



MASTER PARISTECH TRANSPORT ET DEVELOPPEMENT DURABLE

PROMOTION 2011

MISSION PROFESSIONNELLE DE FIN D'ETUDES

Guillaume CURNIER

Evaluer l'impact d'une nouvelle ligne de transport en commun de grande capacité sur le développement socio-économique d'une mégalopole :

**Le cas du calibrage du modèle Pirandello et son application
à la ligne A du RER parisien**

Nom complet de l'organisme d'accueil : VINCI

Adresse : 5 rue Ferdinand de Lesseps, 92500 Rueil-Malmaison

Composition du jury :

- Président : Emeric Fortin
- Tuteur professionnel : Laurent Chastenet
- Encadrant principal : Jean Delons
- Tuteur académique : Nicolas Coulombel

Confidentialité :

☐ Pas de confidentialité ☐ 3 ans ☐ 5 ans ☐ 10 ans ☐ 15 ans ☐ 20 ans

Table des matières

Table des matières	3
Liste des Tables.....	4
Résumé	5
Remerciements	6
1. Contexte de l'étude.....	7
1.1. Mission professionnelle de fin d'études.....	7
1.2. Pirandello : un nouvel outil adapté au contexte français	7
1.3. Le Grand Paris.....	7
2. Les LUTI en manque de références.....	9
2.1. Transport et utilisation des sols	9
2.1.1. L'interaction à la base des théories.....	9
2.1.2. Les nombreuses théories	11
2.1.3. Et les nombreux modèles.....	14
2.1.4. L'horizon d'étude et la finesse du maillage	17
2.2. Pirandello, la synthèse des avantages des modèles existants	18
2.2.1. Une structure de sur-ensemble microéconomique.....	18
2.2.2. Des principes simples et de l'innovation	19
2.2.3. Fonctionnement et résultats	23
2.2.4. Le modèle d'affectation : AELH	24
2.2.5. Positionnement parmi les autres modèles	26
2.2.6. Une approche spécifique très efficace à long terme	27
3. La validation du modèle par rétropolation.....	29
3.1. Principe et intérêts du calage synchronique et diachronique.....	29
3.2. Recueil des données	29
3.2.1. Données nécessaires	30
3.2.2. Développement du réseau de transports	32
3.3. Encodage du réseau	36
3.4. Historique du réseau de transport en Ile-de-France.....	37
3.4.1. La route encercle Paris	37
3.4.2. Le métro évolue peu mais sort de Paris.....	38
3.4.3. L'aventure du RER.....	39
3.4.4. Bus et Tramways, histoires de modes et de sites propres	43
3.4.5. Ordres de grandeurs et statistiques	43
4. Analyse de l'impact du RER A	46
4.1. Réalisme des résultats obtenus	46
4.1.1. Calage synchronique	46
4.1.2. Calage diachronique.....	47
4.1.3. Validation du modèle : intervalles de confiance et champs d'application	51
4.2. Simulation sans RER A.....	52
4.2.1. Hypothèses de suppression du RER A et estimation de l'évolution technologique.....	52
4.2.2. Etudes statistiques et ordres de grandeurs	52
Conclusion.....	60
Sources.....	61
Archives	61
Documents	61
Sites Internet	61
Livres	
Annexes	63

Liste des Tables

Figure 1 : Schéma d'ensemble du Grand Paris (source : Société du Grand Paris).....	8
Figure 2 : Cycle de rétroaction entre utilisation des sols et transport (source : Wegener).....	10
Figure 3 : Les forces contradictoires pour la localisation des ménages (source : Delons).....	13
Figure 4 : Historique des théories et des modèles LUTI (Source : Waddell).....	15
Figure 5 : Classification des modèles LUTI (source : Simmonds et Bates).....	16
Figure 6 : Structure du premier niveau du modèle urbain (source : Delons)	18
Figure 7: Principe général du modèle (source : Delons).....	22
Figure 8 : Etapes, acteurs et ressources du modèle Pirandello (source : Delons)	23
Figure 9 : Pirandello en pratique (source : Delons)	24
Figure 10 : Tableau des améliorations apportées à AELH en 2010 pour Pirandello (source : AELH)	25
Figure 11 : Positionnement des différentes LUTI (source : IAU de l'Ile-de-France)	26
Figure 12 : Tableau récapitulatif des données nécessaires et de leurs sources	31
Figure 13 : Carte du réseau de métro en 1962 (source : RATP).....	33
Figure 14 : Carte routière Taride de Paris et ses environs en 1968 (source : BnF)	34
Figure 15 : Carte du réseau ferré francilien exploité par la SNCF en 1968 (source : SNCF)	35
Figure 16 : Réseau Transilien et RER de 1968.....	37
Figure 17 : Evolution du réseau routier autour de Paris (fond de carte : Michelin 2008).....	38
Figure 18 : Evolution du métro entre 1968 et 2005 (source : RATP).....	39
Figure 19 : Projet de métropolitain express des années 1930 (source : SNCF)	40
Figure 20 : Le RER dans le schéma directeur de 1965 (source : SNCF).....	41
Figure 21 : Evolution du réseau ferré entre 1968 et 2005 (source : SNCF).....	42
Figure 22 : Evolution du prix mensuel de la carte orange pour les zones 1-2 et 1-5 (source : RATP)	44
Figure 23 : Evolution de la longueur des lignes de bus et du nombre de voyageurs (source : RATP)	44
Figure 24 : Evolution du nombre de trains à l'affluence et de la vitesse commerciale moyenne dans le métro parisien (source : RATP)	45
Figure 25 : Graphique des ratios entre simulé et observé pour les populations et emplois.....	46
Figure 27 : Evolution du pourcentage de données avec une précision de 20 % en fonction du scénario utilisé pour simuler l'année 1968	47
Figure 26 : Amélioration de la précision du modèle suivant la prise en compte successive de nouveaux paramètres	47
Figure 28 : Croissance observée de la population entre 1999 et 1968 (source : Insee).....	48
Figure 29 : Ecart entre la croissance de population estimée et observée pour la période de 1999 à 1968.....	49
Figure 30 : Croissance observée des emplois de 1999 à 1968 (source : Insee).....	50
Figure 31 : Ecart entre la croissance des emplois estimée et observée pour la période de 1999 à 1968	51
Figure 32 : Tableau du pourcentage des estimations obtenues à 20 % de la situation de référence et du r^2 global	51
Figure 33 : Tableau des déplacements simulés sous AELH entre Paris et sa banlieue en 1999	52
Figure 34 : Déplacements par jour simulés sous AELH entre les départements d'Ile-de-France (en millions).....	53
Figure 35 : Variation de l'accessibilité simulée sans RER A par rapport à la situation de référence de 1999.....	54
Figure 36 : Variation du prix des bureaux simulée sans RER A par rapport à la situation de référence de 1999.....	55
Figure 37 : Rapport des emplois par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999	56
Figure 38 : Rapport de population par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999	57
Figure 39 : Rapport de population à faibles revenus par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999	58
Figure 40 : Rapport de population à hauts revenus par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999	58
Figure 43 : Extrait des statistiques annuelles de la RATP de 1968 (source : RATP)	63
Figure 44 : Couverture d'un indicateur Chaix de 1960 (source : RATP)	64
Figure 45 : Grille horaire de la ligne Paris-St-Lazare à Argenteuil en 1968 (source : SNCF).....	65
Figure 46 : Tableau récapitulatif des principales étapes de construction du métro depuis 1968.....	66
Figure 47 : Réseau RER en 1976 (source : SNCF).....	67
Figure 48 : Réseau RER en 1983 (source : SNCF).....	67
Figure 49 : Réseau RER en 1991 (source : SNCF).....	68
Figure 50 : Réseau RER en 1999 (source : SNCF).....	68
Figure 51 : Tableau récapitulatif des principales étapes de construction du RER depuis 1968.....	69
Figure 52 : Schéma de l'état actuel du réseau de transiliens et de RER	70

Résumé

Les décisions d'investissement en infrastructures de transport engagent des millions d'euros, voire des milliards, dans des projets destinés au développement du territoire. Les responsables, politiques ou industriels, ont besoin lors de ces choix de s'appuyer sur des évaluations fiables et précises des différentes solutions envisagées. Parmi les outils proposés, les modèles d'interaction entre transport et aménagement concentrent l'attention des décideurs et des scientifiques.

Avec pour objectif final de présenter les effets de la création du RER A sur le développement de l'Ile-de-France, notre étude se découpe en trois parties.

D'abord, elle s'attache à définir le cadre des modèles LUTI¹, depuis les premières théories jusqu'aux outils les plus récents. Pirandello, modèle innovant développé au sein du groupe Vinci, est ici présenté et positionné par rapport aux solutions déjà existantes.

La description de l'approche réalisée traite ensuite de la méthodologie des calages complémentaires synchronique et diachronique du modèle. Un intérêt particulier est porté au second, calibrage original par rétropolation qui légitime les capacités prévisionnelles de Pirandello. La démarche de collecte de données et de consultation des archives historiques (SNCF, RATP, BnF) pour la reconstitution du passé fait partie de cette étape.

Enfin, les résultats des calages permettent de définir les intervalles de confiance à l'aide desquels nous pouvons interpréter les résultats de notre exemple. Cette précision définie, les conclusions sont tirées des simulations pour évaluer l'impact socio-économique de la ligne A du RER.

Ce plan d'étude est représentatif du séquençage en trois étapes de la démarche suivie tout au long du projet : théorie, exploration, application.

¹ Land-Use and Transport Interaction, défini en 4.1.

Remerciements

Je remercie en premier lieu le groupe Vinci, au sein duquel j'ai pu évoluer dans différents départements, de Vinci Construction Grands Projets à Vinci Autoroutes, et trouver ce sujet d'étude si intéressant dans cette nouvelle entité qu'est Pirandello Ingénierie. Je remercie par la même occasion mon maître de stage, Laurent Chastenet, qui m'a accueilli, orienté et conseillé avec beaucoup d'attention.

La réalisation de ce projet d'étude n'aurait pas existé sans Jean Delons, à qui l'on doit avec Vincent Piron le modèle Pirandello. Je lui suis particulièrement reconnaissant pour son soutien, ses enseignements et ses conseils qui m'ont encadré tout au long de ces quelques mois.

Mes remerciements sont également adressés à Nicolas Coulombel qui a accepté de prendre la responsabilité de mon mémoire. Je le remercie pour ses conseils et orientations, et pour l'intérêt réellement porté à mon sujet.

Je remercie Jean-Baptiste Chesneau avec qui j'ai très souvent travaillé, et qui a toujours cherché à m'aider et à m'apprendre les compétences et connaissances nécessaires à mon sujet. Je suis également reconnaissant envers Sergio Millan qui a su apporté des réponses précieuses aux questions que je me posais.

L'élaboration de ce mémoire aurait été moins agréable sans le soutien et la convivialité des différentes personnes qui m'entouraient. Au vu de leur nombre, je ne peux pas tous les citer mais une pensée va à chacun d'eux.

Enfin, j'adresse un remerciement tout personnel aux personnes qui me sont chères et qui me manquent.

1. Contexte de l'étude

1.1. Mission professionnelle de fin d'études

La mission professionnelle du Master ParisTech « Transport et Développement Durable » intervient à l'issue des 10 mois d'enseignement académiques et parachève la formation des étudiants du Master. Elle doit durer au moins cinq mois. Elle se déroule dans un contexte professionnel au sein d'une entreprise ou d'un organisme public ou privé en France ou à l'étranger. Elle constitue une transition vers le monde professionnel et peut adopter une optique de pré embauche². La formation remplit un double objectif :

- Mettre en application les méthodologies et mobiliser les connaissances acquises pour remplir une mission qui corresponde à un véritable besoin pour le partenaire professionnel ;
- Contribuer à une réflexion académique approfondie sur les problématiques abordées.

Cette mission donne lieu à la rédaction de ce rapport qui sera soutenu publiquement le 02 décembre 2011 à 16h00.

1.2. Pirandello : un nouvel outil adapté au contexte français

Pirandello a été développé par Vinci Concession et Cofiroute en partenariat avec de nombreux experts et laboratoires de recherche en économie, transports et urbanisme³. Le modèle est classé dans la catégorie des modèles d'interaction entre transport et urbanisme, les LUTI, tout en se différenciant des modèles complexes de ce type basés quant à eux sur une conception dynamique. Le modèle sera présenté plus en détail dans la partie le concernant.

La mission professionnelle réalisée rentre dans le cadre de son développement et dans sa phase de crédibilisation en étant appliquée au projet du Grand Paris.

Afin de comprendre les enjeux du modèle, le contexte de son développement mérite d'être décrit : ses concepteurs sont deux cadres de VINCI, Jean Delons et Vincent Piron. En tant que professionnels et scientifiques, ils ont gardé comme fil directeur le fait que le modèle devait être relativement aisé à expliquer aux décideurs tant publics que privés, tout en étant économiquement correct. De plus, il devait être facilement mis en œuvre par des ingénieurs, et pas uniquement des spécialistes chevronnés dans ce métier. Testé sur l'Ile-de-France en premier lieu, ce modèle devait également prouver sa pertinence, notamment par la reconstitution sur le passé de l'évolution de l'agglomération.

1.3. Le Grand Paris

Pirandello Ingénierie, filiale de VINCI spécialement créée pour l'exploitation du modèle, a obtenu le lot de synthèse des études socio-économiques sur le Grand Paris. Dans ce cadre, l'étude des impacts

² Extrait des documents du Master ParisTech « Transport et Développement Durable »

³ Agence Nationale de la Recherche, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme, Laboratoire d'Economie des Transports, Laboratoire Ville Mobilité Transport, Société des Transports de l'Ile de France.

engendrés par la création de la ligne A de RER depuis les années 60 permet de calibrer les paramètres du modèle Pirandello pour anticiper les effets probables de la mise en place de l'Arc Express.

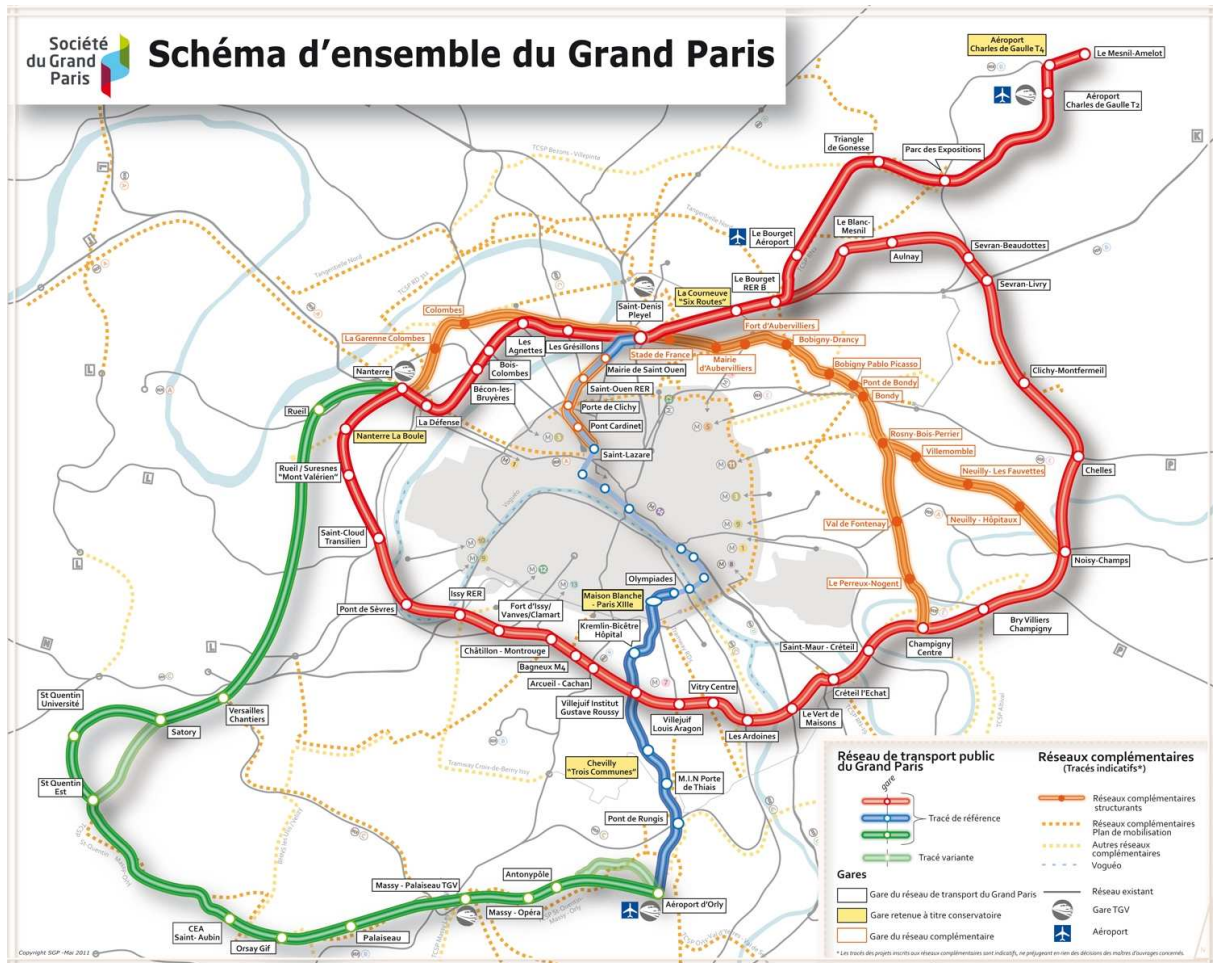


Figure 1 : Schéma d'ensemble du Grand Paris (source : Société du Grand Paris)

La réalisation de la note de synthèse confiée à Pirandello Ingénierie a pour but de définir le cadrage socio-économique des futures études réalisées à l'aide de modèles LUTI. L'étude du RER A permet d'évaluer sur un objet existant les bénéfices et inconvénients de la réalisation d'une grande infrastructure.

2. Les LUTI en manque de références

2.1. Transport et utilisation des sols

Le développement d'une ville, ou plutôt d'une aire urbaine, relève d'une multitude de choix individuels et de décisions politiques. Ainsi, prédire les impacts des politiques de transport et d'aménagement est une tâche difficile en raison de la multitude d'acteurs et de changements simultanés. Afin d'évaluer les effets d'un projet d'infrastructure ou d'évolution politique, nous avons à disposition trois approches :

- Evaluation empirique : la méthode consiste à demander directement aux personnes concernées leur réaction la plus probable face au changement envisagé ;
- Evaluation statistique : l'étude des cas similaires permet de récolter de nombreuses données utilisables pour en tirer des conclusions quant aux projets concernés ;
- Simulation : créer un modèle mathématique censé représenter les comportements et évolutions à venir.

Ces trois possibilités présentent chacune des avantages et des inconvénients, mais les modèles mathématiques se présentent comme la seule méthode de prévision des situations encore inconnues. La modélisation permet de représenter l'influence du plus grand nombre de facteurs et de déterminer leurs interactions.

Nous allons commencer notre étude en présentant les théories développées pour tenter de rationaliser le développement des villes, et dans notre cas particulier, de l'expliquer par son interaction avec les transports. Avant de rentrer dans la description des modèles et théories, il convient d'introduire ce raisonnement par une réflexion plus globale.

2.1.1. L'interaction à la base des théories

Les modèles de trafic classiques déterminent les besoins en déplacement des populations à partir de leur localisation et de celle des emplois. Ainsi, lorsque nous évaluons une nouvelle infrastructure avec ces modèles, nous supposons que les seuls comportements à la disposition des résidents face à une modification des conditions de transport sont le changement d'itinéraire, voire de mode, et la diminution de leur mobilité mais ceci est en contradiction totale avec l'observation : la mobilité (tous modes confondus) est en effet constante dans le temps, et les usagers changent très peu d'itinéraire et de mode.

La relation étroite entre les systèmes de transport et l'urbanisme se présente en réalité sous une forme plus globale dont les effets structurants restent difficiles à prévoir. Dans un sens, l'occupation des sols détermine l'organisation des transports ; dans l'autre, les réseaux d'infrastructures influencent la localisation des ménages et des entreprises. Wegener (2004) résume cette interaction entre les déplacements et l'utilisation des sols par le schéma suivant :

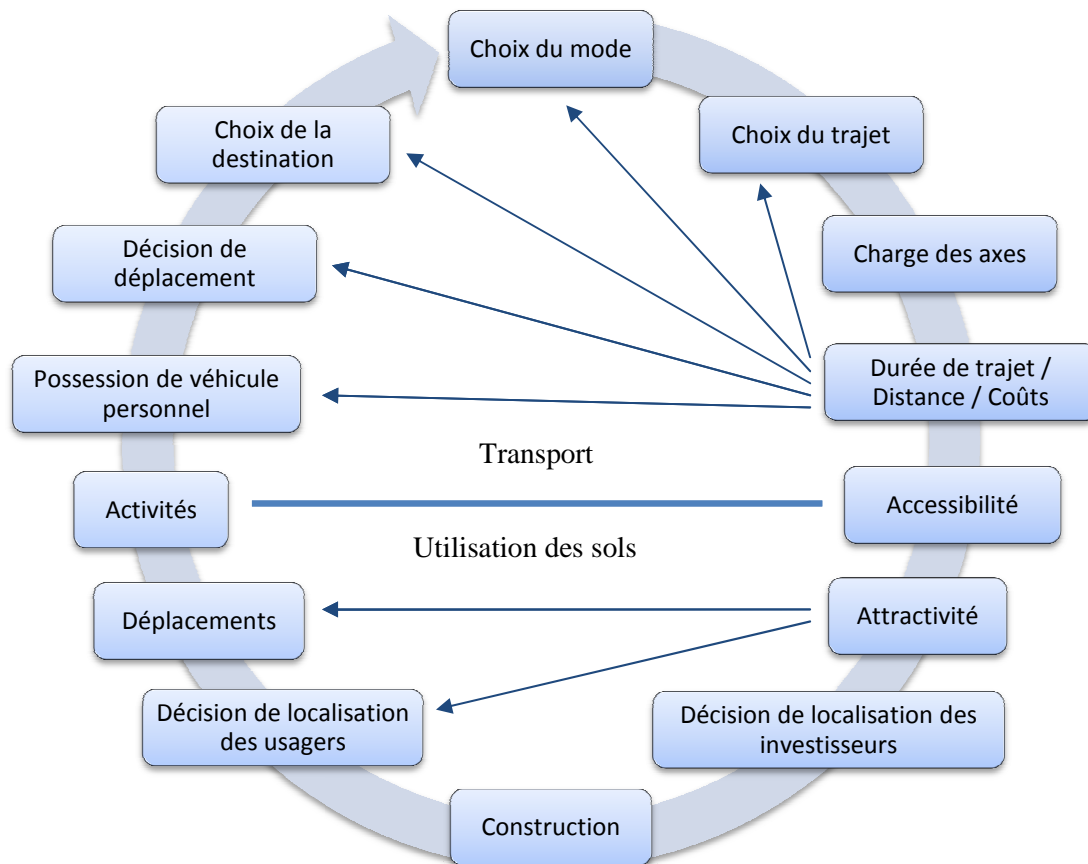


Figure 2 : Cycle de rétroaction entre utilisation des sols et transport (source : Wegener)

Il serait donc inadéquat de limiter une politique de transport à une simple réponse à un problème de trafic : l'approche des enjeux doit être multicritère. Par exemple, la mise en place d'un tramway est souvent critiquée pour son coût élevé mais bénéficie pourtant d'une image très positive auprès des décideurs. Est-ce pour autant une erreur ? Pas si l'on intègre les transports dans la globalité des processus de l'équilibre urbain. Sa réalisation va avoir un effet sur le marché foncier, sur la densification de la ville et des services tout en créant en plus une demande induite qui justifie à posteriori l'investissement. Même exemple pour le péage urbain : les économistes tendraient à dire que cette méthode est bénéfique pour la collectivité quelque soit la ville concernée, en se basant simplement sur la diminution de la congestion et de la pollution en centre-ville. Les modèles, et Pirandello notamment, ont un point de vue plus mesuré puisqu'ils permettent de révéler l'effet ségrégatif de ces politiques⁴.

La modification de l'offre de transport modifie l'équilibre urbain et les modèles, à l'instar de Pirandello, tentent d'anticiper le nouvel équilibre engendré. Ces outils possèdent néanmoins des limites : les politiques restent difficiles à représenter quand il ne s'agit pas de la création d'une infrastructure ou de la variation de la tarification, quand il s'agit plutôt d'orientations abstraites qui doivent pourtant être représentées par des coefficients précis. Dans ce sens, Pirandello intègre les

⁴ Etude réalisée par Pirandello Ingénierie sur les ceintures de péage qui montre que l'application à l'Ile de France engendrerait une amplification de la ségrégation spatiale.

évolutions comportementales, les politiques de libération des terrains par les maires et celles des promoteurs immobiliers, et propose une approche efficace des économies d'agglomération et de la représentation des aménités.

L'horizon d'étude est également un aspect important puisque les infrastructures massives ont une incidence significative sur l'aménagement et leur création engendre une période de transition entre deux situations d'équilibre urbain. La prise en compte de ces effets de long terme s'inscrit en plus dans une logique de développement durable des villes. Ainsi, la Société du Grand Paris souhaite que les études réalisées pour l'évaluation de leur projet soient faites à l'horizon 2050. Cependant, les évaluations à long terme, qui supposent un écart important entre la situation de référence et l'horizon d'étude, reposent sur des hypothèses fragiles, et l'incertitude des résultats est élevée. Se pose alors la question de la résolution des modèles : comment peut-on évaluer sa précision quand il s'agit d'effets observables seulement dans quelques décennies ? Dans quels intervalles de confiance place-t-on les résultats ? Ces questions sont primordiales pour notre projet puisque la validation par la confrontation entre le simulé et l'observé légitime ou non les évaluations réalisées.

