du réseau, on peut trouver certaines régularités pouvant être statistiquement liées aux caractéristiques régionales¹. Il ressort également de l'application du modèle qu'à ce stade de nos connaissances sur la structure des systèmes de transport, les critères subjectifs basés sur l'expérience empirique semblent être des facteurs complémentaires importants pour la prédiction des réseaux.

1. Les décisions concernant l'applicabilité de la transformation Y- Δ dans un circuit donné étaient basées sur des évaluations superficielles du relief physique. Ces évaluations subjectives peuvent être remplacées par une technique de simulation des données exprimant la distance entre les sommets et le degré de variabilité du relief physique.

Chapitre IX

Conclusion

Cette étude a examiné la relation entre structure des réseaux de transport et caractéristiques régionales. Notre objectif principal a été de définir cette relation en termes d'expressions significatives ainsi que de la mesurer par des méthodes statistiques. De plus, en examinant les variations de cette relation à travers l'espace et le temps, le travail tente de décrire les changements de la géométrie du réseau. En utilisant les définitions, les résultats théoriques issus de l'analyse statistique et le système axiomatique du développement structurel, un modèle prédictif de la structure du réseau a été conçu. Une application du modèle a suggéré sa valeur pratique.

La recherche s'est fondée sur la conviction que les données empiriques étudiées doivent être mesurées plutôt que définies de manière subjective. En d'autres termes, en mesurant les observations collectées, nous devrions être en mesure de détecter les propriétés pertinentes de l'objet étudié. Cette conviction nous a conduit à mobiliser l'abstraction mathématique et a inspiré l'utilisation d'outils statistiques ainsi que l'application des énoncés de la théorie des graphes et des méthodes de la logique mathématique. Cette approche semblait être la méthode la plus pertinente et la plus efficace pour étudier la structure spatiale des systèmes de transport. Bien que cette méthode ait été présentée de manière quelque peu superficielle et rudimentaire, elle doit être considérée comme un exemple d'approche à améliorer. Toutefois, cela ne signifie pas que cette méthode doive être considérée comme la seule manière efficace d'étudier la géométrie des réseaux.

Un modèle prédictif de la structure du réseau a été proposé, modèle basé sur les résultats des analyses de régression. Le modèle autorise la reconstruction [de réseaux] du passé et les hypothèses quant aux modèles futurs des systèmes de transport. Le fait que nous ayons construit le modèle à partir de données empiriques suggère l'interaction entre les observations empiriques et la théorie. En d'autres termes, le processus de collecte des données ou

le processus de mesure a toujours été basé sur certaines notions théoriques, bien qu'intuitives, qui ont facilité la sélection des données pertinentes. En répétant progressivement les confrontations entre données et théorie, nous avons obtenu un modèle prédictif qui peut être utilisé avec succès pour décrire les changements structurels des réseaux. Cependant, ce modèle n'est pas le seul dispositif correct pour décrire les changements structurels des systèmes de transport. Il peut être révisé, complété ou remplacé par d'autres modèles prédictifs. Comme il s'agit d'une première approximation, le modèle n'est pas « bien défini ». Son application concrète à un cas d'étude ne peut être considérée comme une vérification de sa validité. Comme dans le cas de tous les modèles rudimentaires, il nécessite encore des tests rigoureux. Seule une accumulation d'études de cas, basées sur un échantillon statistique représentatif, permettrait d'y parvenir. Le modèle semble néanmoins être une méthode fiable pour prévoir la structure spatiale complexe des réseaux de transport.

Plusieurs lacunes et imperfections de l'étude sont évidentes. Le manque de données et les lacunes dans la couverture cartographique de certaines régions ont diminué la qualité des analyses statistiques. Les mesures et les analyses statistiques étant longues et coûteuses, la recherche ne pouvait être menée à une échelle plus grande et plus fine. De nombreuses questions restent donc sans réponse et plusieurs hypothèses ne sont pas vérifiées. Le langage et la terminologie de l'étude sont inhabituels et peut-être difficiles à comprendre. Par exemple, les notations symboliques et les expressions conceptuelles peuvent dérouter le lecteur. En outre, certaines des illustrations, des graphiques et des cartes n'ont peut-être pas la qualité et la clarté souhaitées.

Le sujet de l'étude a été conçu comme un système de relations et décrit dans un langage relationnel. On pourrait arguer que le sujet aurait pu être étudié tout aussi efficacement en utilisant une autre terminologie. Puisque l'algèbre des relations peut être traduite en théorie des ensembles et donc remplacée par un autre métalangage, cet argument n'aurait évidemment aucune pertinence. Le sujet de cette étude peut être étudié à l'aide de n'importe quel langage significatif.