Pour terminer cette réflexion, il est essentiel d'insister sur un point : les modèles ont pour but d'être utilisés sur des cas réels. Ce sont des outils qui doivent répondre aux attentes de leurs utilisateurs et ne pas tomber dans le cloisonnement trop fréquent entre scientifiques et politiques. Un modèle doit avant tout être :

- Compréhensible par des élus et des décideurs ;
- Micro-économiquement correct ;
- Utilisable.

Développé dans le contexte professionnel de Vinci, Pirandello accorde une importance toute particulière à être opérationnel.

2.1.2. Les nombreuses théories

Les modèles actuels d'interaction entre transports et urbanisme reposent sur des théories dont nous présentons d'abord le développement historique. L'état de l'art réalisé par le Laboratoire d'Economie des Transports⁵ retrace fidèlement cette évolution.

L'origine de ces modèles remonte à la première partie du XIX^{ème} siècle avec leur précurseur, Von Thünen, qui cherchait à démontrer la relation entre les activités agricoles et la distance au marché urbain. Diverses théories se sont ensuite succédées jusqu'aux années 1950 et l'avènement de l'informatique. La vingtaine d'année qui suivit vit apparaître une grande quantité de théories dont nous présentons ici les plus utilisées.

La théorie de la base fait partie des premières théories développées et une des principales. Son principe est de considérer qu'un espace local ne peut subvenir à ses besoins sans interagir avec l'extérieur. L'aire urbaine y est représentée comme un ensemble de relations économiques dans laquelle le

⁵ Rapport réalisé pour le Ministère de l'Équipement et l'ADEME en 2005 dans le cadre du projet SIMBAD (SIMuler les MoBilités pour une Agglomération Durable).

développement de chaque espace dépend de son activité d'exportation, qu'il s'agisse d'emploi, de population ou d'autre activité quantifiable. Cette activité externe, celle qui est dite basique, est à l'origine de la croissance et induit une activité interne à la zone, dite dérivée, comme l'emploi résidentiel et le développement de nouvelles populations. En 1964, Ira Lowry fonde sur cette théorie l'un des tous premiers et plus célèbres modèles LUTI. Leontieff a approfondi le raisonnement basique dans son analyse input / output en l'étendant à tous les secteurs économiques, considérant les besoins d'échange et les flux fonctionnels.

Toujours dans les années 60, les modèles de ville monocentrique développés par Alonso, Mills et Muth se sont développés pour étudier le comportement de localisation résidentielle dans un cadre simplifié. En approximant la ville à une surface plane homogène où les emplois sont centralisés dans le CBD⁶, les ménages effectuent un arbitrage simple entre leurs coûts de déplacement et leur coût de logement. La localisation résidentielle est donc réduite à la distance au centre de la ville (ou CBD), ce qui implique que la localisation des populations est déterminée par la valeur foncière : il s'agit de la théorie de la rente urbaine. Dans cette théorie, les coûts sont identiques pour toutes les populations, ce qui implique que les rentes et la densité diminuent en s'éloignant du centre. Ces forces peuvent être exprimées simplement sous la forme d'équations. Nous commençons par définir l'expression des deux paramètres d'arbitrage en fonction de la distance au centre d :

- Le prix de la rente, au m^2 $R(d)$;
- Le coût généralisé du transport, $Cg(d)$ égal au coût financier effectivement payé auquel nous ajoutons la valorisation du temps perdu $t(d)$ en fonction de la valeur du temps de la classe i étudiée $Vt_i(d)$. Son expression est $Cg(d) = Cf(d) + t(d) * Vt_i(d)$.

La répartition de la valeur du temps en fonction de la classe de revenu détermine la répartition spatiale des classes, parfaitement cloisonnées. Nous utilisons ensuite les formulations dans l'équation suivante, valable pour tous les individus ou ménages :

$$R(d) + Cg(d) = Constante$$

Le schéma de principe suivant résume ce phénomène auprès de populations :

⁶ Central Business District.

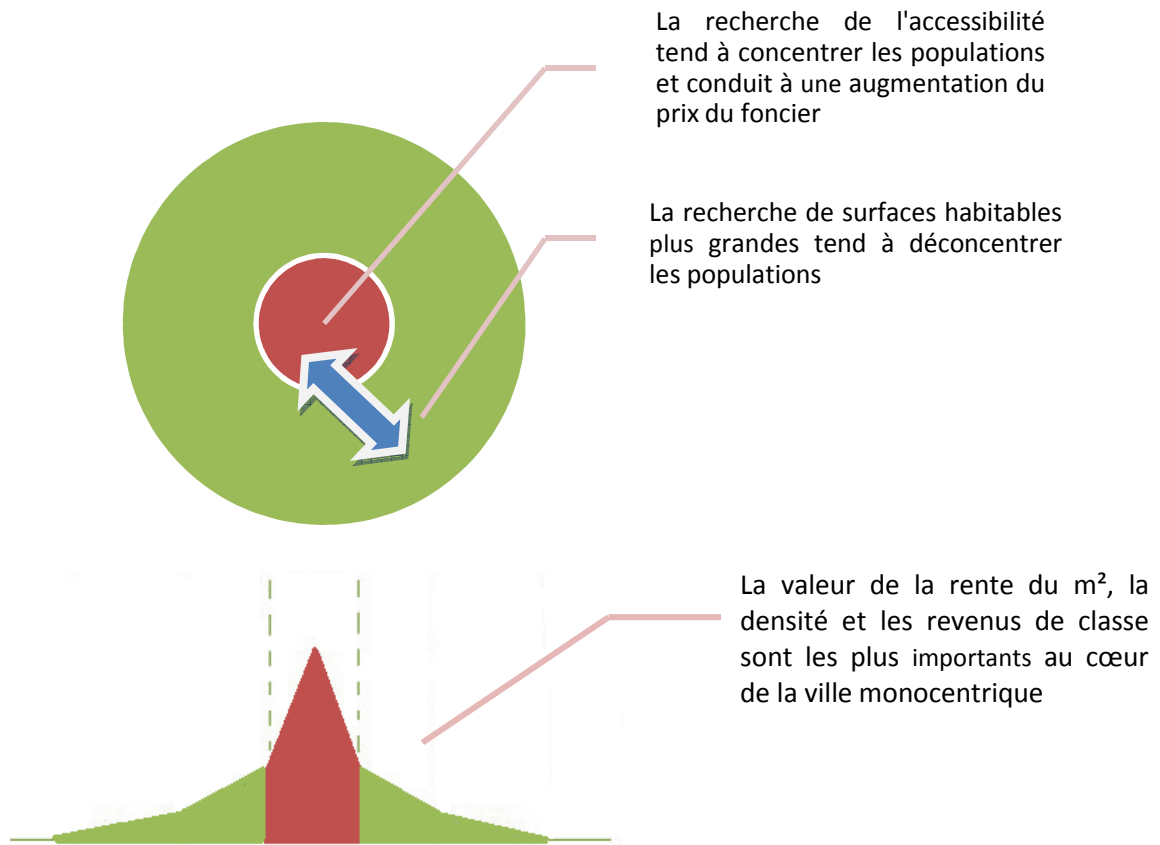


Figure 3 : Les forces contradictoires pour la localisation des ménages (source : Delons)

La théorie de l'utilité aléatoire développée en partie par McFadden apporte des compléments à la logique de la ville monocentrique. Les différences dans les préférences individuelles sont représentées par des fonctions d'utilité aléatoires qui sont appliquées à un éventail de choix. Ce choix probabiliste permet d'éviter les phénomènes de ségrégation parfaite observés dans les modèles plus simplistes comme ci-dessus. En réalité, cela correspond au fait que parmi les ménages aux caractéristiques identiques, certains valoriseront plus la localisation alors que d'autres insisteront sur la surface du logement. Cette théorie prend en compte cette dispersion des préférences individuelles en considérant que les choix ne sont pas uniformément rationnels et répétitifs. Nous pouvons donc retrouver des individus à faible revenu en centre-ville dans des surfaces très réduites alors que des individus plus riches valorisent l'espace accessible en banlieue.

Afin de généraliser cette théorie à des villes polycentrique, les modèles gravitaires se sont inspirés des lois de Newton pour représenter l'attractivité entre deux zones. Cette « force d'attraction » dépend du produit d'une variable propre à chaque zone, comme la population, divisée par la distance qui les sépare au carré. Nous obtenons une mesure de la capacité des régions à attirer ou bien à générer des déplacements, la distance étant le paramètre de décroissance de cette attractivité. Cette approche permet de se libérer du modèle monocentrique qui ne pouvait être appliqué au développement nouveau des villes, dans lesquelles toutes les activités n'étaient plus centralisées dans son centre. Nous prenons en exemple les villes américaines.

Dans les années 70, J.G. Koenig propose d'évaluer l'utilité procurée par la possibilité d'accéder aux différents centres d'intérêts de la ville par le biais des transports. La théorie de l'accessibilité propose une nouvelle approche puisque les transports deviennent vecteurs d'opportunités et ne sont pas réduits

à une perte de temps et d'argent. Poulit développe pendant la même période un moyen de mesurer la satisfaction des usagers des transports : la multiplicité des choix offerts à la destination sont mis en rapport avec le coût généralisé du transport.

Cette théorie étant à la base du développement de Pirandello, nous développons ici les formules majeures. Poulit propose de considérer le logarithme des ressources offertes pour exprimer la satisfaction de l'usager : $A_i = \log(R_j)$. La satisfaction ressentie par l'usager, pour une liaison entre les zones i et j, s'obtient en retirant le facteur négatif, c'est-à-dire le coût généralisé de transport c_{ij} :

$$A_{ij} = \lambda \cdot \log(R_j \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}})$$

On remarque qu'à la différence des modèles gravitaires, ce n'est plus la distance seule qui est prise en considération mais le coût généralisé. La décroissance en $1/r^2$ est remplacée par une fonction exponentielle décroissante.

Koenig généralise les formules de Poulit dans un logsomme qui définit un indicateur d'accessibilité de chaque zone :

$$A_i = \lambda \cdot \log\left(\sum_j R_j \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}\right)$$

Où les variables représentent :

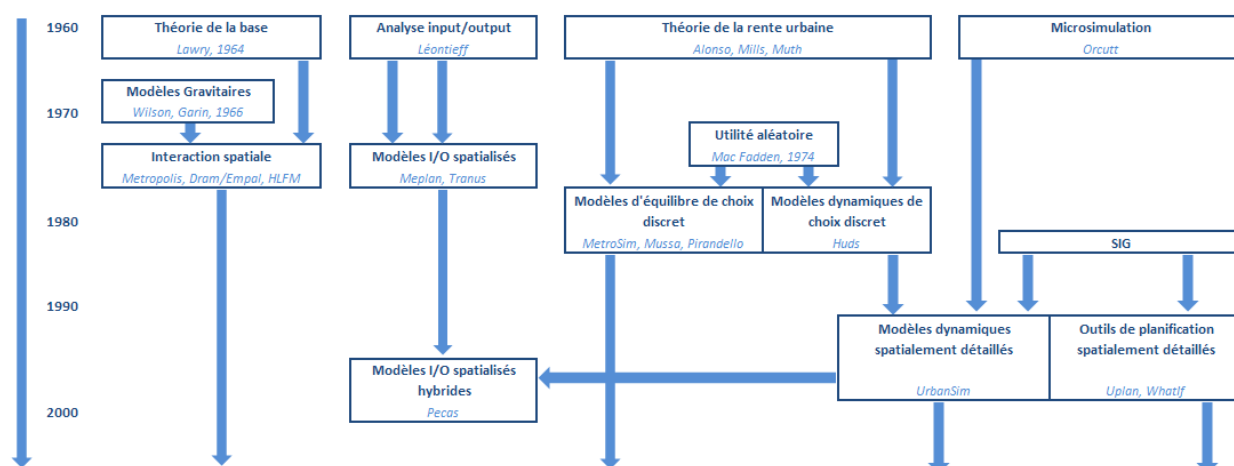
- A_i : accessibilité (utilité, satisfaction) de l'individu par rapport à l'ensemble des choix possibles des activités de la ville ;
- λ : constante d'ajustement ;
- i : la zone de résidence de l'individu ;
- R_j : nombre de ressources de la zone j ;
- C_{ij} : coût généralisé du transport de la zone i vers la zone j ;
- β : paramètre de la sensibilité au coût généralisé (coefficient de conductance des modèles gravitaires).

Cette théorie affecte donc un coefficient d'accessibilité qui sert de critère de choix pour la localisation des ménages. Elle permet de généraliser à plusieurs zones le principe d'attractivité des centres d'intérêts abordés par la théorie de la ville monocentrique et des modèles gravitaires.

Cette présentation n'a pas la prétention d'être exhaustive mais de présenter l'évolution du raisonnement et comprendre les théories principales qui influencent les modèles actuels, bien plus complexes mais cohérents avec ces différents principes complémentaires. Le développement de ces nombreuses théories est néanmoins révélateur de l'intérêt croissant qui a été porté au développement structuré des villes.

2.1.3. Et les nombreux modèles

De nombreux chercheurs ont tenté de modéliser le lien entre transport et urbanisme à partir des différentes théories présentées dans la partie précédente. Le schéma suivant retrace l'historique des modèles en les connectant aux théories sur lesquelles ils se basent :



Malheureusement, ce foisonnement n'est pas parvenu à fournir d'outil prévalent sur les autres par la pertinence de ses résultats. Nous insistons ici sur l'inexistence d'un modèle prédominant sur les autres. Pourtant, il est intéressant de citer l'exemple de Lowry et Wardrop qui, durant la même année 1964, ont présenté leur modèle respectif d'urbanisme et de trafic. Presque 50 ans plus tard, Wardrop s'est imposé par ses principes dans la quasi-totalité des modèles de trafic routier alors que les modèles d'urbanisme cherchent toujours leur référence. Ceci représente la difficulté, mais aussi l'intérêt que nous y portons, à exprimer l'état d'équilibre entre urbanisme et transport.

2.1.3.1. Les modèles historiques

Après avoir observé l'évolution historique de la réflexion sur cette interaction observée dans l'organisation de l'espace, nous allons reprendre la classification de Simmonds et Bates effectuée selon les objectifs et résultats. Ainsi, le panel de modèles LUTI peut être réparti dans les catégories suivantes :

⁷ Waddell P., 2005, UrbanSim : Integrated Land-Use and Transport, LET.

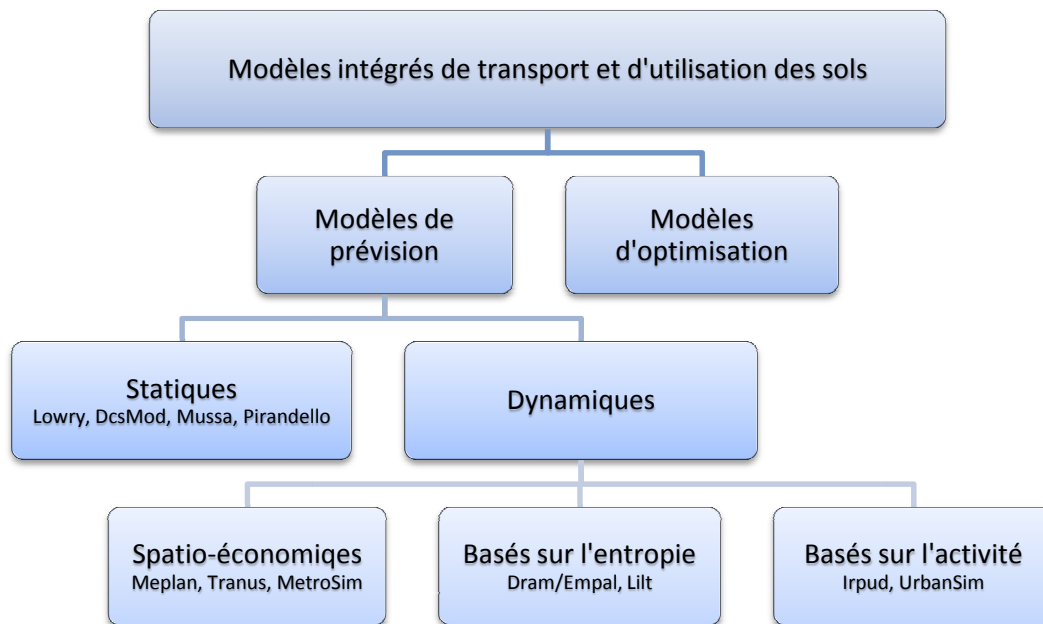


Figure 5 : Classification des modèles LUTI (source : Simmonds et Bates)

Les modèles d'optimisation sont assez rares et concernent la configuration urbaine plus que la relation transport / urbanisme. Ces modèles sont généralement utilisés dans une perspective de planification à long terme mais sont peu adaptés à la prévision des impacts des politiques de transport et d'aménagement sur l'évolution des aires urbaines préexistantes.

Les modèles de prévision se divisent ensuite en deux catégories : les modèles statiques et les modèles dynamiques. Les premiers déterminent directement l'équilibre urbain à un horizon donné alors que les seconds atteignent la période étudiée au moyen d'itérations successives mais sans atteindre nécessairement un équilibre.

Il faut souligner que la plupart des modèles LUTI actuels sont en réalité des modèles basés sur le couplage d'un modèle de trafic et d'un modèle d'urbanisme. Il existe à ce jour très peu d'outils réellement intégrés, conçus dès le départ dans une approche globale de l'interaction entre système de transport et système urbain. Nous pouvons cependant citer l'exemple de Tranus, modèle pseudo-dynamique spatio-économique, qui intègre les matrices O-D de la composante de transport. Cet avantage entraîne cependant un besoin plus important en données d'entrée.

Les modèles statiques ont été les premiers à être développés, notamment celui de Lowry, pour tenter d'expliquer et de prévoir la localisation des populations et des emplois en fonction des différents paramètres d'entrée. Dans les années 90, de nouveaux modèles statiques ont été développés et l'on peut citer DscMod, Imrel ou encore Mussa. Ils reposent sur la résolution simultanée d'équations représentant l'offre, la demande, les interactions entre les différents marchés (foncier, travail, produits,...),... toutes ces offres répondant à des conditions d'équilibre global. Ils s'appuient sur des principes généraux simples et efficaces améliorés par une conception mathématique de grande complexité qui leur permet de fournir des résultats fiables tout en limitant le nombre d'hypothèses au départ.

Les modèles dynamiques quant à eux bénéficient de l'explosion des performances de l'informatique pour leur développement. La majorité des modèles développés actuellement sont de ce type. Parmi les plus importants, nous pouvons citer Meplan, Tranus et UrbanSim. Ces modèles s'appuient sur une

complexité nettement plus importante que celle des modèles statiques mais nécessitent plus d'hypothèses et de données d'entrée. Ce besoin en données se heurte souvent au manque d'informations et entraîne la prise d'hypothèses de départ qui contiennent des informations sur la situation d'arrivée.

2.1.3.2. Les nouvelles pistes de modèles

Enfin, des nouveaux modèles appliqués à des champs d'action précis et réduits sont développés actuellement pour répondre aux nouveaux enjeux que sont le développement durable et les nouvelles technologies. Même si la volonté de Pirandello n'est pas de donner un résultat fin, proche de la résolution unitaire, mais une situation d'équilibre global révélatrice de la situation à l'horizon souhaité, nous faisons une brève digression pour présenter ces nouveaux modèles.

Les nouveaux modèles veulent représenter non seulement les impacts économiques mais également les impacts environnementaux des politiques de transport et d'aménagement urbain. La première démarche utilisée revient à effectuer une « micro-simulation » du changement urbain. Les comportements humains sont directement modélisés au niveau individuel en représentant la façon dont chaque individu choisit entre plusieurs options, selon ses préférences et ses contraintes (temps, argent, accessibilité,...).

Toujours parmi les nouveaux modèles, le modèle d'automates cellulaires comprend plusieurs cellules (des morceaux d'espace) spécifiées par un nombre fini d'états particuliers. Chaque changement d'état doit être local et dépendre uniquement des facteurs et des règles caractérisant les cellules voisines. A chaque cellule est associée une probabilité de transition d'un état vers un autre. Ces modèles présentent la limite de ne pas internaliser d'approche économique. Les modèles multi-agents reprennent cette approche d'automates cellulaires mais modifient la manière des agents de prendre les décisions, notamment au niveau des interactions sociales. La théorie des jeux est grandement mise à contribution dans ces théories afin d'analyser le comportement et les choix des agents.

2.1.4. L'horizon d'étude et la finesse du maillage

L'horizon d'étude permet de déterminer la zone de pertinence d'un modèle par rapport à d'autres. En effet, nous avons déjà abordé les problèmes de convergences sur le long terme des modèles dynamiques qui, n'atteignant pas nécessairement une situation d'équilibre, peuvent aboutir à des situations très différentes pour des paramètres initiaux quasi-similaires. En revanche, les modèles statiques sont plus efficaces et s'efforcent de déterminer un équilibre global stable. Pirandello possède cet avantage en étant indépendant des paramètres initiaux : l'état final obtenu est identique quel que soit la situation initiale.

Les nouvelles tendances et les modèles dynamiques cherchent à augmenter le détail, à l'aide d'un découpage de plus en plus fin des zones étudiées. Ainsi, les modèles statiques sont plus appropriés à des projets de grande ampleur aux impacts significatifs sur l'évolution de l'aire urbaine.

Pour définir l'impact de la temporalité, Wegener et Fürst ont établi une classification des processus allant du plus lent au plus rapide :

- Changement très lent : réseaux, occupation des sols. Ce sont les colonnes vertébrales des villes. Leur mise en place est longue et quasi-permanente ;

- Changement lent : lieux d'emplois, logements. Les logements et bureaux ont des durées de vie et d'utilisation qui dépassent celles de leurs occupants respectifs (population et emplois) ;
- Changement rapide : emploi, population. Les entreprises et les populations ont le choix au cours de leur vie de se déplacer, de changer de cadre et de préférences ;
- Changement immédiat : transport de marchandise, déplacements. Les échanges sont les changements qui se réalisent dans des intervalles de temps très courts et qui s'opèrent entre les différents acteurs.

Les modèles d'urbanisme cherchent en premier lieu à représenter les changements dits « rapides » que sont la localisation des emplois et de populations. Ils s'appuient pour cela sur les modèles de trafic qui déterminent les changements très rapides observés dans chaque situation pour établir les facteurs de détermination des localisations. Les changements très lents sont imprévisibles et restent des données d'entrée des modèles, comme c'est le cas de l'évolution du réseau de transport en Ile-de-France utilisé dans la suite de l'étude. Pour l'horizon « intermédiaire », celui du développement des bureaux et logements, Pirandello l'évalue à partir des tendances observées pour déterminer des lois de libération des terrains par les maires ou les promoteurs immobiliers, et comprend même un autre changement qui est celui comportemental (l'évolution du désir de surface par exemple).

La différence conceptuelle entre dynamique et statique engendre un décalage significatif quant au champ de prédilection de chaque type de modèle. Les itérations successives entraînent une accumulation des erreurs qui réduisent la portée sur le long terme des modèles dynamiques, alors que l'indépendance vis-à-vis du temps des modèles statiques leur permet d'être efficaces dès un horizon permettant le retour à une situation d'équilibre après la réalisation d'un projet.

2.2. Pirandello, la synthèse des avantages des modèles existants

Pirandello est un modèle statique d'équilibre urbain qui se base sur plusieurs principes présentés dans les parties précédentes, en n'en conservant uniquement les aspects éprouvés et vérifiés par l'expérience.

2.2.1. Une structure de sur-ensemble microéconomique

D'un certain point de vue, et pour ce qui est la demande des résidents et des emplois, le modèle Pirandello se présente comme un sur-ensemble d'un modèle de trafic, qui comporte deux mécanismes micro-économiques explicites supplémentaires : le choix de la destination et le choix du lieu de résidence.

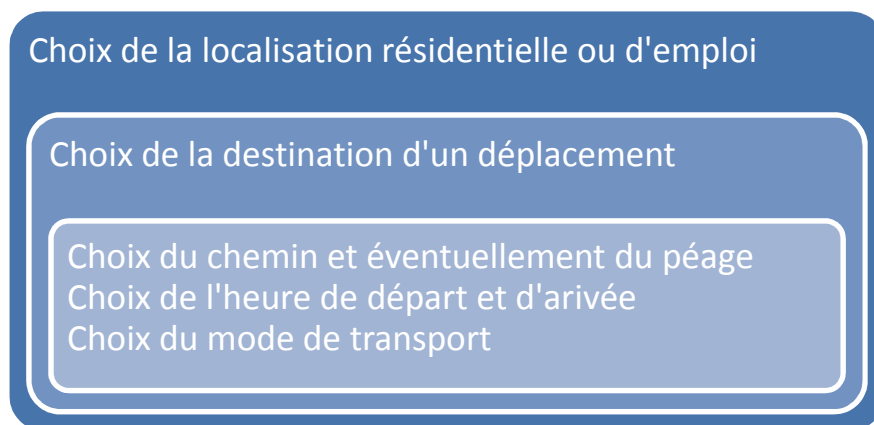


Figure 6 : Structure du premier niveau du modèle urbain (source : Delons)

Mais le modèle ne se limite pas à une formalisation de la demande, car il comporte deux mécanismes complémentaires concernant l'offre : l'évolution de la surface de logement ou de bureaux et la détermination du prix du foncier.

La micro-économie consiste traditionnellement à étudier les comportements de choix des consommateurs et les mécanismes de production (substitution capital / travail...). L'économie des transports ajoute dans cette problématique une ressource supplémentaire, qui est le temps, et le valorise avec sa valeur perçue.

De manière générale, elle produit de nombreuses études sectorielles (sociologie des quartiers, densité, répartition des populations et des emplois,...) en fonction des différents domaines d'expertise de ses chercheurs mais ne propose pas une vue d'ensemble de la zone urbaine. Or, l'optimisation de chacune des fonctions n'optimise pas forcément l'ensemble.

2.2.2. Des principes simples et de l'innovation

Pour comprendre le raisonnement de Pirandello, il est nécessaire de comprendre la logique d'arbitrage des deux types d'acteurs modélisés, résidents et emplois.