Conscient des limites de l'étude, nous pensons que cette recherche contribuera à une meilleure compréhension du sujet. Bien qu'il s'agisse de la première tentative, quelque peu imparfaite, de comprendre les complexités de la structure des réseaux, l'étude présente quelques énoncés théoriques qui pourraient être inclus dans une théorie générale des activités de transport.

Définition des termes relatifs à la théorie des graphes

*Arbre*¹

Un arbre est un graphe connexe d'au moins deux sommets et qui ne contient aucun circuit.

Boucle

Une boucle est un circuit composé d'un seul lien.

Chemin

Un chemin est un ensemble fini de liens où chaque lien e_i est connecté au lien e_{i-1} *via* l'un de ses sommets et au lien e_{i+1} par un autre sommet.

Circuit

Un circuit est un chemin fini dans lequel le sommet initial v_1 coïncide avec le sommet terminal v_2 .

Graphe (G)

Le graphe G est un ensemble qui comprend deux sous-ensembles d'éléments : (1) un sous-ensemble de sommets et (2) un sous-ensemble de liens.

Graphe connexe

Un graphe connexe est un graphe qui ne contient aucun sous-graphe isolé.

1. L'ordre des entrées a été modifié afin de le présenter dans l'ordre alphabétique français. Le lexique fourni par Kansky en annexe de sa thèse est très court, 2 pages seulement et 15 entrées. Certains termes paraissent étranges et n'étaient déjà pas d'usage courant à l'époque : on parlait plus volontiers de *complete graph* (graphe complet) que de *maximal connected graph*. D'autres définitions peuvent paraître manquer d'efficacité : définir la boucle comme circuit composé d'un seul lien est logique (un circuit d'un seul lien ne peut que lier un sommet à lui-même) mais peu intuitif ; la définition du sous-graphe est peu compréhensible, comme celle du graphe non-planaire. La définition du sommet exclut de fait les terminaux.

Graphe connexe maximal

Un graphe est appelé graphe connexe maximal s'il existe un lien entre toute paire de sommets.

Graphe fini

Un graphe fini est un graphe qui contient un nombre fini d'éléments.

Graphe non connexe

Un graphe est non connexe s'il contient deux sous-graphes isolés ou plus.

Graphe partiel (P)

Le graphe partiel P est le graphe tel que : (1) chaque élément de P est un élément du graphe G , (2) certains éléments de P sont membres du sous-graphe S_i et d'autres du sous-graphe S_j et (3) des éléments du sous-ensemble S_i sont membres de P (voir l'exemple du chapitre V, page 78, note 1).

Graphe planaire

Un graphe planaire est un graphe projeté dans un plan tel que aucun lien n'a de point en commun qui ne soit un sommet. Un graphe non planaire est un graphe projeté dans un espace à deux dimensions ou plus.

Lien (e)

Un lien est un élément du graphe G tel que $e \in G$. C'est une ligne continue entre un sommet v_i et un sommet v_j .

Sommet (v ¹)

Un sommet v (aussi appelé nœud ou point) est un élément du graphe G tel que $v \in G$. C'est le point d'intersection de n liens.

Sous-graphe (S)

Un sous-graphe est un graphe qui est inclus dans le graphe G tel que tout élément du sous-groupe G est un élément de G et certains éléments du graphe G sont des éléments d'un sous-graphe S .

Sous-graphe partiel (PS)

Un sous-graphe partiel (PS) est le graphe partiel P du sous-graphe S .

1. Dans le texte original, un e est indiqué entre parenthèses, il s'agit selon toute vraisemblance d'une coquille, v étant employé tout au long du texte pour désigner les sommets.

Bibliographie

Livres et articles

Akers, Sheldon B. Jr. « The Use of Wye-Delta Transformation in Network Simplification », *Journal of Operations Research*, VIII, No. 3 (1960), 311-323.

Avondo-Bodino, Giuseppe. *Economic Applications of the Theory of Graphs*. New York : Gordon and Breach, 1962.

Berge, Claude. *Théorie des graphes et ses applications*. Paris : Dunod, 1958. English translation by Alison Doig. *Theory of Graphs and its Applications*. London : Methuen, and New York : Wiley, 1962.

Berry, Brian J. L. « An Inductive Approach to the Regionalization of Economic Development », in *Essays on Geography and Economic Development*. Edited by N. S. Ginsburg. Chicago : University of Chicago Press, 1961.

Berry, Brian J. L. « Basic Patterns of Economic Development », in *Atlas of Economic Development*. Edited by N. S. Ginsburg. Chicago : University of Chicago Press, 1961.

Berry, Brian J. L. and Pred, Allan. *Central Place Studies ; a Bibliography of Theory and Applications*. Philadelphia : Regional Science Institute, 1961.