Les résidents sont caractérisés par le revenu du ménage auxquels ils appartiennent (tel qu'il peut être connu dans les enquêtes utilisées), et sont répartis en un certain nombre de classes de revenu qui sont les « classes sociales » du modèle Pirandello. Le revenu est donc le seul critère qui différencie les résidents, et d'autres variables sociales telles que le niveau d'éducation, le sexe ou l'âge ne sont pas intégrées dans le modèle.

La relation suivante présente l'équation appliquée aux résidents :

$$\text{Accessibilité} + \text{Confort Domestique} + \text{Environnement} - \text{Coûts} = \text{Constante}$$

Cette équation représente les quatre composantes principales de l'arbitrage :

- Le désir de services et de proximité (mesurée par l'accessibilité) :

Définit la sélection des destinations des trajets en fonction des temps et des coûts de transport : une augmentation des temps réduit la portée des déplacements, mais pas leur nombre. C'est la déclinaison de la théorie de l'accessibilité développée par Koenig et Poulit et qui permet de prendre en compte la constance de la mobilité.

- Le désir de surface (mesuré par l'utilité des m²) :

Choix de la localisation des ménages, en fonction du prix du m², de l'accessibilité et de leur revenu, les ménages cherchant un lieu de résidence qui maximise leur satisfaction, en tenant compte de l'accessibilité, de la surface du logement et de son prix.... C'est la déclinaison directe du modèle monocentrique.

- Le désir de ressemblance (mesurée par la quantité de classes similaires) :

Notion d'environnement propre aux aménités de voisinage, correspondant plus simplement à la règle du « qui se ressemble s'assemble ».

- Les coûts financiers (mesurés par le coût immobilier, la fiscalité, les coûts de déplacements) :

Mécanisme de formation des prix de l'immobilier et des constructions neuves, les prix et les constructions étant liés à l'accessibilité.

Au travers de cette équation, le comportement du résident est modélisé en supposant qu'il recherche un logement qui maximise son bien-être en fonction du budget dont il dispose, et que ses critères de choix sont la surface, le standing, et l'emplacement du logement au sein de l'agglomération.

De la même façon, nous supposons que chaque entreprise cherche à maximiser sa production en installant ses employés là où ils seront les plus productifs. Les emplois sont caractérisés par le revenu que perçoivent les individus qui les occupent. Soulignons que, dans le modèle Pirandello, les résidents et les emplois sont pris en compte indépendamment. Plus précisément, nous supposons qu'un actif résident choisit son lieu d'habitation en considérant la localisation de l'ensemble des emplois de l'agglomération, et non la localisation de l'emploi qu'il occupe effectivement.

L'équation des emplois présente le raisonnement appliqué aux emplois :

$$Productivité - Salaires - Fiscalité - Coûts = Constante$$

L'arbitrage se fait ainsi selon trois composantes :

- La productivité (dépendant de l'accessibilité et du salaire) :

Reprend le critère d'accessibilité présenté plus haut et l'économie d'agglomération.

- La fiscalité locale :

Chaque zone dépend d'une municipalité propre soumise à une fiscalité précise qui est déterminante lorsqu'une entreprise cherche un lieu où installer ses bureaux.

- Le coût de l'immobilier de bureaux :

Les surfaces de logement et de bureaux disponibles dans l'agglomération étant nécessairement limitées, les résidents comme les entreprises se retrouvent dans une situation de concurrence. Ce sont les variations des prix du marché immobilier qui vont permettre un ajustement des comportements et l'émergence d'un équilibre urbain global.

Nous observons que Pirandello s'inscrit dans la tradition scientifique de l'économie spatiale. Les principales théories réutilisées sont le modèle monocentrique qui a été généralisé par l'introduction habile de la théorie de l'accessibilité. La prise en compte de l'économie d'agglomération et des aménités permet au modèle de représenter la citation « qui se ressemble s'assemble ». Les HLM sont différenciés des autres logements car facteur essentiel de la localisation en fonction des classes sociales.

Nous présentons ici la formulation de l'accessibilité, pierre angulaire du modèle, définie de manière classique par une formulation exponentielle et un terme indiquant la décroissance en fonction du coût généralisé :

$$A_i = \sum_j p_j \cdot e^{-\lambda \cdot c_{ij}}$$

Où :

- A_i est l'accessibilité de la zone i, indépendamment du revenu

- p_j la population de la zone j ;

Pour l'utilisation de l'accessibilité dans le modèle d'équilibre urbain Pirandello, un certain nombre d'extensions sont nécessaires. Il faut tout d'abord distinguer la valorisation des coûts et celle des temps passés. D'un point de vue micro-économique, nous sommes conduits à écrire le programme d'un usager sous la forme d'un programme optimal sous deux contraintes, l'une temporelle, l'autre budgétaire :

$$\text{Max}_{\substack{\sum_j p_j \cdot x_j \leq r \\ \sum_j \theta_j \cdot x_j \leq T}} u(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Où :

- $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ est la fonction d'utilité liée à la consommation des biens 1, 2, ..., n en quantités x_1, x_2, \dots, x_n .
- p_j sont ici les prix des biens considérés ;
- θ_j sont les temps nécessaires à la consommation de chacun des biens et de services ;
- r est le revenu du ménage ;
- T est le temps disponible pour consommer les différents services ;

Dans ces conditions, nous pouvons réécrire l'accessibilité sous la forme suivante, dépendant explicitement du revenu de la classe r_k :

$$A(i, r_k) = \sum_j p_j \cdot e^{-\lambda_k \cdot (\theta_j \cdot r_k^\alpha \cdot tt_{ijk} + c_{ijk})}$$

Où :

- $A(i, r)$ est l'accessibilité de la zone i pour la classe de revenus r_k ;
- α et λ_k sont des constantes définies par ajustement ;
- tt_{ijk} est le temps de transport de la zone i à la zone j pour le revenu r_k ;
- c_{ijk} est le coût de transport de la zone i à la zone j pour le revenu r_k ;
- p_j la population de la zone j ;

L'accessibilité s'exprime ici en unités de population ou d'emplois. C'est un indicateur non local, dans le sens où il fait intervenir les populations, les emplois de l'ensemble de la zone étudiée et les temps de parcours de l'ensemble du réseau correspondant.

L'accessibilité des entreprises est basée sur la même logique, mais elle porte uniquement sur les emplois. De nombreuses autres équations sont utilisées pour représenter les aménités (influentes sur la formulation de l'utilité), le choix modal, la valorisation des logements en fonction de leur standing,...

Innovant constamment, le modèle ne cesse de s'améliorer et intègre désormais le choix de l'heure de départ, en monétarisant le déshorloge induit par la localisation. En effet, même si certains modèles de trafic parviennent à intégrer ce phénomène, ils se contentent de le répercuter dans la répartition du trafic mais aucun modèle LUTI classique ne le prend en compte à cause de la complexité que cela engendre. L'avantage de Pirandello est que ce paramètre peut être intégré de manière simplifiée mais correcte sans modifier la structure du modèle. Cette flexibilité du modèle en fait un avantage considérable puisqu'elle lui permet d'intégrer, d'évoluer et de s'adapter rapidement à de nouveaux paramètres.

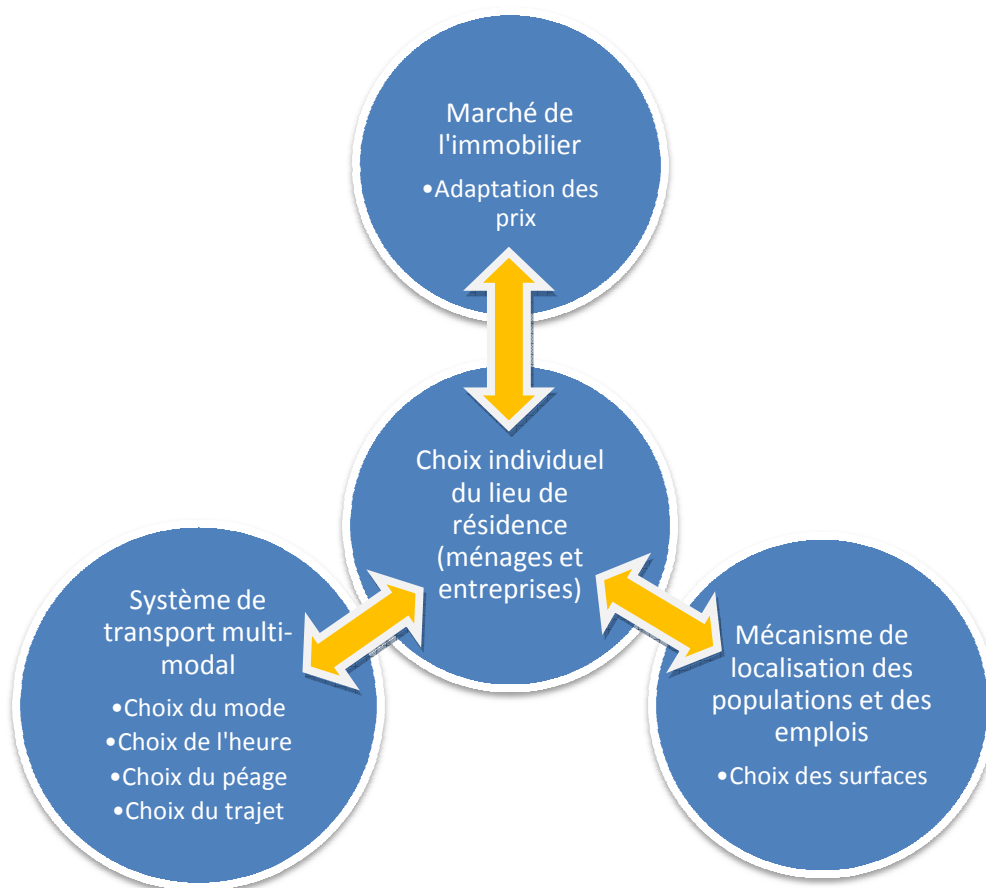


Figure 7: Principe général du modèle (source : Delons)

Un autre avantage de Pirandello vient de sa programmation, réalisée en Fortran. Bien que les principes micro-économiques sur lesquels s'appuie le modèle et présentés un peu plus haut soient relativement simple et facile à expliquer, la complexité algorithmique est la partie cachée de l'iceberg. Nous avons déjà précisé la grande attention portée à la compréhension du modèle par des personnes non expertes et ceci en est une illustration. Le modèle s'appuie sur une programmation faisant appel à des directives OpenMP et utilisant la technologie des multi-threads (calculs en parallèle sur n processeurs, 24 dans le cas de Pirandello) pour diminuer les temps de calcul tout en conservant la rigueur mathématique nécessaire à la convergence des estimations.

La précision de Pirandello est une force pour un modèle statique et résulte de sa programmation optimisée. Sur l'Ile-de-France, le modèle traite :

- 415 zones ;
- 8 classes de population ;
- 2 classes d'emploi.

Ce qui fait qu'il gère des matrices de tailles pouvant aller jusqu'à 500 x 500 pour chacune des 10 classes distinguées. La finesse du zonage est à mettre en relation avec les autres types de modèles d'équilibre urbain (par exemple, le modèle américain ReluTran se limite à 40 zones).

2.2.3. Fonctionnement et résultats

Parmi les intérêts de Pirandello attachés à son approche statique se situe la relativement faible quantité de données nécessaires en entrée. En effet, les modèles dynamiques requièrent une quantité importante d'informations, dont de nombreuses estimations ou indicateurs indisponible, qui influent directement sur les résultats des simulations. Pirandello passe outre ces informations en endogénéisant dès que possible leur évolution de manière à ce que le modèle évalue par lui-même le comportement des indicateurs plutôt que d'être dépendant des valeurs subjectives d'entrée.

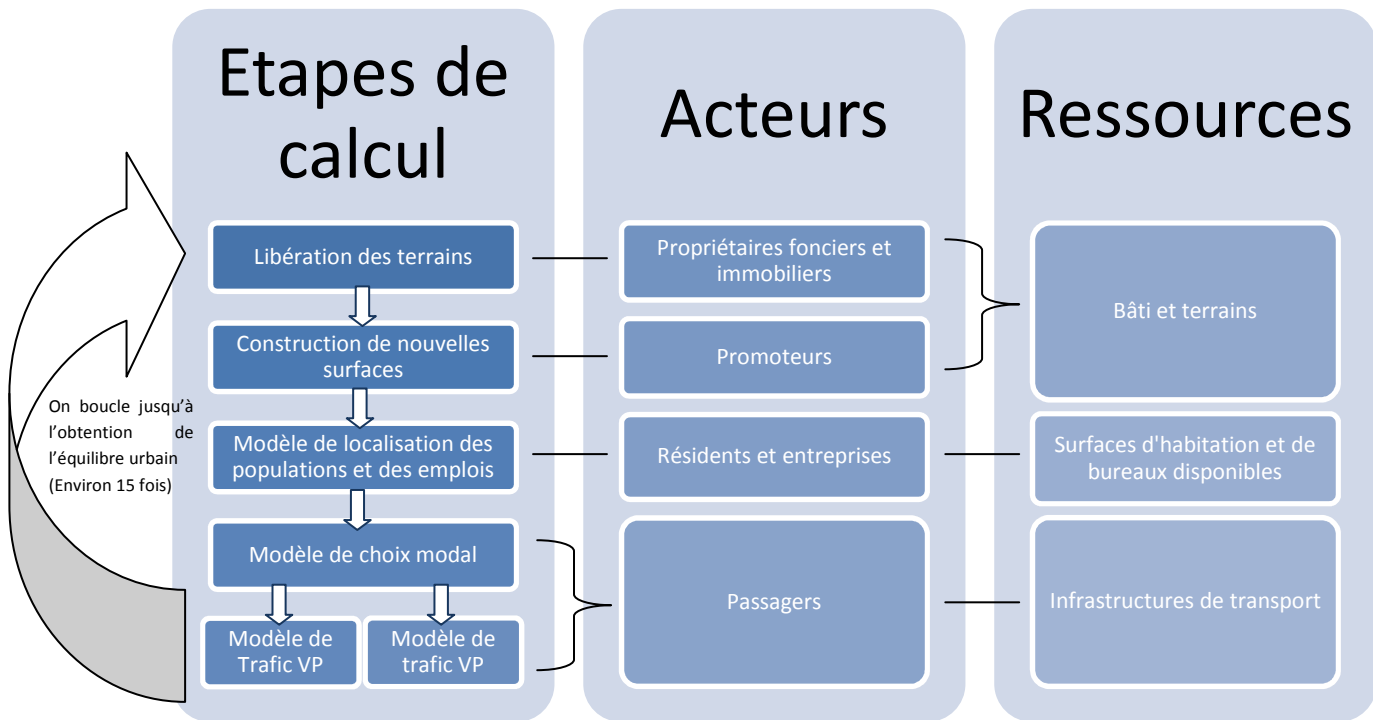


Figure 8 : Etapes, acteurs et ressources du modèle Pirandello (source : Delons)

Ce schéma présente les trois grandes catégories de données qui sont nécessaires au fonctionnement du modèle : les terrains, les surfaces de résidence des populations ou d'emploi et les infrastructures de transport. Nous vous renvoyons à la Figure 12 : Tableau récapitulatif des données nécessaires et de leurs sources qui présente toutes les données et leurs sources correspondantes telles que nous les avons utilisées dans notre étude.

La prise en compte des maires et des promoteurs immobiliers est une clé du succès de la qualité des simulations de Pirandello. Des équations de libération des terrains ou de développement de projets immobiliers permettent d'anticiper le développement de certaines zones par rapport à d'autres en l'expliquant par un gain d'attractivité.

Pirandello ne dépendant pas du temps, il est possible d'ajuster d'autres évolutions comportementales et sociétales à l'horizon souhaité. Entre autres, nous pouvons citer les populations, la valeur du temps, les réseaux, le prix du carburant,... Le modèle propose même un ajustement du désir de surface individuelle en fonction de la classe sociale. A titre d'exemple, ceci est utile lors des simulations de situations passées (avant 1975 notamment) lorsque les foyers étaient composés de plus d'individus et recherchaient moins d'espace par tête. Pirandello possède ainsi de nombreux outils grâce auxquels il

affine sa précision. Nous argumenterons dans la prochaine partie sur les qualités du calibrage synchronique et diachronique effectué.

Le schéma suivant résume le fonctionnement de Pirandello et indique les informations qu'il propose :

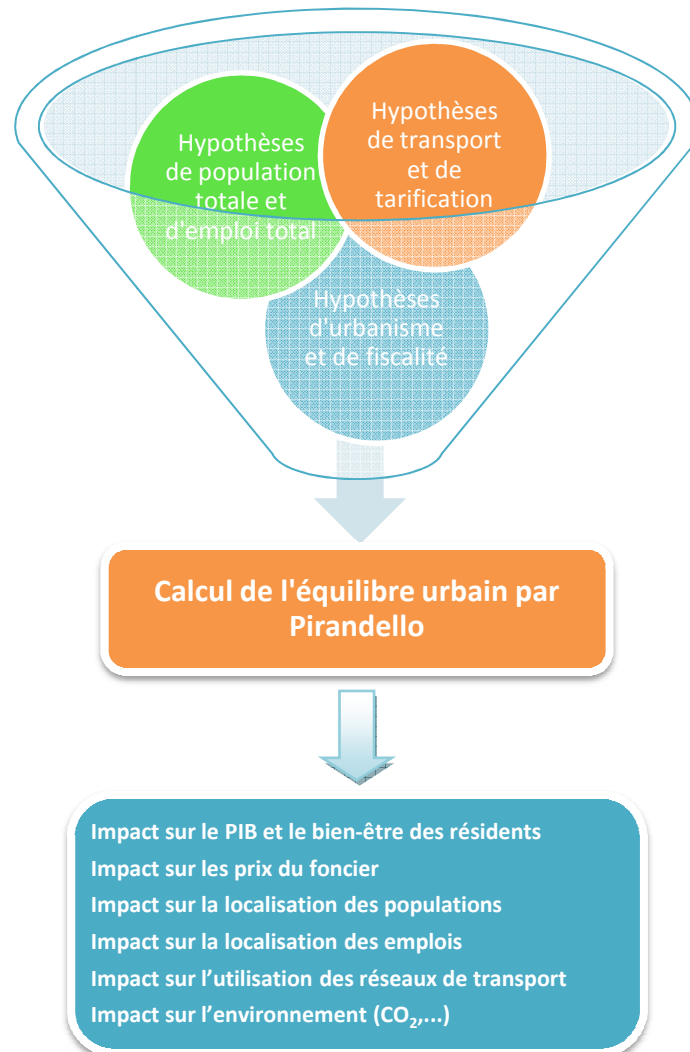


Figure 9 : Pirandello en pratique (source : Delons)

Pirandello fournit un éventail de données en sorties qui permettent d'évaluer les projets sous des angles très variés.

2.2.4. Le modèle d'affectation : AELH

Pirandello utilise, comme beaucoup d'autres modèles, un outil d'affectation du trafic. Dans son cas précis, le modèle de transport utilisé est AELH, le successeur de Davis⁸. Il s'agit d'un logiciel de modélisation macroscopique des déplacements qui permet d'étudier une problématique complète des déplacements en intégrant plusieurs modes de transport. Le logiciel créé à l'INRETS⁹, actuel

⁸ Distribution, Affectation, VISualisation

⁹ Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité

IFSTTAR¹⁰, dans les années 1970 par François Barbier Saint Hilaire est issu de la recherche sur les transports. Le modèle prend en considération de très nombreux paramètres qui lui sont propres. C'est un modèle d'affectation macroscopique statique de la circulation urbaine, permettant d'estimer l'utilisation des tronçons de voirie et des projets à divers horizons, en fonction des décisions lourdes d'exploitation du réseau.

AELH a apporté des changements spécifiques pour l'utilisation par Pirandello. En effet, il est possible de demander au concepteur du modèle de trafic d'apporter des améliorations avec des orientations spécifiques données pour être utilisés directement par le modèle d'urbanisme.

Voici un tableau représentant les évolutions réalisées en 2010 pour l'utilisation par Pirandello :

	Actuel	Précédent
Longueurs	km	-
Charge du trafic	1/1000 uvp/h	1 uvp/h
plage de numérotation	65500	32000
nombre de zones (centroïdes)	4000	-
nombre de carrefours et centroïdes	65500	31999
nombre de tronçons	262143	65500
nombre de mouvements tournants autorisés	infini	65500
nombre de tronçons entrant dans un carrefour	10	-
nombre de tronçons sortant d'un carrefour	10	-
nombre de connecteurs par zone non traversable	255	non inclus
nombre de lois "débit vitesse" dans un réseau	22	non inclus
nombre de bus	32000	1000
vitesse d'un tronçon en km/h	.1 à 150.	-
longueur d'un tronçon en km	.0 à 300.	-
temps de parcours (référence) d'un tronçon en minutes	214	-
débit maximal (capacité en uvp)	100 à 29 000	-
pénalités de mouvements tournants en centièmes de minutes	0 à 998	-
montant du péage sur un tronçon en unités monétaires	.0 à 99.9	-
médiane de la valeur du temps en UM/h	.2 à 6 000.	-
écart-type de la loi de la valeur du temps	.001 à 2.1	-
nombre de classes de véhicules	6	-
nombre d'horaires consécutifs (dynamique)	40	-
nombre de réseaux simultanés	18	-
nombre de lois « débit vitesse » dans une simulation (*)	40	-

Figure 10 : Tableau des améliorations apportées à AELH en 2010 pour Pirandello (source : AELH)

Le nouvel algorithme AEL¹¹ permet de manière très efficace de trouver l'équilibre de Wardrop. Les développements les plus récents proposent une affectation quasi-dynamique sur plusieurs horaires successifs et associe un mécanisme d'équilibre offre – demande permettant aux usagers de choisir leur horaire de déplacement en tenant compte de leur besoin et de la fluidité du réseau. De cette manière, AELH se présente comme un modèle quasi-dynamique. Il contient également des modules supplémentaires pour les transports en commun qui assure une affectation des usagers des transports

¹⁰ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux

¹¹ Affectation par Equilibre Local

en commun selon une répartition logit entre les divers itinéraires proposés par l'offre de transports en commun. Ceci permet également à Pirandello d'intégrer la notion de capacité de l'offre de TC, très importante mais peu représentée dans les autres modèles.

Pirandello possède donc l'avantage d'avoir un modèle de trafic de pointe précisément amélioré pour un couplage optimal des deux modèles. De plus, le travail du concepteur d'AELH continue pour améliorer toujours plus les données fournies à Pirandello. Ainsi, la valorisation du temps et l'intégration des bilans socio-économiques sont parmi d'autres améliorations récentes les avantages de cette collaboration entre les développeurs.

2.2.5. Positionnement parmi les autres modèles

Parmi toutes les démarches analogues qui ont été entreprises, nous avons pu observer qu'elles portent plus souvent sur des analyses de dynamique urbaine. Nous pouvons ainsi dire qu'entre les modèles dynamiques très détaillés et les modèles de trafic habituels, il y a un espace relativement peu exploré, qui réalise pourtant un compromis efficace entre la difficulté de la modélisation et l'intelligibilité des processus mis en œuvre et des résultats obtenus. Le schéma ci-dessous a valeur de synthèse et représente le positionnement de Pirandello vis-à-vis des autres modèles LUTI :

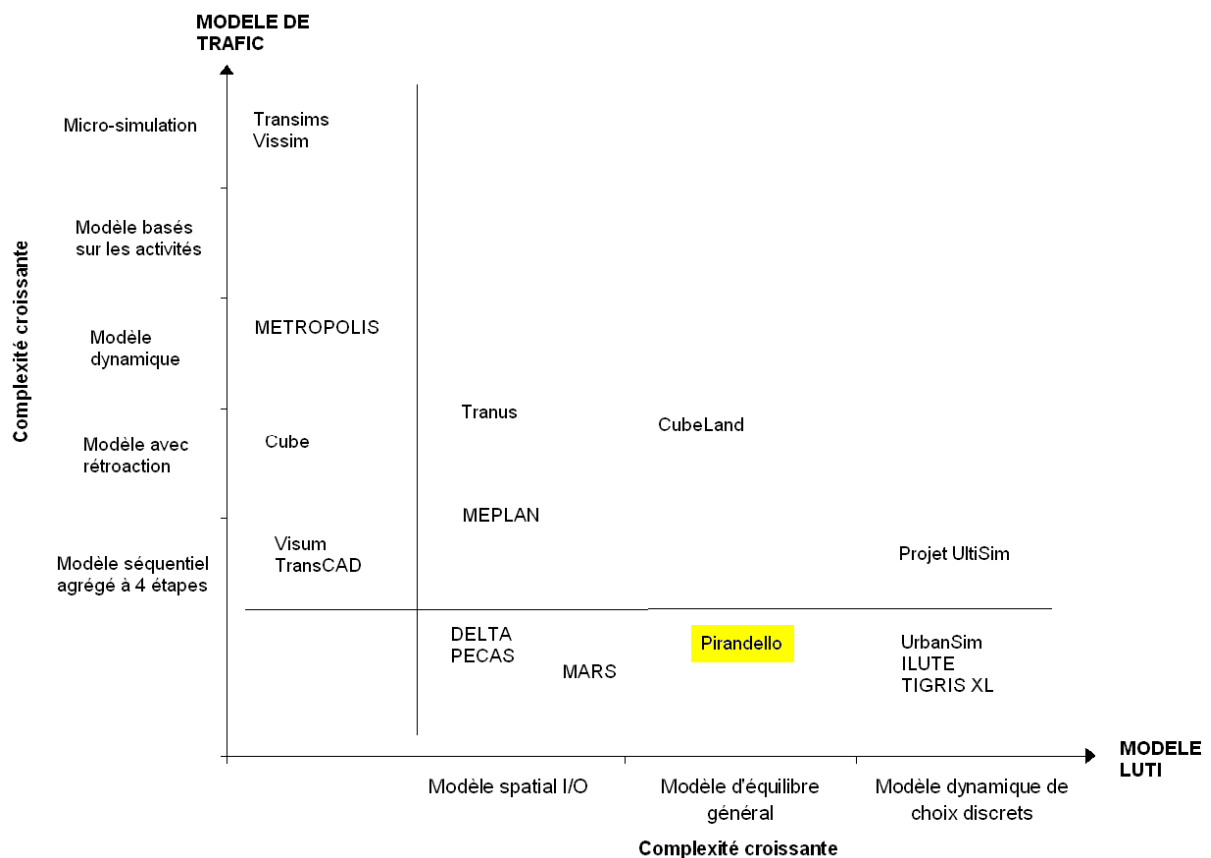


Figure 11 : Positionnement des différentes LUTI (source : IAU de l'Ile-de-France)

Comme indiqué avant la présentation des différents modèles, de nombreux modèles sont une association entre un modèle d'urbanisme et un modèle de transport, qui sont utilisés successivement à chaque itération. Comme dans le cas de Cube Land, il s'agit en réalité de « packages » qui associent dans le même outil les modèles d'urbanisme et de trafic (Mussa et Cube) mais leur utilisation par le

logiciel reste distincte. Nous avons déjà précisé les avantages de Pirandello d'avoir un modèle de trafic adapté à ses besoins.

2.2.6. Une approche spécifique très efficace à long terme

Parmi les nombreux LUTI, Pirandello se présente comme une exception de par son développement orienté vers l'efficacité professionnelle, sa relation étroite avec son modèle de trafic et son statut de modèle d'équilibre. Sa programmation et sa rigueur mathématique de précision en font un outil très efficace sur le long terme. Le choix de se placer d'un point de vue mésoscopique, mais déjà très détaillé par rapport aux autres modèles statiques, lui donne l'avantage de converger vers des situations stables sans se perdre dans une complexité dynamique avide de ressources.

Devant l'abondance de modèles citée au long des paragraphes précédents, le choix du modèle approprié paraît pourtant difficile pour un décideur non expert. La Société du Grand Paris se retrouve d'ailleurs face à ce problème : comment évaluer l'impact de ses propositions le plus justement possible ? La SGP a lancé un marché d'études en avril 2011 dont l'objet est l'évaluation socioéconomique du réseau de transport du Grand Paris. Ce marché comporte 7 lots, dont 3 concernent directement la modélisation intégrée :

- l'« Estimation des effets de la réalisation du réseau de transport du Grand Paris sur la localisation des entreprises et de l'emploi dans la région Île-de-France » (lot 2) ;
- le « Calcul des effets économiques élargis de la réalisation du réseau de transport du Grand Paris, appelés effets d'agglomération, en termes de productivité des entreprises et de PIB supplémentaire » (lot 3) ;
- le « Calcul de l'incidence globale de la réalisation du réseau de transport du Grand Paris sur la localisation des emplois et de la population, ainsi que sur les valeurs foncières compte tenu des disponibilités foncières actuelles et des perspectives dans l'utilisation des sols dans la région Île-de-France » (lot 4).

La solution choisie a été de solliciter plusieurs modèles pour simuler l'avenir de la région Ile-de-France suite à cet apport massif d'infrastructure de transport en commun autour et au travers de Paris : les modèles ReluTran et UrbanSim, respectivement modèle spatio-économique développé par un bureau d'études américain (mené par l'équipe d'Alex Anas) et un modèle basé sur l'activité développé par l'équipe de chercheur du Thema¹² pour l'Iaurif. Enfin, Mussa pourrait également être utilisé à l'intérieur du package Cube Land. Cette évaluation par plusieurs modèles sera l'occasion rêvée pour chacun des développeurs de montrer la pertinence de son modèle.

En abordant le sujet du Grand Paris, il convient de préciser un détail important qui fait que la commercialisation de tels modèles est extrêmement complexe : le calibrage des modèles doit être adapté à la métropole étudiée. En effet, le nombre de facteurs historiques et sociologiques étant considérables, il faut réajuster les paramètres pour chaque ville. Il est inadapté d'aborder sous les mêmes hypothèses et équations une ville européenne, africaine, sud-américaine ou asiatique. La

¹² THéorie Economique, Modélisation et Application

modélisation touche ici à la sociologie et à la culture qui restreignent son champ d'action. Pirandello a permis de tirer cette conclusion des trois villes étudiées sur le territoire français (Paris, Lyon et Montpellier) et pour lesquelles il a fallu à chaque fois réajuster les différents paramètres de manières différentes. Le parallèle imagé peut être fait avec le monde de la haute couture où chaque tenue est réalisée sur mesure pour le mannequin qui la portera, sans quoi l'effet esthétique recherché ne serait plus le même. De la même manière, le modèle d'interaction doit prendre les mesures de la ville et ajuster des paramètres pour lui coller à la peau. Pour chaque ville, cette étape de calibration est la première et sûrement la plus importante. Idéalement, un calibrage synchronique et diachronique, s'il advient que des modèles y parviennent, serait nécessaire. Nous insistons sur ce point et les étapes de sa réalisation pour Pirandello dans la partie suivante.

3. La validation du modèle par rétropolation

3.1. Principe et intérêts du calage synchronique et diachronique

Pirandello, comme de nombreux modèles présentés précédemment, nécessite des données réelles pour être calibré. Il faut ajuster de nombreux coefficients et constantes à partir d'une situation connue afin d'évaluer les capacités prévisionnelles. Dans cet objectif, la plupart des modèles représentent correctement la situation actuelle, puisqu'ils sont configurés à partir de cette situation de référence. Cependant, rien ne prouve leur capacité à prédire les modifications à venir. Le calage synchronique ne suffit pas à montrer son efficacité.

L'idée de Jean Delons et de son équipe pour montrer la capacité de Pirandello à évaluer la situation d'un horizon défini à partir de la situation actuelle fut donc de « prédire le passé ». En effet, nous ne pouvons jamais vérifier la justesse d'une prévision avant de l'avoir effectivement vécue. Cependant, le modèle utilise les prévisions de croissance, les évolutions en cours,... pour anticiper les changements. Pourquoi ne pas utiliser ces mêmes variables mais cette fois dans l'autre sens, c'est-à-dire vers le passé ? Cette méthode de calage diachronique est une quasi-innovation dans le domaine des LUTI puisqu'elle permet de montrer l'efficacité du modèle par la confrontation de la simulation au réel. Des modèles comme Tranus, Metropolis et UrbanSim ont tenté cette démarche mais sans obtenir de résultats entièrement satisfaisants à ce jour, du moins de ce qui est publié dans la presse scientifique.

Les calages synchronique et diachronique sont complémentaires et permettent de calibrer la valeur de différents paramètres. Le calage synchronique permet entre autres de calibrer le taux de motorisation, les paramètres du choix modal et de la distribution. Pour sa part, le calage diachronique permet de calibrer les éléments essentiels pour la projection que sont les équations des promoteurs et des maires ainsi que l'évolution des comportements.

3.2. Recueil des données

Dans notre situation, nous gardons comme objectif d'évaluer l'impact de la création de la ligne A de RER sur l'aménagement de l'Ile-de-France. Le développement du RER s'est effectué de 1969 jusqu'à la fin des années 90. En se calant sur les années de recensement INSEE, riches en données, nous avons donc fixé la situation de référence à l'année 1999 pour simuler les périodes précédentes. Les années utilisées pour la reconstitution du passé ont été : 1968, 1976, 1983, 1991.

Le fait de remonter aux années 1960, avant le lancement des projets de RER, a deux intérêts directement liés à l'objectif de l'étude :

- Calibrer le modèle sur différents horizons ;
- Prendre connaissance de la création du réseau et des politiques globales liées à la réalisation de ces infrastructures de transport de masse.

Les exploitations réalisées ici mettent en œuvre plusieurs bases de données simultanément. Cependant, ces bases sont complétées pour des années qui ne coïncident pas toujours et il faut effectuer des recherches complémentaires ou justifier des hypothèses. Il s'agit notamment des données de l'immobilier et de l'évolution des réseaux de transport.

Les listes suivantes recensent l'ensemble des données nécessaires pour faire fonctionner le modèle Pirandello. Cette liste est idéale et exhaustive et, étant donné que certaines données peuvent s'avérer difficile à récolter, le modèle peut quand même fonctionner convenablement à l'aide d'hypothèses réalistes et rationnelles, obtenues par exemple par ajustement (moindres carrés ordinaires).

Il faut néanmoins signaler que Pirandello requiert particulièrement peu de données de cadrage et d'entrée en comparaison aux modèles dynamiques du même type.

Idéalement, des données cohérentes nécessaires à la construction d'un modèle de dynamique urbaine pour la partie logement contiendraient le prix du m² à la vente pour chaque zone, la surface totale dédiée au logement, la surface totale dédiée à l'emploi, et des caractéristiques classiques de ces surfaces, comme le nombre de personnes dans chaque logement, le stock de logements, de bureaux etc. Il n'existe en réalité aucune centralisation des données de l'immobilier. Il est donc nécessaire de recouper plusieurs sources. Enfin, même lorsque les enquêtes existent, il a souvent été nécessaire de réaliser des traitements complémentaires.

L'obtention de données complémentaires a été particulièrement compliquée, l'information disponible étant souvent partielle : il s'avère qu'il n'est pas possible de connaître de façon exhaustive la surface habitable ni la surface dédiée à l'emploi. Le stock total n'est pas bien connu par les différents organismes contactés. Les variations sont en revanche accessibles de façon partielle soit par la base BIEN (Base d'Informations Economiques Notariales), à la chambre de notaires de Paris, qui enregistre les transactions, soit par la base des autorisations de permis de construire qui ne contient par définition que les nouvelles surfaces.

L'essentiel de l'information utilisée provient donc de :

- EGT (Enquête Globale transport) 2001 et 1990 ;
- Chambre de notaires de Paris (extractions de la base BIEN) ;
- Sites web consacrés aux logements (exemple : www.cotation-immobiliere.fr)
- Mode d'Occupation des Sols (MOS) d'Ile-de-France (IAURIF)
- DGI (Direction Générale des Impôts) pour les revenus communaux et les différentes taxes relatives à l'immobilier (taxe d'habitation, taxe professionnelle, taxes foncières) ;
- Recensement INSEE de 1999 et découpage IRIS (Ilots Regroupés pour des Indicateurs Statistiques) ;
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) pour les données relatives au Ministère de l'Equipeement ;
- Ensemble des recensements effectués en région Ile-de-France ;
- DADS (Déclaration Annuelle de Données Sociales) pour ce qui est des salaires.

Les données relatives aux réseaux de transport seront décrites dans la partie traitant du développement du réseau.

3.2.1. Données nécessaires

Voici un tableau récapitulatif des données nécessaires pour faire fonctionner le modèle et leurs caractéristiques principales :

Données	Année	Source retenue en Ile-de-France
Enquêtes classiques pour une étude de trafic		
Enquête ménage	2001	Enquête Globale des Transports (EGT) de la Direction régionale de l'équipement
Réseaux de transport		
Réseaux TC	68-76-83-91-99	BNF + IAURIF + IGN + RATP + SNCF + STIF
Réseau routier	60-70-80-90-00	BNF + IAURIF + IGN
Données de cadrage		
Prévisions de croissance de population et d'emplois à l'horizon espéré	1999	INSEE + EHESS (Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales)
Prévision de croissance économique (PIB / habitant) à l'horizon espéré	1999	INSEE
Taux de libération des terrains par les maires	-	MOS
Taux de projets immobiliers par les promoteurs	1999	INEE
Par zone		
Coordonnées et surface	1999	INSEE
Répartition de la population par classes de revenu	2001	EGT + DGI
Paramètres comportementaux (valeur du temps)	2001	EGT
Répartition des emplois par revenus	1999	INSEE
Surface des logements (par standing) et bureaux (présentiel ou non-présentiel)	2001	EGT
Prix de l'immobilier (par m ²) pour les logements et les bureaux (présentiel et non-présentiel)	-	Base BIEN
Pourcentage des maisons, des immeubles et des autres logements	-	Base BIEN
Coefficient d'occupation des sols pour les logements et les bureaux	-	A déterminer
Fiscalité locale (taxes d'habitation, taxes professionnelles, taxes foncières pour le bâti et le non bâti)	-	DGI
Motorisation par classes de revenu et parc automobile	2001	EGT
Répartition et coûts des parkings selon leur type (gratuit, payant, au domicile, dans la rue)	2001	EGT
Prix des cartes d'abonnement TC (et répartition selon les forfaits)	2001	RATP
Part des déplacements effectués avec une carte de TC répartie selon les types d'abonnement et les classes de revenu	2001	EGT
Temps référence de parcours par mode	2001	EGT
Surfaces HLM, effectifs, prix, durée file d'attente	-	MEDDTL
Accessibilité extérieure (hors du périmètre d'étude : accessibilité liée aux gares et aéroports)	-	Sources diverses (aéroports, SNCF,...)
Interzone		
Trafic observé et répartition modale	-	EGT
Matrices O/D des déplacements, temps et coûts en VP, TC, marche à pieds et en moyenne	-	EGT et estimations
Matrice des péages entre zones	-	Hypothèses

Figure 12 : Tableau récapitulatif des données nécessaires et de leurs sources

3.2.2. Développement du réseau de transports

En plus des données propres au paramétrage du modèle, il faut représenter l'offre de transport à chaque horizon simulé afin de faire fonctionner correctement le modèle de trafic et mesurer l'accessibilité de chaque zone. Il est assez simple et rapide d'obtenir les caractéristiques générales des infrastructures lourdes mais il est beaucoup plus compliqué de s'informer sur l'état du préexistant et des données d'exploitations.

Le format des données utilisées pour coder le réseau impose une division en 6 catégories (métro, transilien et RER, route, tramways, bus et optiles) qui a structuré nos recherches.

3.2.2.1. Données existantes sur internet

Une des premières étapes était de rechercher sur internet des sources fiables sur l'évolution des différents réseaux. Ainsi, les sites web de la RATP, de la SNCF, des Transiliens ou des sites communautaires comme Wikipédia ou WikiSara fournissent un bon aperçu des structures de l'époque et de l'évolution du réseau. Des sites de passionnés ou culturels comme BuSiloé pour les bus ou celui du Musée des Transports Urbains ont également permis de réaliser les premiers réglages du réseau. Néanmoins, ces données restent très largement incomplètes et de sources parfois non précisées.

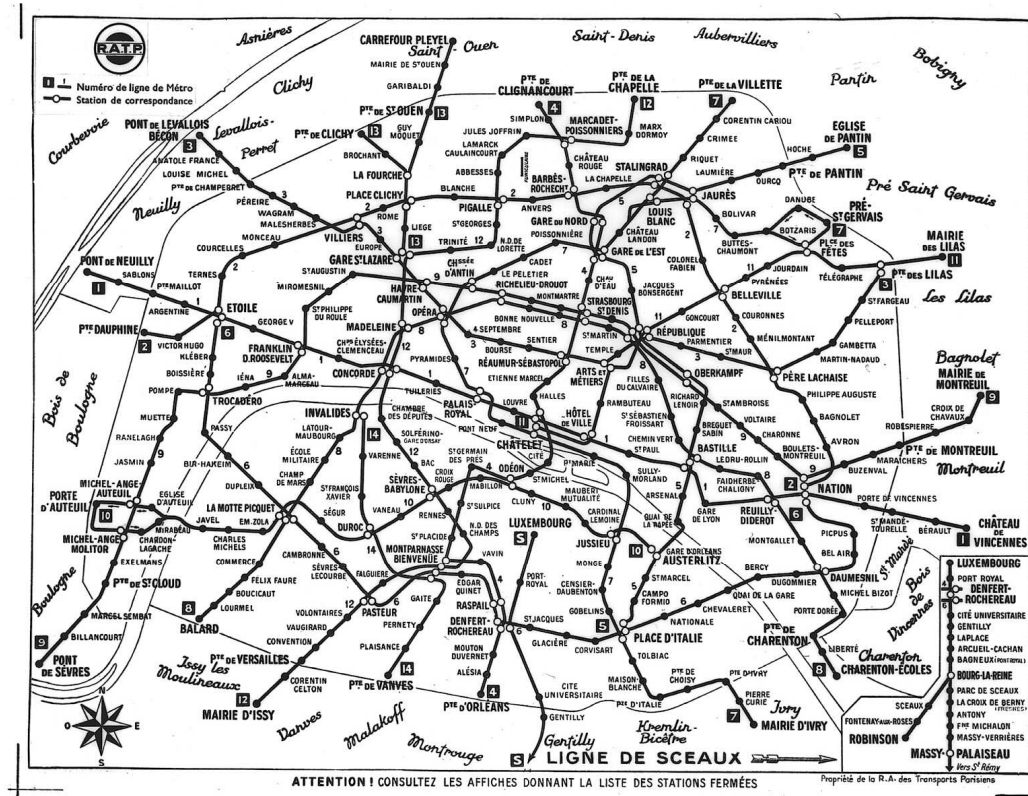
L'accès aux données par internet s'est avéré être très intéressant au niveau des schémas directeurs de la région et de l'historique des politiques d'aménagement de l'île de France, principalement sur les orientations portées par Delouvrier.

3.2.2.2. Consultation des archives

Pour obtenir des données précises d'exploitation (horaires, fréquences, capacité et tarification), nous avons voulu nous appuyer sur les références les plus fiables afin que rien ne nous soit reproché à ce niveau là. Les modèles sont tellement complexes et leurs hypothèses engendrent des erreurs d'estimations qui font de la fiabilité des données un critère nécessaire et obligatoire.

Dans cette démarche, nous avons contacté les différents acteurs des transports ou centres de documentations qui pouvaient nous renseigner sur l'historique des réseaux. La démarche utilisée ici était à la fois celle d'un chercheur et d'un historien. Nous avions besoins des données pour faire fonctionner notre modèle et nous raisonnions avec beaucoup de rigueur quant à la véracité des sources des documents récupérés.

Le premier lieu consulté fut le centre du patrimoine historique et culturel de la RATP, le 22 septembre 2011, à la maison de la RATP au 54 quai de la Rapée à Paris. L'étude réalisée dans cette bibliothèque a permis de récolter des données très complètes et des cartes sur l'évolution du réseau de métro ainsi que des lignes de RER exploitées par la RATP (ligne A sauf nord-ouest et sud de la ligne B). Les documents les plus utiles furent les rapports de statistiques annuelles qui décrivent l'activité de l'année et les principales caractéristiques de fonctionnement de chaque ligne. La Figure 41 : Extrait des statistiques annuelles de la RATP de 1968 (source : RATP) en annexe montre le type de données récoltées.



© RATP - Reproduction

44119 - 12/01/1962

Figure 13 : Carte du réseau de métro en 1962 (source : RATP)

Ces recherches ont fourni les données nécessaires à l'encodage du réseau de métro, de bus dans paris intra-muros et en banlieue proche et d'une première partie des lignes RER.

Il restait néanmoins à récupérer des données sur les trains de banlieue, actuels transiliens mais aussi anciennes lignes exploitées désormais sous l'acronyme RER. D'autre part, le réseau routier est fortement structurant pour le territoire et nous manquons de données quant aux voies existantes avant la construction de nouvelles infrastructures. Nous nous sommes donc rendus le 13 octobre 2011 à la section « cartes et plans » de la Bibliothèque Nationale de France, à la salle Richelieu, afin d'y consulter les archives du réseau routier francilien. Par la même occasion, nous avons pu récupérer de nouvelles cartes du réseau de transports en commun. Comme pour les archives de la RATP, nous avons effectué de nombreuses photocopies en noir et blanc que nous avons pu exploiter pour reconstituer le réseau routier. Ce réseau là nécessite relativement peu de données puisqu'il s'agit uniquement d'indiquer les capacités des routes qui détermineront une offre pour l'utilisation des véhicules privés. En complément des cartes déjà obtenues, nous avons contacté l'Institut Géographique National qui nous a fourni de nouvelles cartes de très bonne qualité et facilement exploitables. Les cartes collectées pour la situation de l'Ile-de-France aux années recherchées sont des cartes Taride.

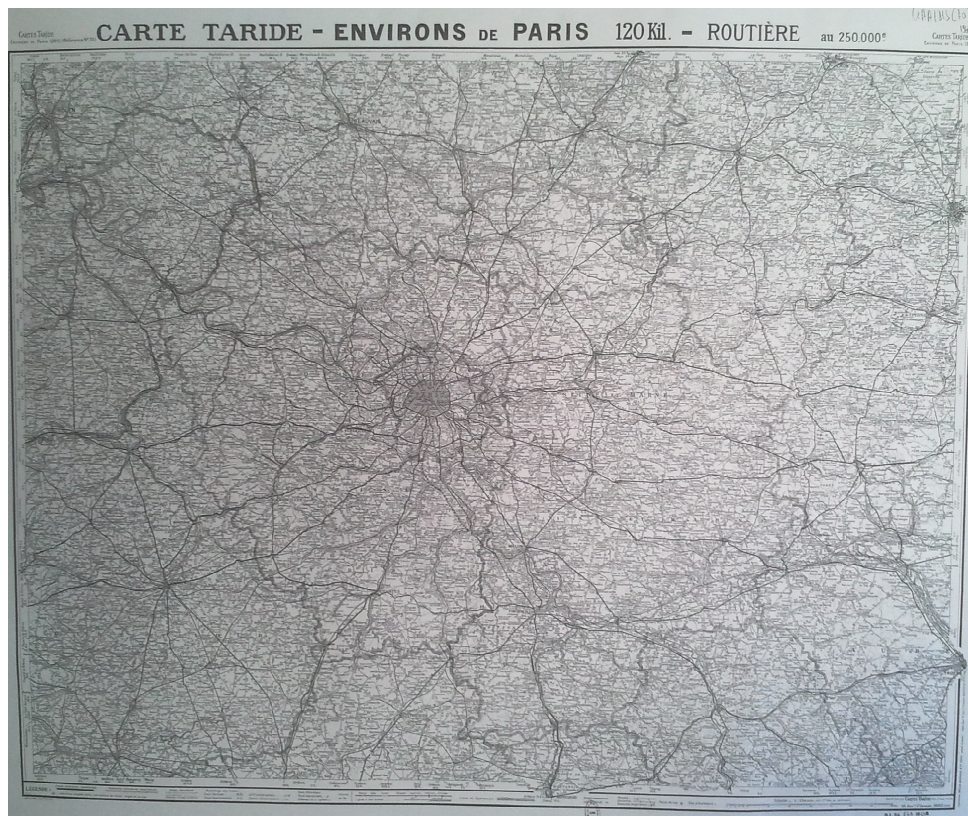


Figure 14 : Carte routière Taride de Paris et ses environs en 1968 (source : BnF)

Enfin, la dernière étape fut de se rendre au Mans, le 18 octobre 2011, afin de consulter les archives historiques de la SNCF. Ce centre contient des milliers de documents décrivant l'histoire des chemins de fer français depuis leur conception jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle. La journée passée au milieu de ces documents a permis de récolter de nombreuses données, notamment des photocopies des indicateurs officiels SNCF, les Chaix (voir couverture en annexe avec la Figure 42 : Couverture d'un indicateur Chaix de 1960 (source : RATP)) ou ceux uniquement centrés sur l'île de France.

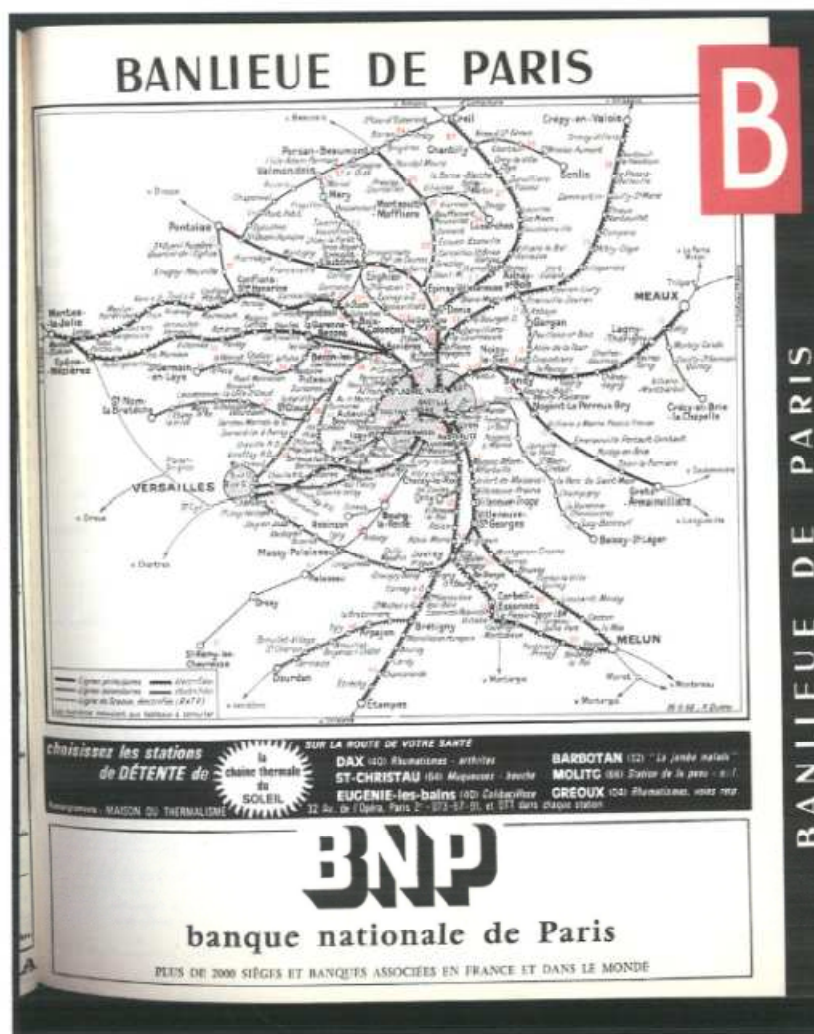


Figure 15 : Carte du réseau ferré francilien exploité par la SNCF en 1968 (source : SNCF)

Ces indicateurs contenaient les grilles horaires tant recherchées depuis le début concernant l'évolution des missions et de fréquences pour les trains de banlieue, et plus particulièrement ceux remplacés par les RER actuels pour lesquels nous n'avions aucune donnée. La Figure 43 : Grille horaire de la ligne Paris-St-Lazare à Argenteuil en 1968 (source : SNCF) en annexe montre un exemple de grille pour une ligne.