Boukidis, N. A., Boyce, David, Garrison, W. L., Tobler, Waldo. « The Location of Transportation Routes. Connections Between Two Points », Portion of an unpublished report : « Transportation Geography Study », by the Transportation Center at Northwestern University for the U.S. Army Transportation Research Command, Fort Eustis, Virginia.

Burton, Ian. « Accessibility in Northern Ontario : An Application of Graph Theory to Regional Highway Network ». Portion of an unpublished report for the Ontario Department of Highways¹.

1. Ian Burton a extrait en 1963 de ce rapport une proposition d'article pour la revue *Economic Geography* ; la proposition a été refusée.

- Christaller, Walter. *Die zentralen Orte in Suddeutschland*. Jena : G. Fischer, 1933.
- Churchman, C. West. *Prediction and Optimal Decision*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall Inc., 1961.
- Duncan, Otis. *Statistical Geography : Problems in Analyzing Areal Data*. Glencoe, Ill. Free Press, 1961
- Dunn, Edgar Streeter. *The Location of Agricultural Production*. Gainesville : University of Florida Press, 1954.
- Ezekiel, Mordecai and Fox, Karl A. *Methods of Correlation and Regression Analysis - Linear and Curvilinear*. New York : J. Wiley and Sons, 1959.
- Fogel, Robert William. « The Social Saving Attributable to American Railroads in the Interregional Distribution of Agricultural Products in 1890 : An Application of Mathematical Models to a Problem in History ». (Mimeographed)¹.
- Garrison, William L. « Connectivity of the Interstate Highway System », *Papers and Proceedings*, Regional Science Association, VI (1960), 122-137.
- Garrison, William L. and Marble, Duane. « The Structure of Transportation Networks », Portion of an unpublished report : « Transportation Geography Study », by the Transportation Center at Northwestern University for the U.S. Army Transportation Research Command, Fort Eustis, Virginia.
- König, Dénes. *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen*, Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H., 1936.
- Lalanne, Leon. « An Essay on the Theory of Railway Systems, Based On Observation of Facts and the Basic Laws Governing Population Distribution », *Comptes rendus des seances de l'academie des Sciences*, LVII (1863), 206-210.
- Langer, Susanne K. *An Introduction to Symbolic Logic*. New York : Dover Publications, Inc., 1953.
- Lösch, August. *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*. Jena : G. Fischer, 1940.
- MacKay, Je Ross. « The Interactance Hypothesis and Boundaries in Canada : A Preliminary Study », *Canadian Geographer*, No. 11, (1958), pp. 1-8.
- Nystuen, John D. and Dacey, Michael F. « A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions », *Papers and Proceedings*, Regional Science Association, VII (1961), 29-42.

1. [Un article homonyme est paru en 1961 dans *Econometrica*. Vol. 29. No. 3. 108](#)

Perle, E. D. *Time Series Analysis of Transportation Development. A Regional Econometric Analysis of the Demand for Transportation*. Chicago : University of Chicago Press, forthcoming.

Peters, William S. « The Transportation Network as a Region », *Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Conference of the Western Economic Association*. (1959), pp. 50-58.

Prihar, Z. « Topological Properties of Telecommunication Networks », *Proceedings*, Institute of Radio Engineers, XLIV (1956), 929-933.

Quenouille, Maurice H. *The Analysis of Multiple Time-Series*. London : Ch. Griffin and Co., 1957.

Quine, Willard Van Orman. *Methods of Logic*. New York : Holt, Rinehard and Winston, 1961.

Rosander, A. C. *Elementary Principles of Statistics*. New York : D. Van Nostrand, 1951.

Seshu, Sundaram and Reed, Myril B. *Linear Graphs and Electrical Networks*. Reading, Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1961.

Shimbel, Alfonso. « Structural Parameters of Communication Networks », *Bulletin of Mathematical Biophysics*, XV (1953), 501-507.

Thomas, Edwin N. *Maps of Residuals from Regression : Their Characteristics and Uses in Geographic Research*. Iowa City : State University of Iowa, Department of Geography, 1960.

Ullman, Edward L. *American Commodity Flow ; A Geographical Interpretation of Rail and Water Traffic Based on Principles of Spatial Interchange*. Seattle : University of Washington Press, 1957.

Weber, Alfred. *The Theory of Location of Industries*. Chicago : University of Chicago Press, 1929.

Whitehead, A. N. *Science and the Modern World*. New York : MacMillan, 1925.

Sources statistiques et cartographiques

Annuario Statistico delle Citta Italiane, Anno III - 1909-1910. Table : I Grandi Comuni Italiani, Nell'anno 1908. Firenze : Alfani e Venturi, Editori, 1910.

Atlas of Economic Development. Edited by N. S. Ginsburg. Chicago : University of Chicago Press, 1961.