Toutes ces démarches de recherches historiques ont permis en parallèle de s'approprier l'évolution du réseau tout en justifiant la véracité des données utilisées pour reconstituer la situation du passé au niveau des infrastructures de transport.

Le seul vide subsistant après nos recherches sur le réseau concerne le réseau de bus actuellement nommé Optile, qui est l'Organisation Professionnelle des Transports d'ÎLE de France. En effet, cette organisation est composée de nombreuses autorités organisatrices des transports en banlieue parisienne qui sont indépendantes et possèdent leurs systèmes personnels de gestion. Nous avons rapidement abandonné l'idée de reconstituer fidèlement cette partie du réseau face à la complexité de

la tâche et du faible impact estimé à priori. En effet, ces réseaux étant ciblés sur des zones de petite taille, leur impact sur l'accessibilité des zones de banlieue reste faible sachant que ces zones ont des superficies beaucoup plus grandes que celles centrales et englobent intégralement certaines entités du réseau Optile. Nous avons donc conservé les lignes actuelles telles qu'elles sont.

3.3. Encodage du réseau

Après la phase de récolte de données, qui s'est avérée être la phase la plus importante car à l'origine de tous les résultats que nous allons présenter, nous nous sommes attachés à réaliser le réseau au format utilisé par le modèle de trafic (Davis) et Pirandello.

Le format des lignes de transports en commun suit l'exemple :

```
Line name="garedelest/tournan", oneway=f, color=13, mode=6, xyspeed=30, headway[1]=30,
headway[2]=30, longname="garedelest==>tournan",
      N=2950,N=-2932,N=2952,N=-2953,N=-2954,N=2955,rt=10,N=-2956,
      N=2957,N=2958,rt=17,N=2959,rt=21,N=2960,rt=25,N=2961,rt=29,
      N=2962,rt=33,N=2963,rt=38,N=2972,rt=43
```

Les différents paramètres sont les suivants :

- « Line name » : nom de la ligne afin de différencier deux lignes entre elles ;
- « oneway » : « t » indique que la mission est à sens unique, « f » pour l'aller-retour ;
- « color » : utilisé pour la représentation sur la carte ;
- « mode » : définit le mode (bus, train, métro,...) pour pouvoir utiliser des sélections par mode et définir des attributs de groupe ;
- « xyspeed » : valeur utilisée quand l'intervalle de temps n'est pas indiqué, permet de déterminer un intervalle à partir de la distance mesurée ;
- « headway[1] » : intervalle de temps moyen en heures de pointe ;
- « headway[2] » : intervalle de temps moyen en heures creuses ;
- « longname » : origine et destination pour information.

Ensuite, l'encodage se réalise à partir des nœuds utilisés par Davis et TransCad. Il s'agit des données fournies par le Syndicat des Transports d'Ile-de-France (STIF). Le « N= » précède le numéro du nœud concerné. Un signe « - » devant ce numéro indique que ce nœud est bien sur la ligne mais qu'il n'est pas marqué par un arrêt. Les « rt= » indiquent le temps cumulés, en minutes, depuis le début de la ligne.

Toutes les lignes de chaque mode sont regroupées dans un fichier texte, du type bloc-notes, qui est ensuite utilisé par un programme de conversion au format souhaité (console windows + SAS). Les résultats obtenus sont lisibles avec Microsoft Excel, TransCad ou MapInfo selon le type de fichier. Enfin, des types de fichier propres à Pirandello sont créés pour être utilisés ensuite.

Voici un exemple de réseau observé par MapInfo pour vérifier l'état du réseau encodé :



Figure 16 : Réseau Transilien et RER de 1968

Ce travail d'encodage et d'exploitation des données représente la partie la plus laborieuse et la plus longue à réaliser pour améliorer la précision des résultats.

3.4. Historique du réseau de transport en Ile-de-France

Nous présentons dans cette partie l'évolution du réseau de transport francilien depuis 50 ans. L'évolution de chaque mode est décrite de manière séparée afin de comprendre la logique de leur développement.

3.4.1. La route encercle Paris

Le réseau VP de l'île de France a été établi, compte tenu des données disponibles, sur 5 horizons : 1960, 1970, 1980, 1990 et 2000.

Deux sources de données ont été utilisées pour leur réalisation, la carte routière Michelin de 1963 et la carte de l'aurif et de l'Insee répertoriant l'évolution des voies rapides de l'Ile-de-France depuis 1960.

L'hypothèse retenue est que seules les voies rapides ont évolué au cours des 50 dernières années. Ainsi, pour chaque décade, le réseau correspond à celui utilisé actuellement, retranché des voies rapides mises en place depuis la période de référence. Afin d'assurer une bonne reconstitution du passé, les voies rapides ont été supprimées ou remplacées par des routes de type 2x1 voies en fonction du réseau de référence. Comme le montre la carte ci dessous, la plupart des pénétrantes, la francilienne ainsi que le périphérique ont été intégralement construites depuis moins de 50 ans. En revanche, l'A86 (nord et sud), la N286 et la N2 correspondent à des routes déjà existantes en 1960.

Voici l'évolution du réseau modélisée avec les données recueillies :

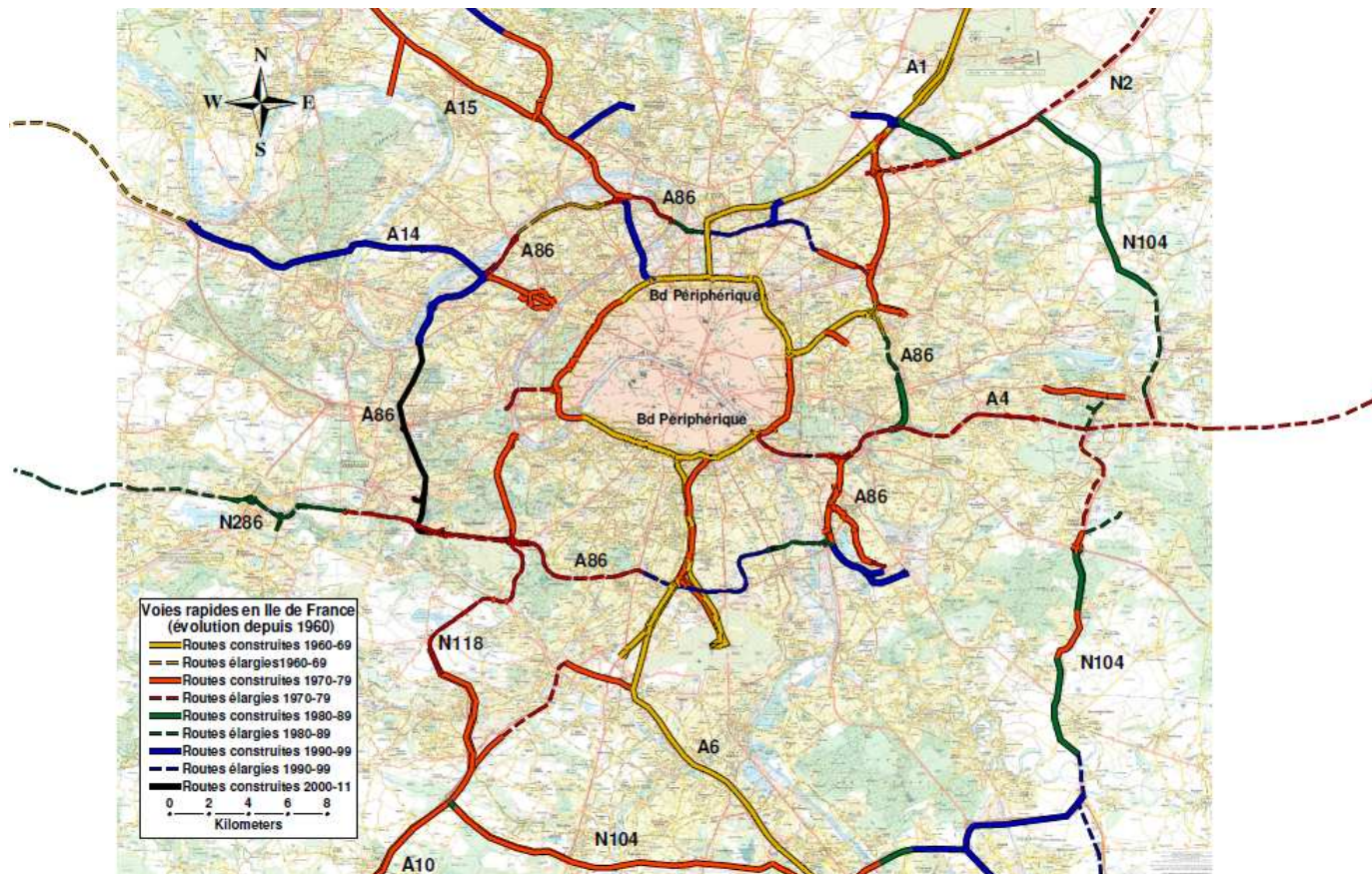


Figure 17 : Evolution du réseau routier autour de Paris (fond de carte : Michelin 2008)

La carte illustre la rupture dans la construction d'infrastructures routière à la fin des années 1970 et le net ralentissement de ces dernières à partir de 2000. Ce développement suit la logique de l'évolution de l'automobile, avec un fort développement dans l'après-guerre puis un ralentissement progressif du d'une part à la saturation en infrastructures, et de l'autre au développement des transports en commun.

Le réseau s'est développé durant cette période de deux manières avec à la fois la création de rocades, le boulevard périphérique puis l'A86, et de pénétrantes autoroutières jusqu'aux portes de Paris. Le projet LASER prévoyait même de faire rentrer ces pénétrantes jusque dans Paris à l'aide de tunnels et des voies sur berges pour desservir les gares et un plus petit périphérique intérieur.

3.4.2. Le métro évolue peu mais sort de Paris

Développé pour l'exposition universelle de 1900 et finalisé en moins de 20 ans, le réseau parisien est un des plus denses au monde. Après une longue période de ralentissement parallèle au désintérêt des pouvoirs publics pour les transports urbains à la sortie de la 2^{nde} guerre mondiale, le métro reprend son développement à la fin des années 60. La saturation de la capitale par l'automobile a montré le rôle primordial joué par le métro. Le nouveau développement devait également s'adapter à la création simultanée du réseau régional.

Le tableau récapitulatif de la Figure 44 : Tableau récapitulatif des principales étapes de construction du métro depuis 1968 en annexe répartit les principales extensions en fonction du découpage des périodes imposé par notre étude.

La conclusion principale est celle du titre de ce paragraphe. Le réseau intra-muros, a très peu évolué entre 1930 et nos jours. Nous pouvons citer une étape importante qui est la jonction de la ligne 13 et

de l'ancienne ligne 14 entre St-Lazare et les Invalides terminée en 1976. En longueur de lignes, la sortie de Paris a permis au réseau de passer de 168,9 km en 1968 à 211,3 km en 1999 (ligne 14 comprise), et de 338 stations à 380.

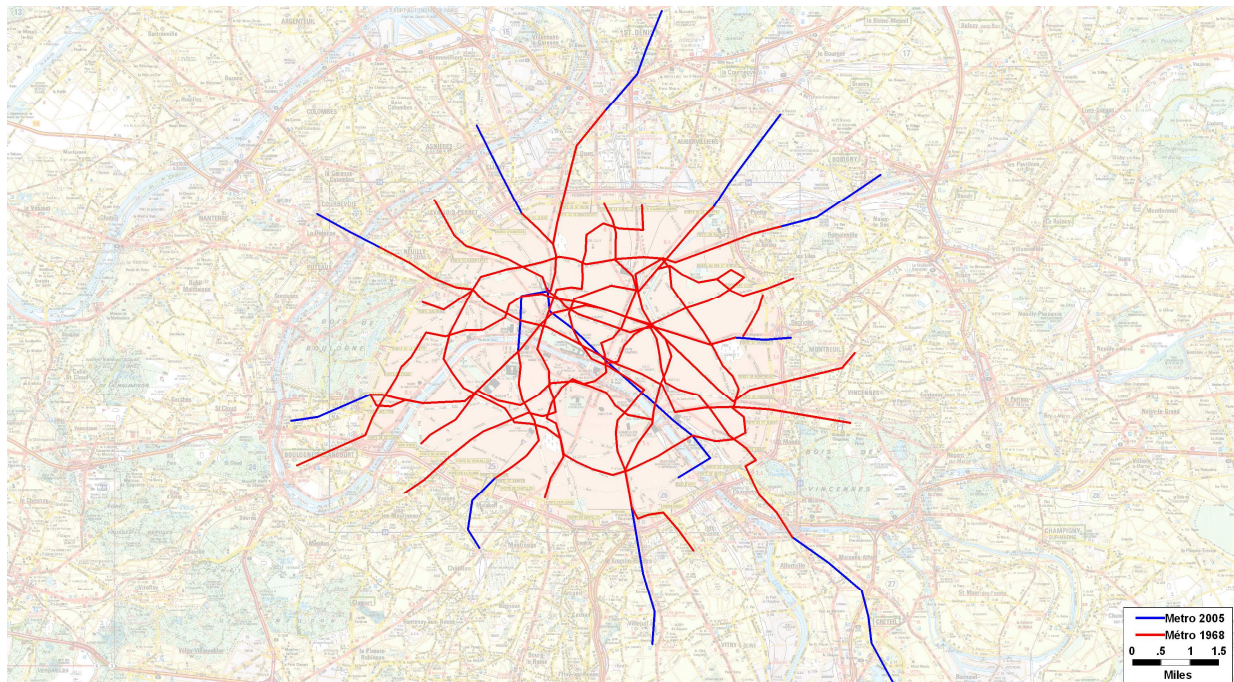


Figure 18 : Evolution du métro entre 1968 et 2005 (source : RATP)

Autre élément important mais beaucoup plus tardif et réalisé pour décharger la ligne A du RER : la ligne automatique 14. Cette ligne a entièrement été construite, à une profondeur importante due à la densité du réseau existant, et ouverte en 1997. Cette ligne, entièrement automatique, est très différente des autres à cause de sa rapidité et de l'espacement entre ses arrêts (plus d'1 km contre environ 500 m en moyenne).

Parmi les principales améliorations, nous pouvons citer l'évolution du matériel roulant, avec le remplacement des vieux Sprague Thomson, qui influe sur le confort des passagers et la capacité mais relativement peu sur les fréquences (moins de 10 %). La tarification unique représentée par la mise en place de la carte Orange en 1975 en marque une étape considérable de l'utilisation des transports publics dans les mentalités.

3.4.3. L'aventure du RER

1837, 1965, 1977 : trois dates essentielles dans l'histoire du RER en Ile-de-France. La première est celle de la mise en service de l'ancêtre des lignes ferroviaires ouvertes aux voyageurs en région parisienne, la ligne de Saint-Germain-en-Laye. Elle sera 135 ans plus tard l'un des premiers tronçons du Réseau Express Régional dévolu à la RATP. La deuxième est celle de l'inscription du RER dans le schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme de la région parisienne, officialisant pour la première fois dans un texte ce projet. La troisième marque la vraie naissance du RER avec la rencontre des lignes A et B à Châtelet-Les-Halles.

Le réseau actuel est séparé entre RER et Transiliens, ces derniers correspondant à toutes les autres lignes ferroviaires d'Ile-de-France.

La genèse du projet de réseau express régional remonte déjà au début du XIX^{ème} siècle où la Compagnie des Chemins de fer Parisiens (CCP) prévoyait deux transversales à grand gabarit, l'une est-ouest et une nord-sud. Nous voyons déjà apparaître approximativement dans le schéma de 1930 les futures lignes A, B et C mais de manière informelle.

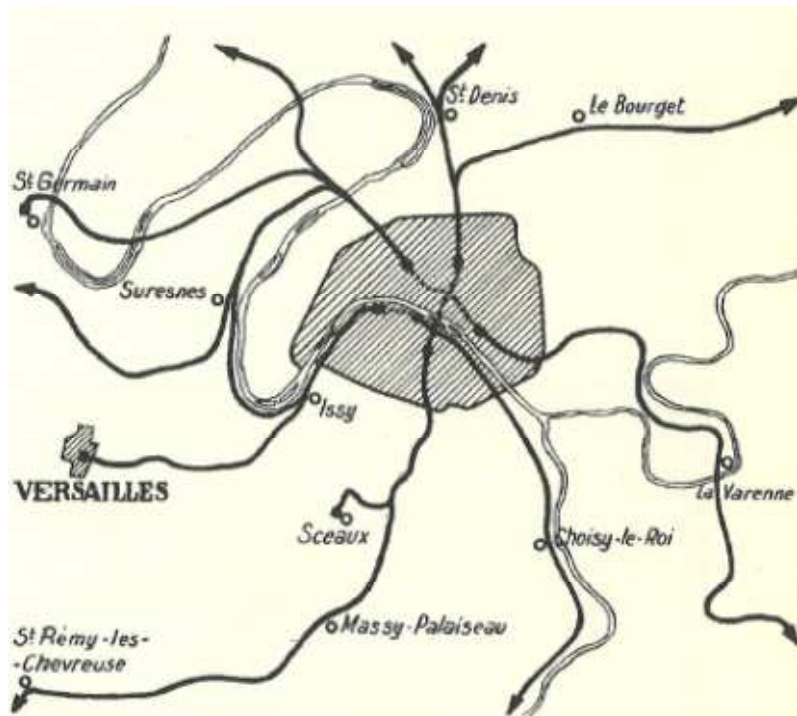


Figure 19 : Projet de métropolitain express des années 1930 (source : SNCF)

Avec la modernisation et l'électrification de certaines lignes, notamment la fameuse ligne de Sceaux, l'idée ressurgit avant la seconde guerre mondiale. Au sortir de cette guerre, la RATP prend la charge des transports parisiens. Les premières années qui suivent la guerre font la part belle à l'automobile mais cette dernière montre rapidement ses limites dans un tissu aussi dense que celui de la région parisienne et avec la forte croissance démographique observée.

La RATP et la SNCF relancent alors le projet du RER dès 1956. Durant la même période se développent les grandes décisions telles que la création du quartier d'affaires de la Défense ou le second aéroport international, à Roissy. Les premières lignes concernées furent à l'est la ligne de Vincennes, reliant Bastille (remplacée par la nouvelle station de Nation) à Boissy-St-Léger, et à l'ouest la ligne de St-Germain-en-Laye, partant initialement de la gare St-Lazare avant d'être détournée au niveau de Nanterre au profit de la Défense et de la station d'Auber. Sous l'impulsion de Paul Delouvrier, alors Délégué général du District, les travaux sont lancés en 1961. Quelques années plus tard, la décision est prise de réaliser un lien vers Marne-la-Vallée au dépend du tracé prévu par Gretz, ceci dans un souci d'urbanisme qui se transformera en politique des villes nouvelles à la fin de la décennie. Le schéma directeur de 1965 prévoit l'organisation suivante dans le développement du RER :

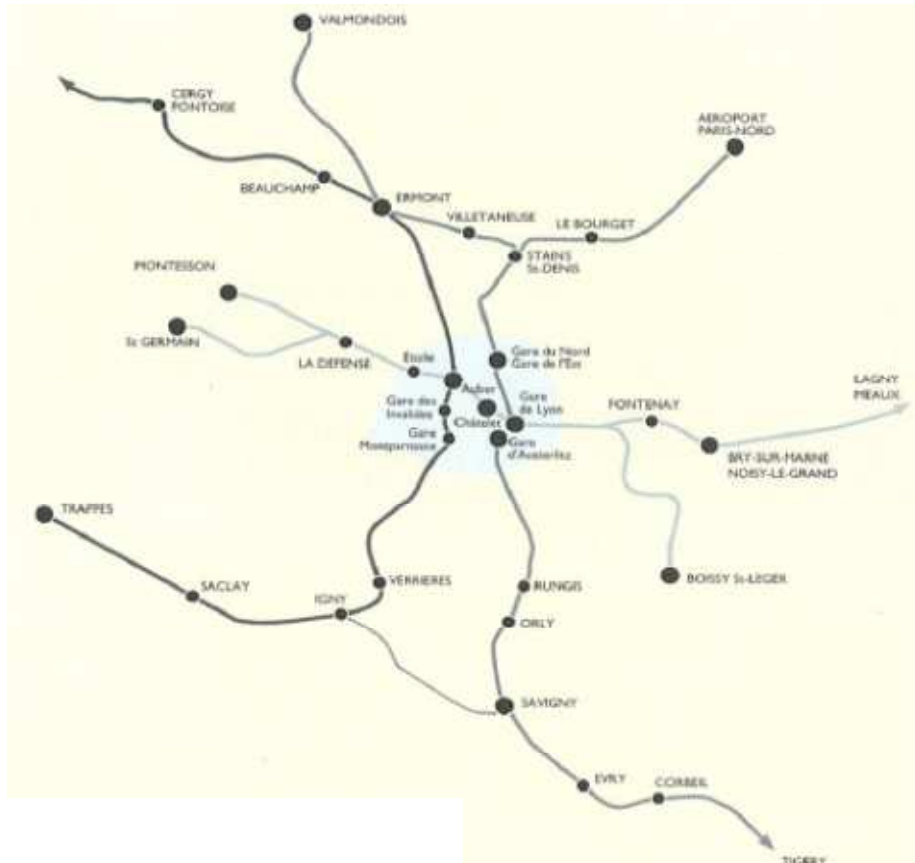


Figure 20 : Le RER dans le schéma directeur de 1965 (source : SNCF)

On remarque étonnamment que le schéma de 1930 était plus proche du réseau actuel que ce dernier. Il sera d'ailleurs abandonné car entraînant la construction d'un trop grand kilométrage de voies nouvelles. Ce détail est important puisqu'il permet d'insister sur le fait que le RER est très majoritairement basé sur des lignes existantes. Le véritable intérêt du nouveau réseau réside dans les interconnexions entre banlieues (est-ouest, nord-sud,...) et le passage à l'intérieur de Paris de ces lignes de transport de masse.

Les premiers travaux de réaménagement et d'électrification des lignes de Boissy et St-Germain sont terminés en 1969 et commence alors une vague d'inaugurations successives. Dès 70, le gouvernement décide ce qui sera le véritable lancement du RER : la jonction est-ouest et sud à Châtelet. Le tronçon Auber-Nation et le prolongement de la ligne de Sceaux seront inaugurés en 77. Le RER A et le RER B sont nés.

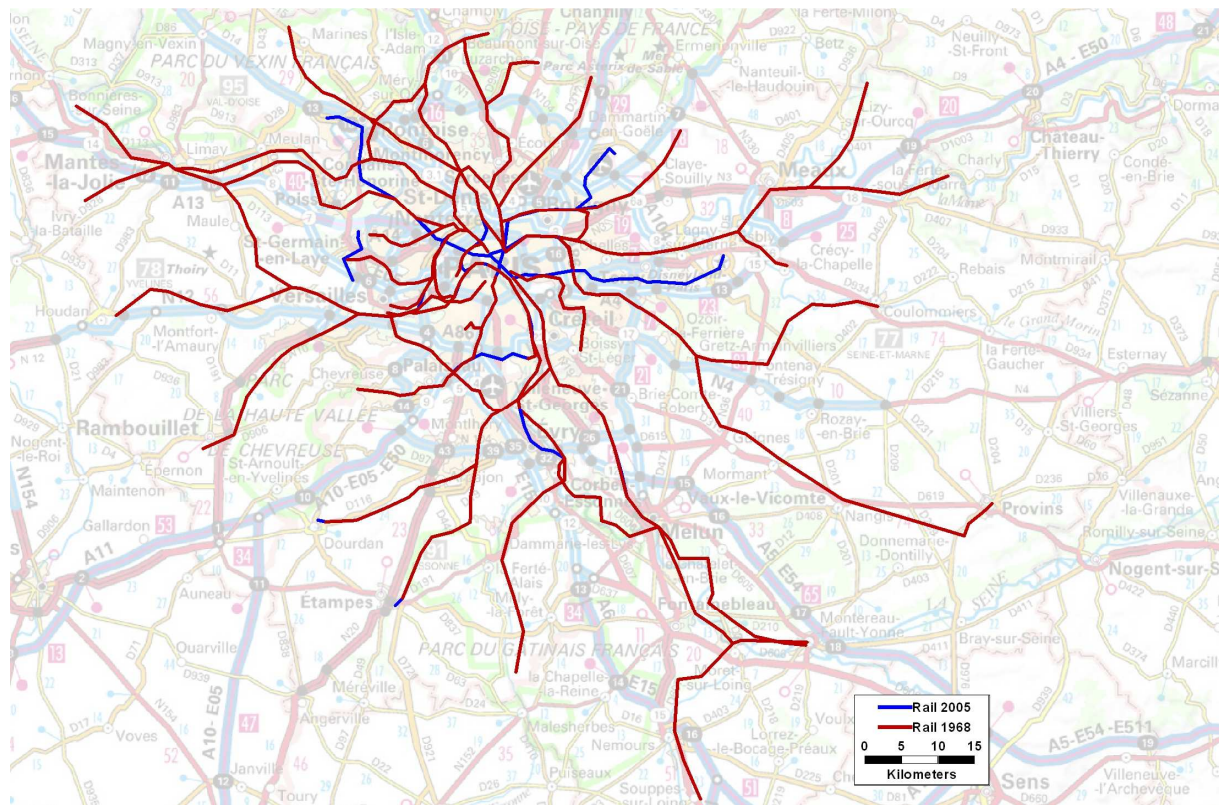
Déclarée d'utilité publique dès 1973, la ligne nouvelle vers Marne-la-Vallée est réalisée en plusieurs étapes, d'abord jusqu'à Noisy-le-Grand – Mont-d'Est puis rapidement jusqu'à Torcy en 1980. Toujours en 1973, la réalisation de la jonction Invalides – Orsay est décidée. Sa pertinence économique est prouvée par rapport aux projets de raccordements de la ligne de Sceaux à Orsay ou encore d'Austerlitz ou des Invalides vers la gare St-Lazare. Le nouveau service débute en 1979, et est étendu à partir de 1980 jusqu'à St-Quentin-en-Yvelines. Le RER C s'ajoute alors à ses deux prédécesseurs.

En 1983, l'interconnexion entre La ligne B et les trains SNCF partant de la gare du Nord est réalisée. En 1988, la ligne C s'agrandit avec l'intégration de la VMI (Vallée de Montmorency – Invalides)

jusqu'à Pontoise. Le dernier tronçon du RER A vers Marne-la-Vallée ne sera accéléré que sous l'initiative de Walt Disney d'installer son parc à proximité en 1992.

Afin de soulager les 3 premières lignes de RER rapidement saturées à l'intérieur de Paris, notamment la ligne A, il est prévu dès 1976 de réaliser une liaison nord – sud-est. La ligne D sera ouverte seulement en 1995 pour relier Orry-la-Ville à Meulun ou la Ferté-Alais. Dans cette même optique de désengorgement, le SACEM est mis en place en 1989 et permet de réduire l'intervalle de temps entre deux trains d'environ 2 minutes 30 secondes à 1 minute et 30 secondes.

La dernière ligne à compléter le réseau express régional est la ligne E. Son utilité est déclarée en observant le déséquilibre entre les zones de localisations des populations, à l'est, et les zones d'emploi prédominantes dans Paris et à l'ouest. Les voies sont prolongées entre la gare de l'est et la gare St-Lazare, terminus ouest de la ligne, et la mise en service, dans le courant de 1999, offre une desserte à l'est jusqu'à Tournan ou Chelles-Gournay.



En complément, vous trouverez en annexe le schéma actuel du réseau de trains de banlieue ainsi qu'un tableau récapitulatif des principales étapes de sa construction (Figure 45 : Réseau RER en 1976 (source : SNCF) Figure 46 : Réseau RER en 1983 (source : SNCF), Figure 47 : Réseau RER en 1991 (source : SNCF) Figure 48 : Réseau RER en 1999 (source : SNCF), Figure 49 : Tableau récapitulatif des principales étapes de construction du RER depuis 1968, Figure 50 : Schéma de l'état actuel du réseau de transiliens et de RER).

Il ressort de cette dernière carte et de la présentation précédente de l'évolution du métro que le réseau de transports en commun était déjà très développé en 1968 et que les principales améliorations ont consisté en une amélioration technologique du matériel roulant et des systèmes de contrôles. Cette

carte permet également de mettre en évidence la ligne A choisie pour notre étude puisqu'il s'agit de la ligne qui correspond au plus grand nombre de tronçons nouveaux.

3.4.4. Bus et Tramways, histoires de modes et de sites propres

La reconstruction d'après-guerre s'accompagne de la création de nouveaux quartiers d'habitations à forte concentration de populations, qui doivent être desservis par des transports efficaces, notamment des transports de proximités comme les bus. Durant cette période, la RATP crée 41 nouvelles lignes et procède à la modification de la quasi totalité des lignes existantes (environ 190 lignes) par des prolongements et des adaptations de tracés.

Malgré un effort de modernisation soutenu et l'adaptation du réseau en banlieue, le trafic voyageur des années 1961 à 1970 chute de façon constante. En dix ans, pour une augmentation de 11% du kilométrage de lignes, le trafic diminue de 38%.

En 1964, les premiers couloirs pour autobus sont mis en service, et sont installés à contresens peu après. Le développement de ce type de voies continue ensuite face au succès rencontré. Entre 1971 et 1980, le nombre de voyageurs augmente de 50%. Ceci est principalement dû à la détérioration des conditions de circulation dans Paris.

Les répercussions du lancement du RER en 1969 sont importantes sur le réseau d'autobus. Des terminus de rabattement sont mis en service sur la plupart des gares du RER (Joinville, Nogent, Champigny, Nanterre, ...).

La RATP continue son opération de modernisation de son parc. Différentes technologies de bus sont mises à l'essai. Les bus articulés font leur apparition dans les années 70 et offrent près de 150 places dans de bonnes conditions, ce qui permet une nette amélioration du service sur les lignes à fort trafic. Le système du libre-service est mis en place en même temps que la carte Orange, les usagers montant et descendant des voitures par toutes les portes : c'est une révolution dans les habitudes puisque l'usage de l'autobus est banalisé.

Dans les années 80, les premières lignes en site propre font leur apparition : la vitesse commerciale des autobus s'accroît d'une façon significative. En janvier 1989, la première opération « Autrement Bus » est lancée. Les trajets sont réadaptés aux nouvelles demandes. Les installations fixes, arrêts et terminus, sont entièrement reconstruites selon un nouveau modèle. La numérotation des lignes est simplifiée par la suppression des indices mixtes. Dans la foulée, un vaste programme de réseau circulaire autour de la capitale, dénommé « Orbitale », est approuvé. Ce projet prévoit la mise en service de lignes de rocades destinées à faciliter les liaisons inter banlieue. Le tramway fait alors son retour à Paris en juin 1992, entièrement en site propre, ce qui permet un gain de temps de 50 % par rapport aux bus exploitant la ligne précédemment.

Enfin, en 1996, l'ancienne ligne SNCF de Puteaux à Issy-Plaine est entièrement remise à niveau, prolongée à La Défense, et équipée d'un matériel de type tramway.

3.4.5. Ordres de grandeurs et statistiques

En plus de prendre connaissance de l'évolution historique du réseau, l'évolution de certaines valeurs permet de représenter les tendances globales observées sur la période étudiée.

3.4.5.1. Evolution du coût de la carte Orange

Lors de la présentation du développement historique de chaque mode, nous avons observé l'importance de la mise en place de la carte Orange devenue aujourd'hui le passe Navigo. Il est intéressant de montrer l'évolution en valeur courante puis en valeur constante du prix de l'abonnement pour les zones 1-2 :

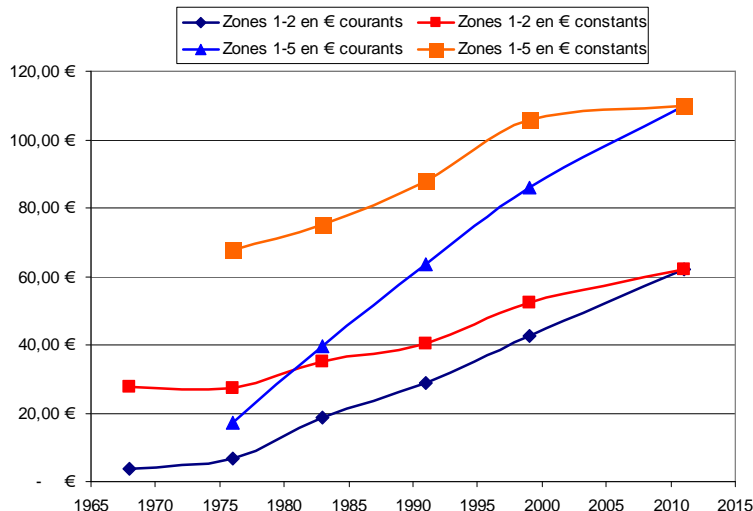


Figure 22 : Evolution du prix mensuel de la carte orange pour les zones 1-2 et 1-5 (source : RATP)

Nous remarquons une augmentation du coût de l'abonnement mensuel pour les zones 1-2 en valeur constante de 125 % en 40 ans (multiplication par 17 en valeur courante). Sur la période étudiée et toujours pour les zones 1-2, le coût d'une carte orange a doublé en valeur constante. Mais si le prix courant de la carte pour les deux zones centrales a augmenté en moyenne avec une valeur double de celle de l'inflation, soit environ 4 %, ce n'est pas le cas pour les cartes vers des zones périphériques comme 1-5. L'augmentation du prix des cartes vers les zones éloignées a suivi l'inflation. Ce phénomène représente le financement par les classes aisées des zones centrales de la suppression successive des zones les plus éloignées (6, 7 et 8) regroupées dans la zone 5 sans que le prix de la carte n'augmente en conséquence.

3.4.5.2. Longueur des lignes de bus et fréquentation

Au niveau des bus nous observons, grâce au graphe suivant, que malgré le doublement du kilométrage de voies le nombre de voyageurs transportés en 2000 est égal à la quantité transportée en 1960.

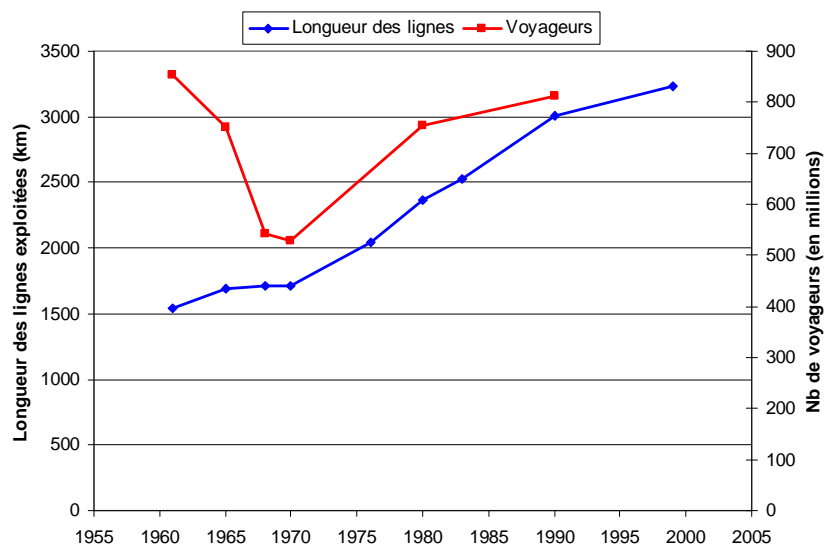


Figure 23 : Evolution de la longueur des lignes de bus et du nombre de voyageurs (source : RATP)

Ce résultat s'explique de plusieurs manières. Premièrement, la fréquentation des bus a fortement chuté jusqu'à la fin de années 70 et l'augmentation de l'usage privée de l'automobile. Ensuite, la longueur des lignes a fortement augmenté suite à l'étalement vers les banlieues : les distances parcourues sont nécessairement plus importantes sans pour autant que les lignes soient plus fréquentées. Nous retrouvons ici le principe de Poulit présenté avant qui précise qu'une amélioration des conditions de transport à coût équivalent ne pousse pas l'utilisateur à se contenter de cette amélioration mais plutôt à reverser ce gain vers un autre paramètre, notamment le confort domestique accessible en banlieue.

3.4.5.3. Fréquence et vitesse commerciale dans le métro

Le graphique suivant montre l'évolution de la vitesse commerciale moyenne dans le métro ainsi que le nombre de véhicules à l'heure de pointe.

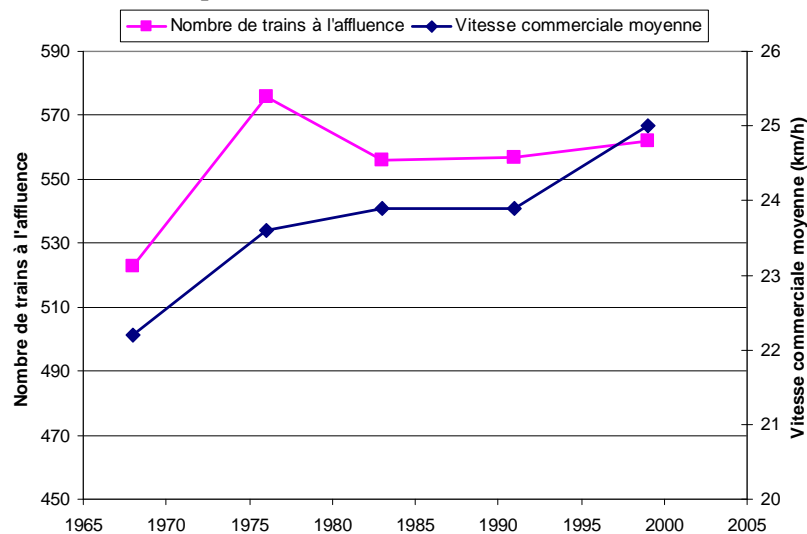


Figure 24 : Evolution du nombre de trains à l'affluence et de la vitesse commerciale moyenne dans le métro parisien (source : RATP)

L'amélioration observée est relativement faible lorsque l'on connaît l'évolution technologique qui s'est opérée avec l'arrivée de l'informatique durant ces 30 années. Ceci s'interprète par le fait que les lignes étaient déjà exploitées avec une fréquence proche de la saturation. La valeur des intervalles en heure de pointe en 1968, comme l'atteste la Figure 41 : Extrait des statistiques annuelles de la RATP de 1968 (source : RATP) en annexe, était déjà faible et difficilement améliorable. L'arrivée de la ligne 14 avec des distances entre les stations deux fois plus importantes et une vitesse nettement supérieure (41,8 km/h) a un impact significatif sur la moyenne observée. Les projets actuels d'automatisation des lignes vont permettre une amélioration plus sensible de ces intervalles.

Au niveau des RER, l'évolution des fréquences est beaucoup plus marquée entre un fonctionnement en train de banlieue et l'interconnexion entraînant des flux massifs de, vers et entre les banlieues. Nous remarquons ce phénomène essentiellement au niveau du RER A dont le nombre de trains à l'affluence a triplé depuis son lancement alors que la longueur de ces voies a été moins que doublée. Quant à la vitesse commerciale, de même que pour le métro, nous observons une amélioration de 10 % très probablement induite par les nouvelles technologies de gestion du trafic et des intervalles entre les trains (le SACEM notamment).

4. Analyse de l'impact du RER A

Maintenant que nous avons décrit l'évolution du réseau de transport francilien, nous présentons un certain nombre de constatations et de mécanismes observés au travers de différentes bases de données, et que l'on veut voir restitués par le modèle Pirandello. Il ne s'agit donc pas à proprement parler d'une étude de l'urbanisme francilien, mais de la mise en évidence de mécanismes généraux, souvent bien connus, étudiés et illustrés ici sur la région Ile-de-France, mais qui pourraient être retrouvés dans toutes les grandes villes de France, et plus généralement dans toutes les grandes métropoles.

4.1. Réalisme des résultats obtenus

Par soucis d'efficacité, nous nous sommes restreints à l'analyse des estimations de croissance de population et d'emplois. Le modèle permet pourtant d'obtenir de nombreuses autres données mais nous ne pouvions pas présenter leur intégralité dans cette étude. Le choix a été fait de se concentrer sur ces variables considérées comme les plus représentatives.

4.1.1. Calage synchronique

Le calage sur les caractéristiques et données de la période de référence permet de définir de nombreux paramètres et constantes nécessaires au fonctionnement du modèle. Ce calibrage initial est nécessaire à tous les modèles et, comme nous l'avons déjà indiqué, varie entre les villes. Le graphique suivant montre le calage quasi-parfait de Pirandello sur les données de l'année 1999 :

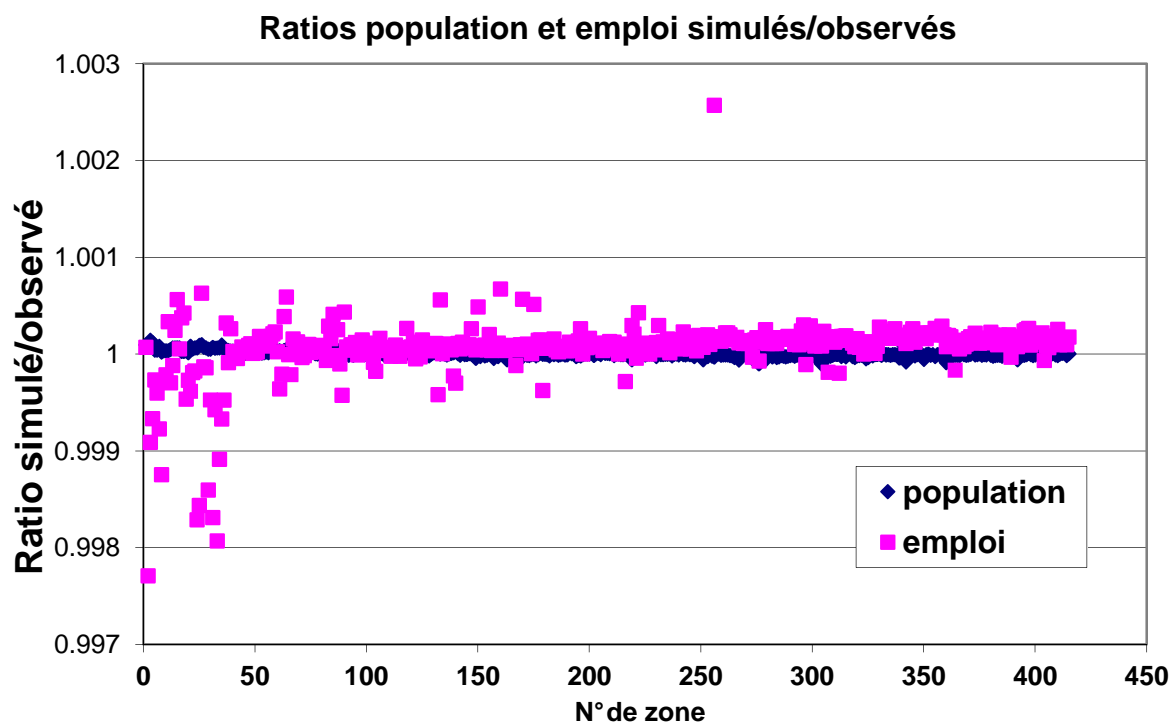


Figure 25 : Graphique des ratios entre simulé et observé pour les populations et emplois

Les paramètres sont ajustés le plus souvent par gradient pour atteindre la situation d'équilibre observée. Les modèles développés actuellement parviennent toujours à effectuer ce calage et il reste celui à réaliser en priorité. Cependant, le calage suivant sur une période de prévision permet de valider les capacités prévisionnelles du modèle.

4.1.2. Calage diachronique

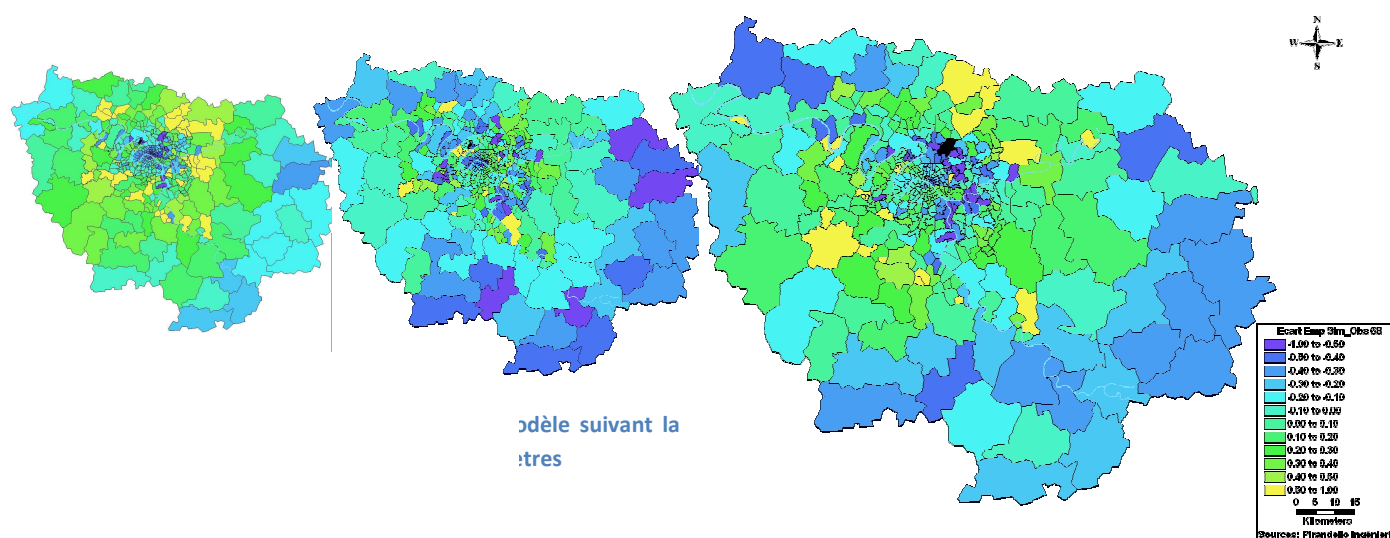
4.1.2.1. Des simulations progressives

Avant de se lancer dans la description des résultats du second calage, il convient de faire un rappel important pour éviter toute confusion dans l'interprétation des résultats. Les simulations sont effectuées à partir de la situation de référence vers la période à estimer. Dans notre cas, nous sommes orientés vers le passé, c'est-à-dire que nous nous plaçons dans la situation de 1999 pour simuler les années 1991, 1983, 1976 et 1968. Les croissances indiquées sont donc le plus souvent des décroissances correspondant à la diminution de la population et des emplois lorsque l'on remonte dans le temps. Nous nous trouverons parfois dans le cas de croissance positive entre les deux scénarios, ce qui signifie que la variable a diminué depuis l'année étudiée jusqu'à 1999.

Il était important de faire cette précision pour éviter toute mauvaise interprétation des résultats.

Au niveau des simulations, la flexibilité de Pirandello lui permet de faire varier les paramètres indépendamment. Ainsi, nous avons décidé de prendre en compte les évolutions de la précision du modèle selon 3 variables introduites progressivement : les surfaces, puis la valeur du temps et enfin le réseau de transport tel que nous l'avons construit.

Voici un exemple de l'amélioration observée grâce aux calages successifs :



Nous remarquons que la situation s'améliore progressivement pour ces simulations de la croissance entre 1999 et 1968. Ceci est retranscrit par une diminution des zones noires, correspondant aux écarts les plus importants, et une augmentation des zones de couleur bleu clair.

Ce tableau permet d'observer l'évolution de la précision :

Scénario	Hypothèses	Précision	Ratio	
			Populations	Emplois
Sc7	surfaces constantes et réseau de transport actuel	40 %	0.583	0.651
Sc82	Réseau de transport actuel	54 %	0.699	0.740
Sc90	Toutes les évolutions sont prises en compte	66%	0.768	0.755

Figure 27 : Evolution du pourcentage de données avec une précision de 20 % en fonction du scénario utilisé pour simuler l'année 1968

La valeur du r^2 , indicateur très utilisé pour évaluer la précision du modèle, est calculée à partir de la valeur de l'écart-type et tend à se rapprocher de 1 quand le modèle améliore ses estimations.

4.1.2.2. Localisation des populations

Pour présenter les capacités de Pirandello, il est nécessaire de comprendre l'évolution réellement observée. Voici la carte de la croissance de population réelle entre 1999 et 1968 (ne pas oublier le sens rétrospectif de la simulation) :

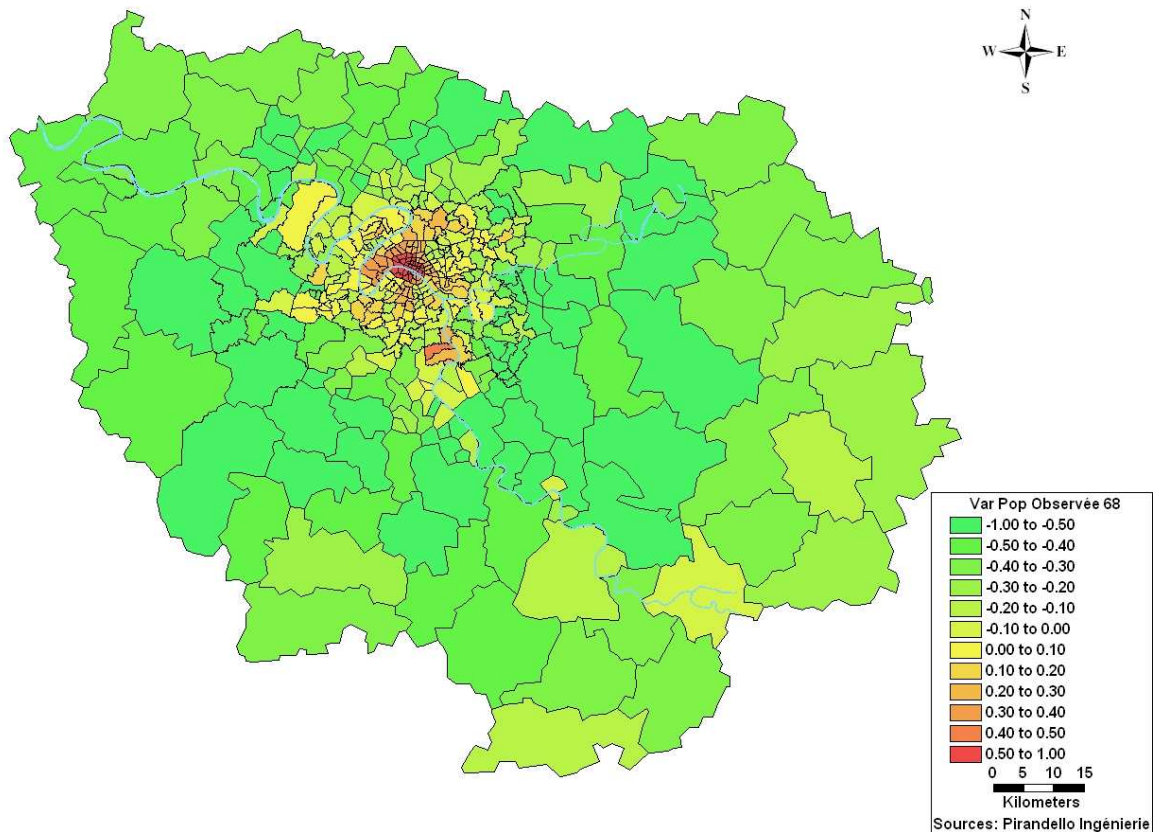


Figure 28 : Croissance observée de la population entre 1999 et 1968 (source : Insee)

Le phénomène majeur qui ressort de cette carte est l'étalement du centre de Paris vers la banlieue. Paris intra-muros se dédensifie fortement avec une baisse moyenne de près de 50 %. Ceci est dû à l'essor du véhicule individuel et des transports en commun de banlieue depuis cette période. Nous retrouvons ici un des principes de la ville monocentrique qui décrit le comportement des individus comme recherchant la maximisation de leur bien-être. Dans ce cas, les populations tendent à se localiser dans les zones représentant le meilleur compromis entre coûts généralisés du transport et confort domestique, soit dans les zones de banlieue intermédiaire. Cette zone intermédiaire est clairement définie par la présence des autoroutes autour de Paris et des pénétrantes, à petite échelle avec l'A86 et de manière plus éloignée avec la Francilienne.