- Atlas Universel* par Vivien De Saint-Martin and Fr. Schrader. Paris : La Librairie Hachette and Comp., 1908 ¹.
- France. Ministère du Commerce, de l'Industrie et des Colonies. *Statistiques Coloniales pour l'année 1870-*. Paris : Imprimerie National, 1870.
- Germany. Kaiserliches Statistisches Amt. *Statistisches Jahrbuch für das Deutsche Reich*. Berlin : Verlag Von Puttkammer and Muhlbrecht, 1880- .
- Gousha American Highway Atlas*. San Jose-Chicago : H. M. Gousha Company, 1956.
- Italy. Ministero dei Lavori Pubblici, Direzione Generale delle Strade Ferrate. *Carta delle Ferrovie Italiane*. Torino : 1875, 1880, 1884.
- Italy. Ministero delle Finanze. *Movimento Commerciale del Regno d'Italia*. Roma : 18- .
- Lartilleux, Henry. *Géographie des Chemins de Fer Français*. Paris : Librairie Chaix, 1949.
- Sales Management*. Survey of Buying Power, New York, 1955.
- Statesman's Year-Book*. Statistical and Historical Annual of the States of the World. London : MacMillan and Co. Ltd., 1865- .
- U.S. Bureau of the Census. *Census of Population : 1960*. Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office, 1961.
- U.S. Bureau of the Census. *County and City Data Book*. Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office, 1949.
- World Railways, 1954-1955*. Edited by Henry Sampson. New York : Rand McNally and Company, 1956.
- The Times Atlas of the World, Mid-Century Edition*. Edited by John Bartholomew. London : The Times Publishing Company Ltd., 1956.

1. Selon la [page wikipedia](#) de Vivien de Saint-Martin, le titre complet est *Atlas universel de géographie construit d'après les sources originales et les documents les plus récents*. La page de son co-auteur [Franz Schader](#) évoque un *Atlas universel de géographie* paru en 1923. Pages consultées le 28 juillet 2020. Je n'ai pas (pas encore) réussi à trouver la trace de cet ouvrage sur Gallica.

groupe f.m.r.



La collection « [textes](#) » du groupe fmr (flux, matrices, réseaux) propose des rééditions bilingues d'articles consacrés à l'analyse de réseaux.

Disponibles en ligne

- L. Beauguitte, P. Beauguitte et P. Gourdon, 2021, « [William L. Garrison, 1960, Connectivity of the Interstate Highway System](#) ».
- L. Beauguitte et M. Maisonobe, 2021, « [Joseph B. Kruskal, 1956, On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem](#) ».
- L. Beauguitte et M. Maisonobe, 2021, « [E.W. Dijkstra, 1959, A Note on Two Problems in Connexion with Graphs](#) ».
- L. Beauguitte, 2021, « [Alfonso Shimbel, 1951, Application of Matrix Algebra to Communications Nets](#) ».
- L. Beauguitte, 2021, « [Alfonso Shimbel, 1953, Structural Parameters of Communication Networks](#) ».
- L. Beauguitte, 2021, « [Z. Prihar, 1956, Topological Properties of Telecommunication Networks](#) ».
- L. Beauguitte et M. Maisonobe, 2021, « [Alex Bavelas, 1948, A Mathematical Model for Group Structures](#) ».
- L. Beauguitte et J. Fen-Chong, 2021, « [Alex Bavelas, 1950, Communication Patterns in Task-Oriented Groups](#) ».
- L. Beauguitte, 2021, « [Forrest R. Pitts, 1965, A Graph Theoric Approach to Historical Geography](#) ».
- L. Beauguitte, 2021, « [M. L. Northway, 1940, A method for depicting social relationships obtained by sociometric testing](#) ».
- F. Bahoken et L. Beauguitte, 2021, « [John D. Nystuen and Michael F. Dacey, 1961, A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions](#) ».
- F. Bahoken et L. Beauguitte, 2022, « [Edward L. Ullman, 1949, Mapping the world's ocean trade: A research proposal](#) ».
- L. et P. Beauguitte, 2022, « [F. L. Hitchcock, 1941, The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities](#) ».
- F. Bahoken, 2022, « [W. R. Tobler, 1969, Review of Sémiologie graphique: Les Diagrammes – Les réseaux – Les Cartes](#) ».
- F. Bahoken et L. Beauguitte, 2022, « [P. R. Gould, 1967, On the Geographical Interpretation of Eigenvalues](#) ».

- L. Beauguitte, F. Bahoken et J. Fen-Chong, 2022, « [E. Forsyth et L. Katz, 1946, A Matrix Approach to the Analysis of Sociometric Data](#) ».
- L. Beauguitte et F. Bahoken, 2023, « [J.L. Moreno et H.H. Jennings, 1938, Statistics of social configurations](#) ».
- L. Beauguitte, 2023, « [G. D. Dantzig, 1960, On the Shortest Route Through a Network](#) ».