Pirandello intègre les différents effets observés dans sa recherche de l'équilibre urbain. Dans les simulations, nous remarquons néanmoins que le modèle sous-estime ces effets. Voici la carte représentant la variation entre la croissance simulée et la croissance observée :

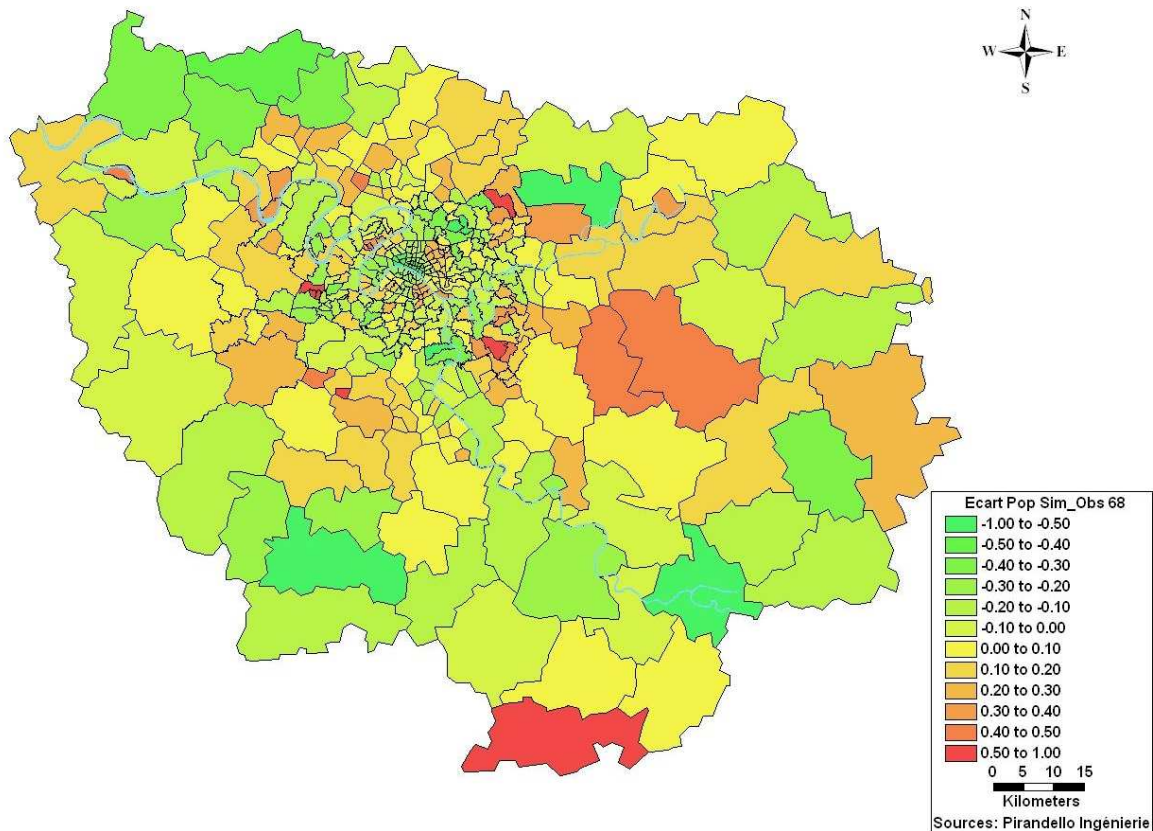


Figure 29 : Ecart entre la croissance de population estimée et observée pour la période de 1999 à 1968

Le centre de Paris et la banlieue éloignée restent plus peuplée que dans la réalité, et le phénomène inverse est observé en banlieue proche. Néanmoins, le modèle permet de représenter les variations observées d'un grand nombre de zones, 299 sur 415, avec une erreur de croissance inférieure à 20 %.

Les petites zones rouges qui correspondent à une sous-estimation de la croissance entre 1968 et 1999 correspondent pour la plupart à des villes nouvelles. Ce type d'évolution est en fait le résultat d'une décision publique volontariste et pas des lois usuelles d'évolution prises en compte par Pirandello.

4.1.2.3. Localisation des emplois

Le même raisonnement s'applique à la croissance des emplois. Nous commençons à nouveau par présenter la croissance de 1999 à 1968 :

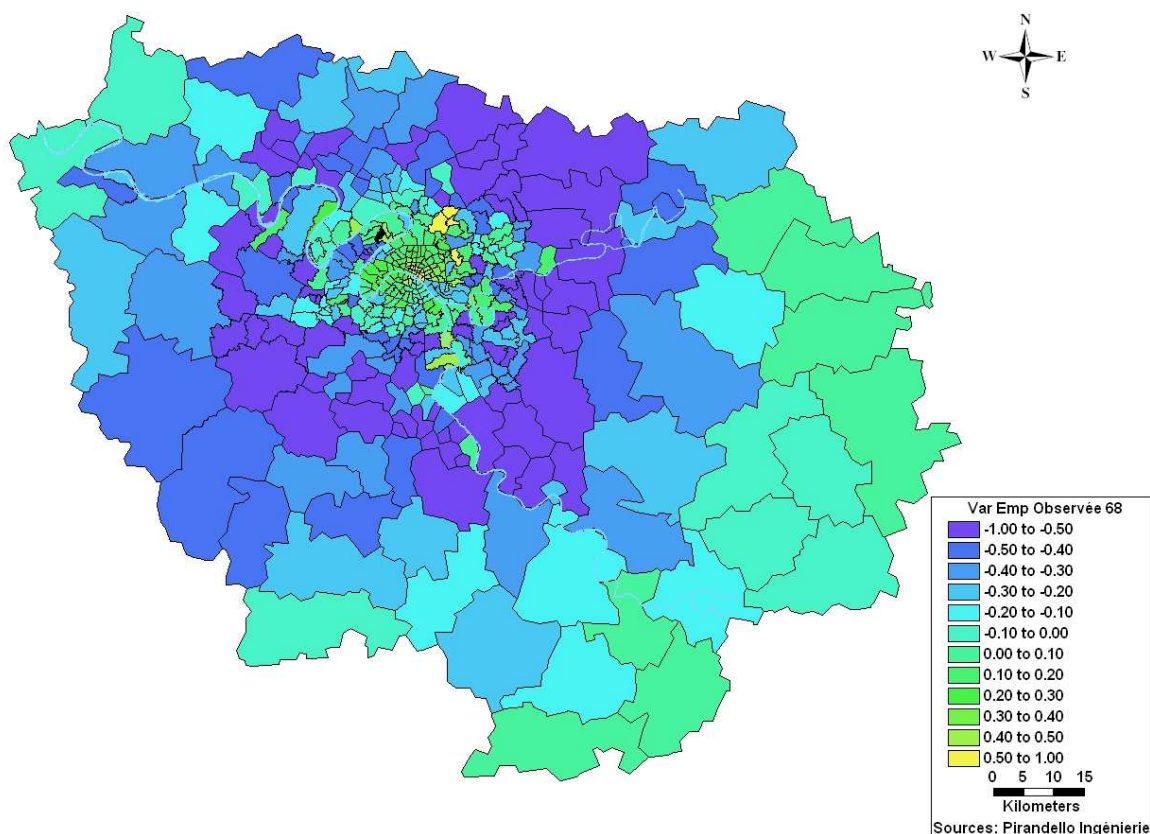


Figure 30 : Croissance observée des emplois de 1999 à 1968 (source : Insee)

Nous remarquons l'explosion du nombre d'emplois en banlieue proche, avec un nombre qui a plus que doublé de 1968 à notre situation de référence. La situation a peu évolué en banlieue éloignée, phénomène essentiellement expliqué par la présence d'exploitations agricoles. Nous observons à nouveau un phénomène de dédensification du cœur de Paris, avec notamment la création du centre international d'affaires de la Défense (point noir sur la carte correspondant à une croissance hors limites de la légende).

Les estimations du modèle sont plus approximatives que dans le cas de la population :

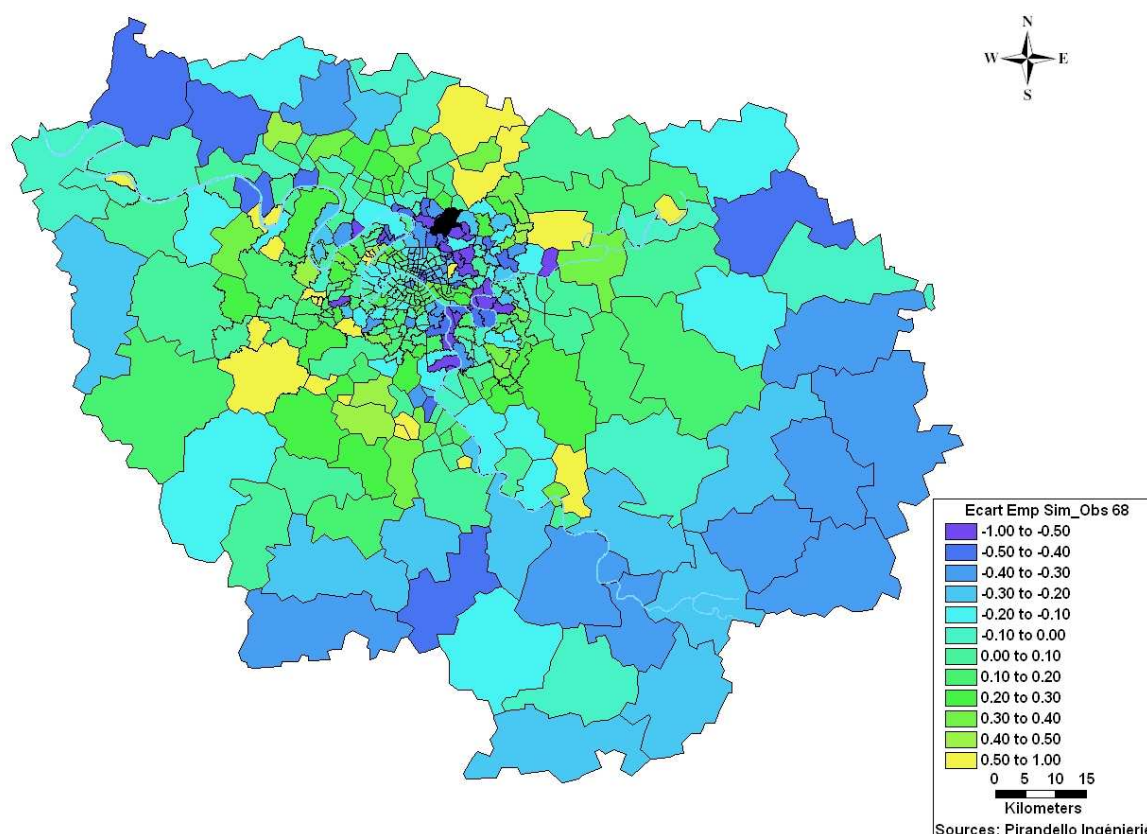


Figure 31 : Ecart entre la croissance des emplois estimée et observée pour la période de 1999 à 1968

Le modèle prédit la stagnation des emplois en périphérie de l'Ile-de-France. Cependant, il n'anticipe pas la croissance en banlieue proche, notamment au nord-ouest de Paris où le nombre d'emplois a chuté depuis 1968.

4.1.3. Validation du modèle : intervalles de confiance et champs d'application

Nous avons déjà cité l'exemple de l'année 1968 qui prouve les capacités du modèle à estimer un horizon de 30 ans avec une précision de 20 % pour plus de 66 % de ces données. Voici un tableau représentant par années le pourcentage de résultats obtenus avec une marge de 20 % :

	Populations	Emplois
1968	66 %	49 %
1976	77 %	57 %
1983	91 %	60 %
1991	96 %	73 %

Figure 32 : Tableau du pourcentage des estimations obtenues à 20 % de la situation de référence et du r^2 global

Ce tableau met en avant les bonnes performances du modèle pour évaluer le passé, sa précision diminuant quand l'horizon devient plus lointain. Nous remarquons qu'il souffre encore d'un manque de précision au niveau de la simulation des emplois. Ceci est du entre autres à la difficulté d'anticiper par des paramètres les décisions de politique publique comme la création du quartier de la Défense.

Au niveau des populations, le modèle améliore très significativement sa précision entre 1976 et 1983. Ceci est du essentiellement aux changements sociologiques observé à cette époque, notamment

l'augmentation du désir de surface habitable par individu. Ces paramètres sont pris en compte par Pirandello et cela permet de réduire leur impact sur les résultats sans pour autant effacer totalement l'erreur induite.

4.2. Simulation sans RER A

Une fois présentée la précision du modèle et légitimé ses capacités prédictives pour un horizon donné, nous pouvons l'appliquer pour représenter la situation de 1999 sans RER A. Nous allons ainsi présenter la variation entre les résultats obtenus par simulation de l'année 1999 en y enlevant le RER A à et la situation de référence simulée.

4.2.1. Hypothèses de suppression du RER A et estimation de l'évolution technologique

En plus des hypothèses déjà utilisées pour la rétropolation, nous devons faire des choix pour modéliser l'« absence » de RER A. Par soucis de vraisemblance, nous avons choisi de conserver les améliorations technologiques observées et qui, en l'absence d'investissements pour la création de lignes nouvelles, auraient tout de même été mis en place sur les lignes préexistantes. Ceci est appliqué aux lignes existant avant 1968, c'est-à-dire les lignes de Vincennes et de St-Germain-en-Laye. La ligne qui relie Maison-Laffite à Cergy est une particularité puisqu'elle a été construite à partir de 1977, intégrée au RER A en 1988 et toujours exploitée simultanément par les RER et les transiliens. Nous avons donc choisi de ne pas la supprimer et d'augmenter la fréquence de ces trains entre St-Lazare et Cergy.

Les fréquences sur les tronçons préexistants entre Bastille et Boissy – St-Léger ont donc été prises à l'identique de ceux du tronçon Nation – Boissy-St-Léger. La desserte de la défense n'est donc plus effectuée que par la ligne 1 et les lignes de la gare St-Lazare. Le tronçon entre Nanterre Université et St-Germain-en-Laye a été réintégré à la ligne de St-Lazare qui existe toujours mais dont nous avons augmenté la fréquence pour correspondre à l'offre actuelle.

La ligne ainsi codée, les impacts observés ne seront pas une conséquence de l'évolution technologique mais uniquement l'effet de l'absence de jonction directe entre est et ouest ainsi que l'absence directe de lignes de transport de masse au cœur de Paris et entre Vincennes et Marne-la-Vallée.

4.2.2. Etudes statistiques et ordres de grandeurs

L'étude du réalisme des résultats obtenus a mis en évidence la croissance de la population et des emplois en banlieue proche où les réseaux, routiers et de transport en commun, se sont développés ou améliorés entre 1968 et 1999. Nous allons voir quel a été l'impact du développement du RER A sur ces localisations.

4.2.2.1. Simulation des déplacements

Nous avons réalisé une simulation sous AELH pour l'année 1999 afin de mieux connaître la situation des déplacements des franciliens. Le tableau suivant regroupe les déplacements entre les trois zones que sont Paris, la petite couronne et la grande :

	Paris	Petite couronne	Grande couronne
Paris	6 009 790 (19%)	3 537 860 (10%)	1 454 218 (4%)
Petite couronne		8 725 212 (26%)	2 206 228 (7%)
Grande couronne			11 965 753 (35%)

Figure 33 : Tableau des déplacements simulés sous AELH entre Paris et sa banlieue en 1999

Ces résultats sont quasi-identiques à ceux présentés par l'EGT de 2001. L'étude étant portée sur l'impact du RER A, nous avons ensuite cherché à observer les déplacements dans les zones directement concernées. La figure suivante représente les déplacements entre les départements franciliens traversés par le RER :

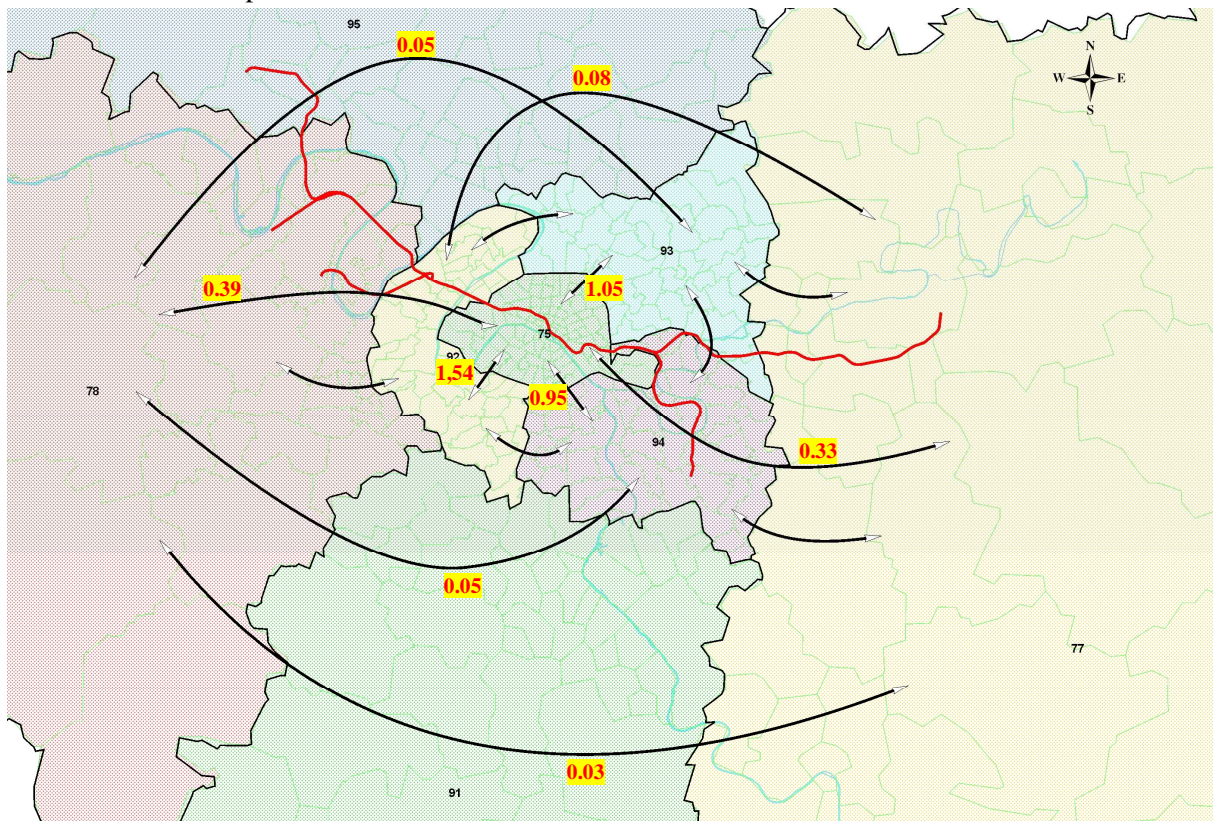


Figure 34 : Déplacements par jour simulés sous AELH entre les départements d'Ile-de-France (en millions)

Cette carte révèle le fait que grande quantité des déplacements de grande couronne à grande couronne est essentiellement due à la population importante qui s'y trouve et qui se déplace à l'intérieur des zones plus qu'à de réels flux interdépartementaux. Ceci s'observe avec la faible valeur des déplacements entre les Yvelines (78) et la Seine-et-Marne (77). En revanche, cette carte reflète bien l'importance des flux entre Paris et sa petite couronne, ainsi qu'entre les départements de cette même couronne.

4.2.2.2. Réévaluation de l'accessibilité

Afin de comprendre les phénomènes observés auprès des populations et des emplois, il est important de commencer par présenter son impact sur l'accessibilité. Comme nous l'avons montré dans la partie théorique, le modèle est basé sur la théorie de l'accessibilité développée par Koenig et Poulit.

Lorsque l'on supprime le RER A avec les hypothèses présentées précédemment, nous observons la variation suivante de l'accessibilité :

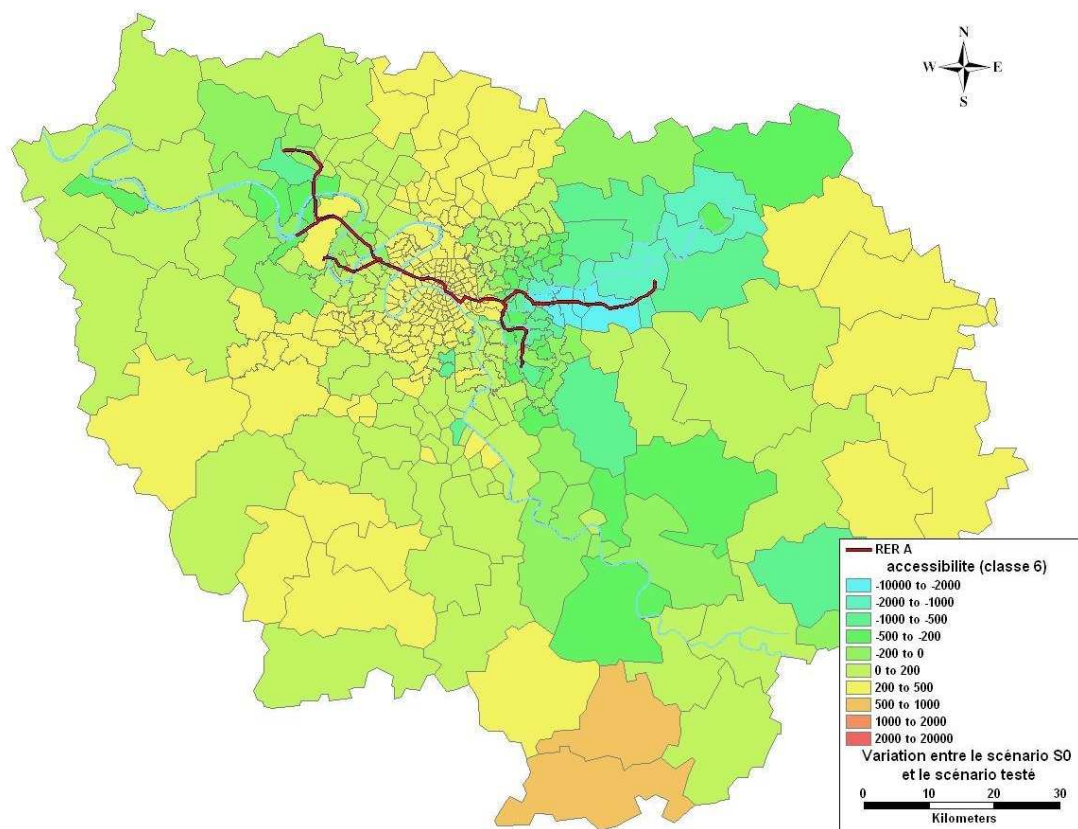


Figure 35 : Variation de l'accessibilité simulée sans RER A par rapport à la situation de référence de 1999

Les variations sont significatives aux abords du tracé du RER A. Nous remarquons que la baisse d'accessibilité engendrée a des répercussions très fortes sur des territoires éloignés, notamment nord-ouest et sud-ouest de la région. Ces zones sous influence sont directement liées à l'infrastructure supprimée par des voies rapides (l'A5 au sud-ouest notamment) qui créent des « couloirs d'accessibilité forte ».

4.2.2.3. Evolution des prix de l'immobilier

Les phénomènes s'imbriquent dans l'aménagement urbain et nous pouvons prévoir la baisse des prix de l'immobilier dans les zones où la chute d'accessibilité est la plus forte :

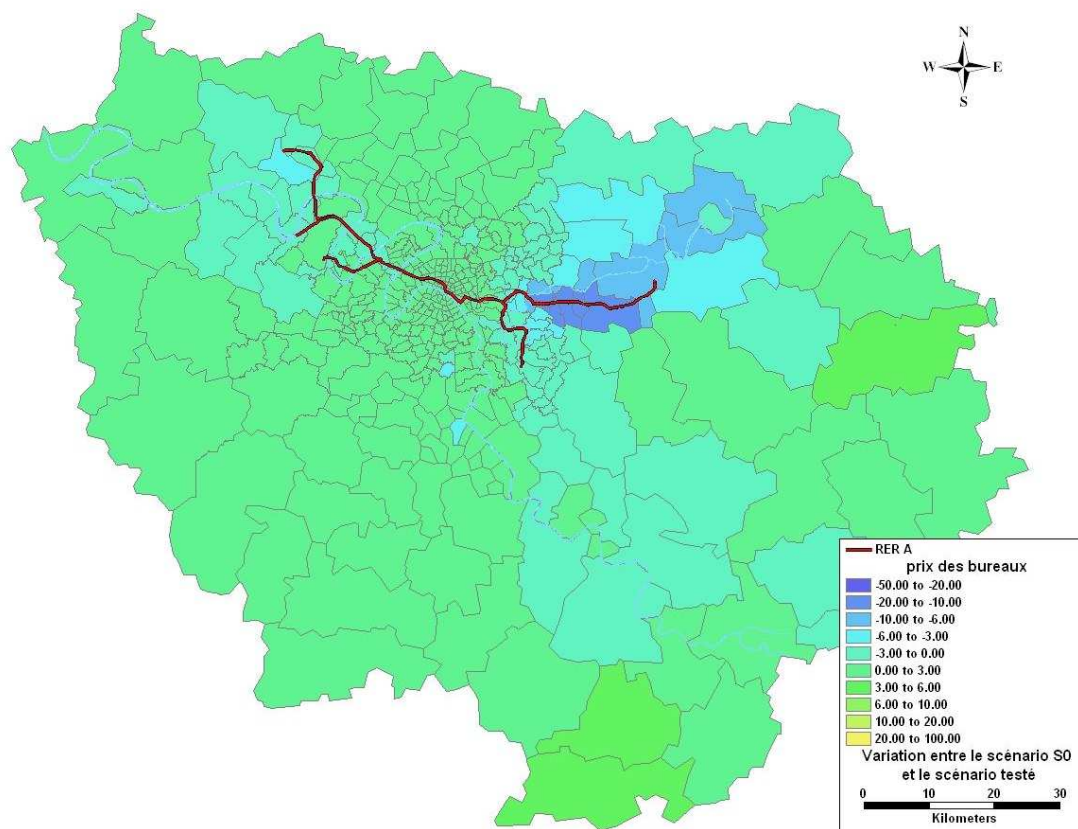


Figure 36 : Variation du prix des bureaux simulée sans RER A par rapport à la situation de référence de 1999

Les variations observées sont très proches pour le prix des habitations. Nous remarquons à nouveau les couloirs de rabattement des voies rapides vers le RER qui sont fortement dévalués.

4.2.2.4. Effets sur les emplois

Dans la logique du mécanisme, l'offre est supprimée ou réduite, l'accessibilité diminue en conséquence et les prix de l'immobilier sont réévalués en conséquence. Viennent ensuite les entreprises qui décident de leur localisation pour optimiser leur productivité. La localisation des ménages est dépendante de tous les paramètres précédents.

L'impact sur la localisation des emplois est beaucoup plus localisé que les variations observées précédemment :

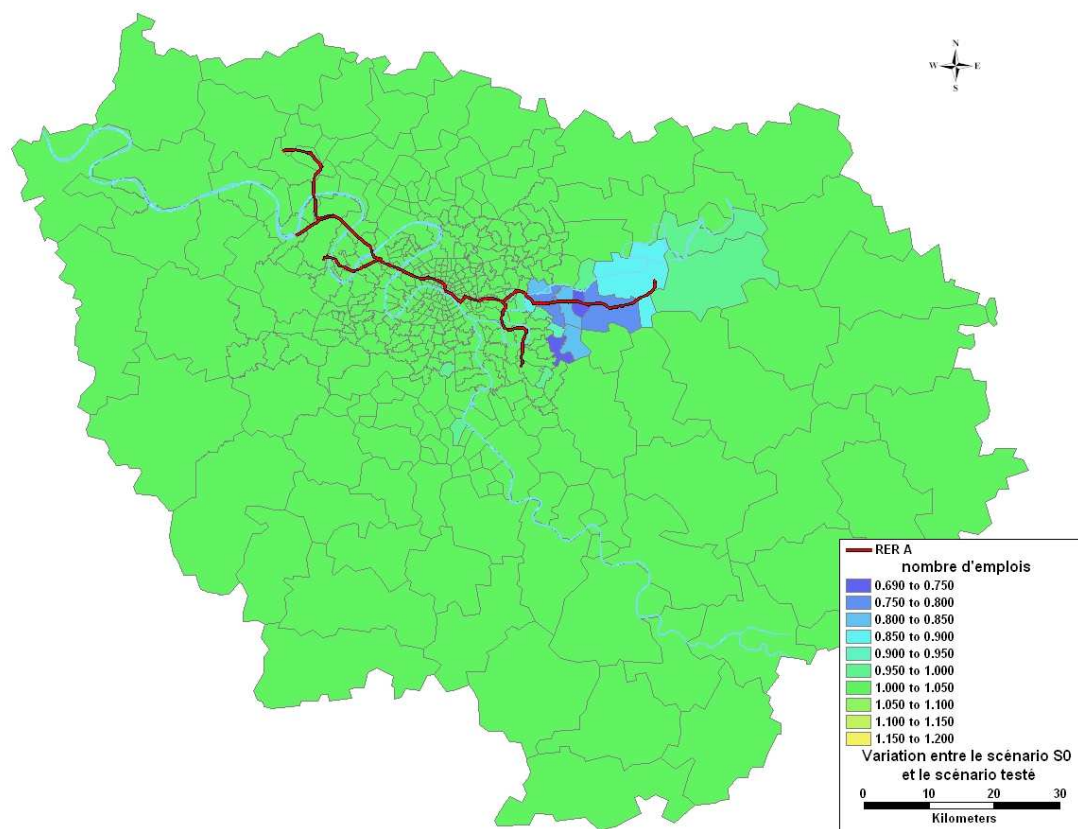


Figure 37 : Rapport des emplois par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999

Nous remarquons que seule la zone correspondant à la branche nord-est du RER A actuel est impactée significativement, avec des variations observées entre 20 et 30 %. La baisse d'accessibilité entraîne une réaction en chaîne dans la dévalorisation de la zone est de Paris.

4.2.2.1. Effets sur la population

A priori, la localisation des ménages devrait être directement impactée par cette modification de l'accessibilité, du prix de l'immobilier et de la disparition des emplois à l'est. Cependant, la carte suivante ne signale pas d'évolution significative :

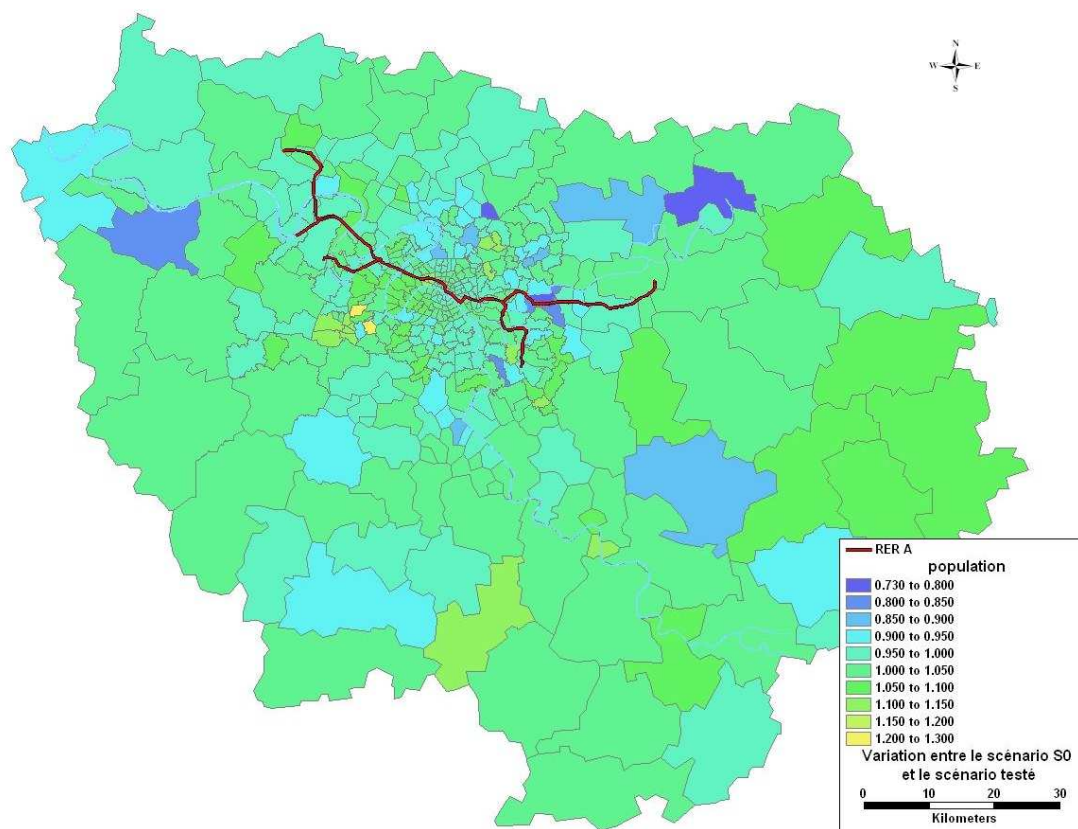


Figure 38 : Rapport de population par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999

Nous remarquons deux zones intéressantes autour du RER A avec une augmentation de la population à l'ouest de Paris vers le Vésinet et St-Germain et une décroissance à l'est autour de Noisy-le-Grand. Cependant, les variations observées ne sont pas celles auxquelles nous pourrions nous attendre.

Nous avons voulu approfondir ce faible impact sur les populations en les divisant en deux parties, les classes à haut revenus et celles à revenus faibles. Les résultats obtenus sont alors beaucoup plus intéressants :

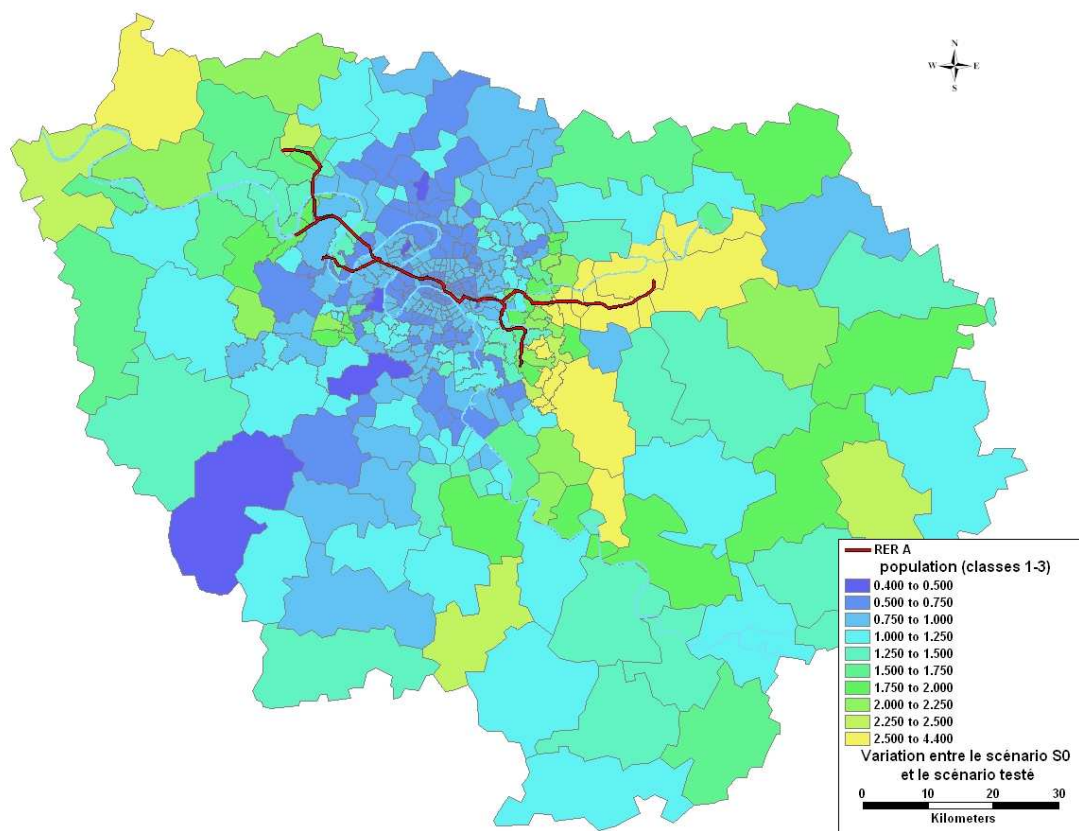


Figure 39 : Rapport de population à faibles revenus par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999

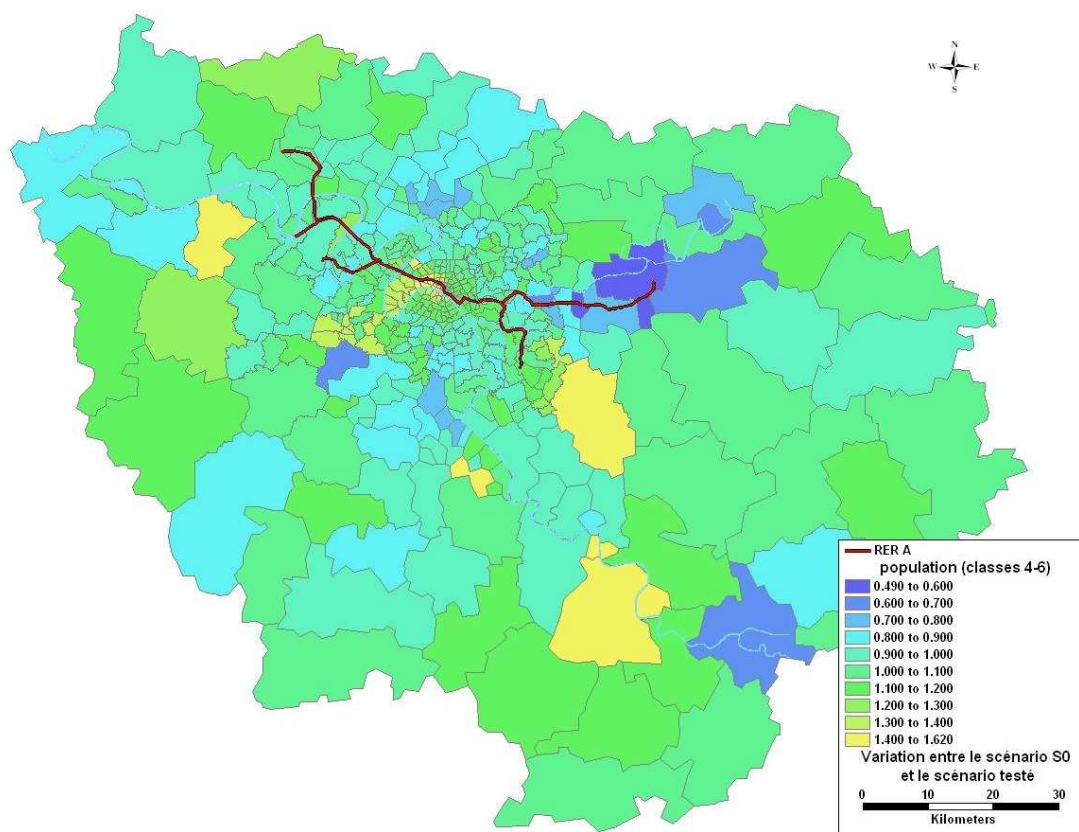


Figure 40 : Rapport de population à hauts revenus par zones entre les situations simulés sans et avec RER A en 1999

D'après la carte de variation globale de la localisation des populations, nous comprenons que les deux cartes ci-dessus sont complémentaires.

La variation la plus importante est observée à l'est, sur la zone allant de Vincennes jusqu'à Marne-la-Vallée. Nous rappelons que la ligne du RER A le long de cette zone a été intégralement construite. Il est donc logique que les effets les plus importants soient situés dans cette zone. Nous remarquons ainsi qu'en l'absence de RER, les populations à faible revenu se localisent dans cette zone puisque leur quantité y est en moyenne triplée. Le phénomène inverse est observé chez les ménages à hauts revenus qui désertent quasiment de moitié ces zones ayant fortement perdu en accessibilité. Nous rappelons ici que ce phénomène est explicable par la diminution d'accessibilité observée et par la diminution du prix de l'immobilier et du nombre d'emplois que cela engendre.

Dans le centre de Paris, les effets sont également très importants, principalement à l'ouest, qui gagne en valeur grâce à sa proximité avec les centres d'affaires. Cette analyse peut-être étendue à l'ouest proche de Paris où les populations aisées et à fort taux de motorisation sont concentrées. Les cartes montrent que l'absence des connexions du RER A avec le centre de Paris amplifie ce phénomène.

Les cartes montrent également la sensibilité plus importante des populations à faibles revenus aux changements des facteurs économiques. Nous remarquons en illustration de ce phénomène le flux massif observé du couloir central (en bleu) vers la zone est (en jaune) de l'Ile-de-France.

4.2.2.2. *RER A : Accélérateur de développement ?*

L'intérêt de Pirandello, est c'est le but de nombreux modèles LUTI, est de présenter les gains répercutés par la modification des conditions d'équilibre urbain. Nous avons montré l'impact sur le prix de l'immobilier qui s'interprète facilement comme une valorisation des immobilisations foncières. Les gains en accessibilité sont quant à eux répercutés dans les gains de temps, l'amélioration du bien-être et le gain en productivité pour les entreprises. Le modèle ne mesure pas l'évolution des recettes ou les données du même types qui au final sont des valeurs plus faibles que les gains structurels.

L'affectation réalisée par AELH a permis d'estimer le gain de temps global sur l'Ile-de-France à 1,5 milliards d'€. Ce chiffre déjà important est souvent celui où s'arrêtent des études plus simples, or notre modèle estime qu'il ne s'agit que du quart des gains dans leur ensemble. En intégrant la variation de tout les paramètres, Pirandello estime le gain en PIB régional à environ 6,9 milliards d'€ (toujours pour 1999). Sachant que le PIB de cette même année était d'approximativement 400 milliards d'€, *cela équivaut à un impact de 1,8 %.*

Nous nous intéressons ici à la richesse générée, aux avantages et bénéfices tirés du projet (productivité, foncier,...), par rapport à ce que sont les investissements initiaux et les coûts d'exploitation. Il s'agit de cette manière d'un bilan sur les effets structurants de l'infrastructure qui sont au final très supérieurs aux effets directs habituellement pris en considération. Cette approche légitime la démarche de simulation de l'équilibre urbain engagée par Pirandello.

Conclusion

L'approche en trois parties de cette étude a permis de faire ressortir successivement les points clés de la modélisation urbaine. Face au foisonnement de modèles sans qu'aucun ne fasse référence dans le milieu, nous avons décrit les choix principaux effectués par Pirandello de par son objectif initial : fournir aux décideurs un outil simple, fiable et compréhensible. Nous avons également compris que pour être utilisé, un modèle doit d'abord être ajusté et montrer ses performances prédictives : le calage synchronique collant parfaitement à la réalité, le calage diachronique a permis de montrer cette capacité. Les recherches historiques ont apporté des améliorations significatives à ces résultats. Le modèle procède actuellement à de nouvelles améliorations qui lui permettront d'augmenter la précision de ses prévisions à venir.

Quant à l'estimation de l'impact du RER A, les effets modélisés révèlent effectivement les mécanismes qui se mettent en place lors de la modification de l'équilibre urbain. A l'aide de l'approche systémique intégrée, nous avons pu mettre en évidence le lien direct entre les différents indicateurs. En effet, la chute d'accessibilité, son impact sur le foncier, lui-même déterminant pour la localisation des emplois, lesquels servent de critères de localisation pour les populations. Les cartes présentées dans cette étude vont dans le sens de cette interconnexion entre les différents paramètres. La comparaison économique sur la base d'un bilan coûts / avantages simplifié aura permis de distinguer les effets directs et indirects, qui, à la lumière de ces simulations, sont prépondérants. Il s'agit d'un nouvel éclairage des utilités des investissements publics, notamment dans le domaine des transports.

Sources

Pour exemple : Lambert, J.L. 1987. L'évolution des modèles de consommation alimentaire en France. Paris : Lavoisier. 140 p.

Archives

- Archives, documentation et patrimoine historique et culturel de la RATP ;
- Cartes, horaires et fréquences des lignes de métro et RER A et B exploités par la RATP ;
- Rapports annuels d'exploitation ;
- Archives historiques de la SNCF ;
- Bibliothèque Nationale de France, Richelieu section « Cartes et plans » ;
- IGN.

Documents

- BRETEAU V., 2011, *Manifestations spatiales de la congestion et localisation des emplois et des ménages*, thèse de doctorat de l'université Paris-Est, 356 pages ;
- DELONS J., 2009, *Modèle d'équilibre général urbain v11*, Cofiroute, document interne, 145 pages.
- DEYMIER G., NICOLAS J.P., 2005, *Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD*, Laboratoire d'Economie des Transports, Rapport pour la DRAST (Ministère de l'Équipement) et l'ADEME, 49 pages ;
- Direction Régionale de l'Équipement d'Ile-de-France, 2004, *Les déplacements des Franciliens en 2001-2002 : Enquête Globale de Transport*, plan de déplacements urbains, 43 pages ;
- HOMOCIANU G.M., 2009, *Modélisation de l'interaction transport-urbanisme-choix résidentiels des ménages dans l'aire urbaine de Lyon*, thèse de doctorat de l'université Lyon 2, 311 pages ;
- Li S., 2011, *Coûts de transport en commun pour l'application numérique dans le modèle monocentrique*, LVMT, 13 pages ;
- Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer, direction des Affaires économiques et internationales, service Economie, Statistiques et Prospective, *Economie urbaine : Rassemblement de la connaissance, chapitre 1 : synthèses*, 35 pages ;
- WEGENER M., *Overview of land-use transport models*, 19 pages.

Sites Internet

- Busiloé : <http://www.busiloe.fr/>
 - Evolution des lignes de bus dans paris intra-muros et en banlieue proche (matériel roulant, terminus,...).
- Direction Régionale de l'Ile-de-France : www.ile-de-france.equipement.gouv.fr/
 - EGT 2001
- IAU : <http://www.iau-idf.fr/ultisim/>
 - Comparaison des modèles LUTI avec ULTISIM
- La fabrique de la Cité : <http://www.lafabriquedelacite.com>
 - Dominique Bureau, 2010, *Synthèse de la table ronde Lyon*, discours de clôture de la table ronde.
- Musée des Transports Urbains, Interurbains et Ruraux: <http://www.amtuir.org/>
 - Cartes historiques et évolution du réseau de métro

- RATP : www.ratp.fr
 - Vérification des horaires des lignes actuelles de transport en commun.
- Transiliens SNCF : <http://www.transilien.com/>
 - Historique des lignes, horaires et fréquences des transiliens et RER.
- Wikipédia : <http://fr.wikipedia.org/>
 - Historique des lignes de métro, RER, transiliens et trains de banlieue ;
 - Historique du réseau routier ;
 - Historique de l'aménagement de l'île de France.
- Wikisara : <http://routes.wikia.com/wiki/Accueil>
 - Historique du réseau routier.

Livres

- OCDE, Forum International des Transports, 2008, *Bénéfices économiques élargis du secteur des transports*, éditions OCDE, 224 pages ;
- RATP, Département du Patrimoine / Mémoire de l'entreprise – Information documentaire, 2002, *Le RER : le réseau francilien*, Médiathèque de la RATP, 144 pages.

Annexes

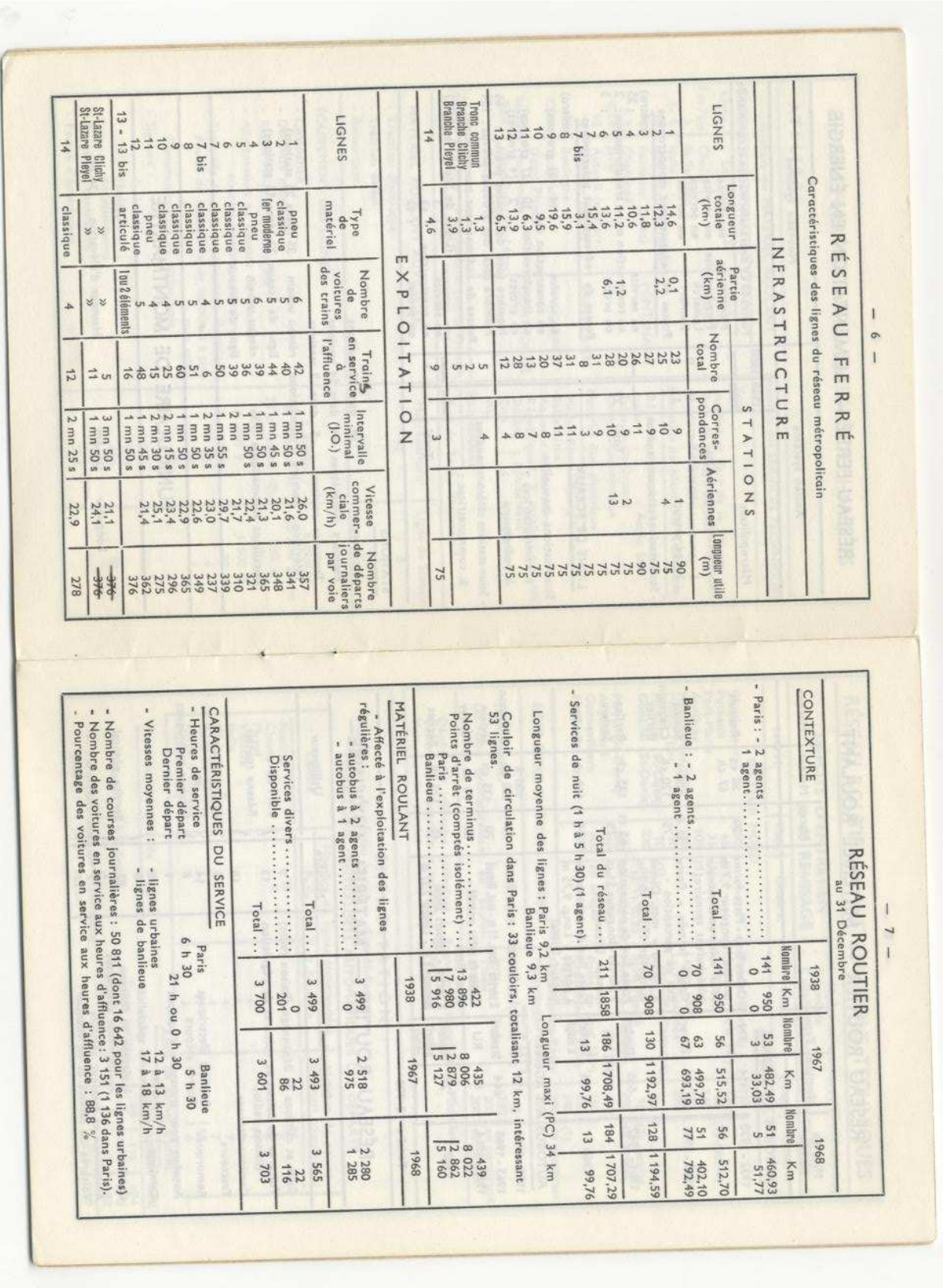


Figure 41 : Extrait des statistiques annuelles de la RATP de 1968 (source : RATP)



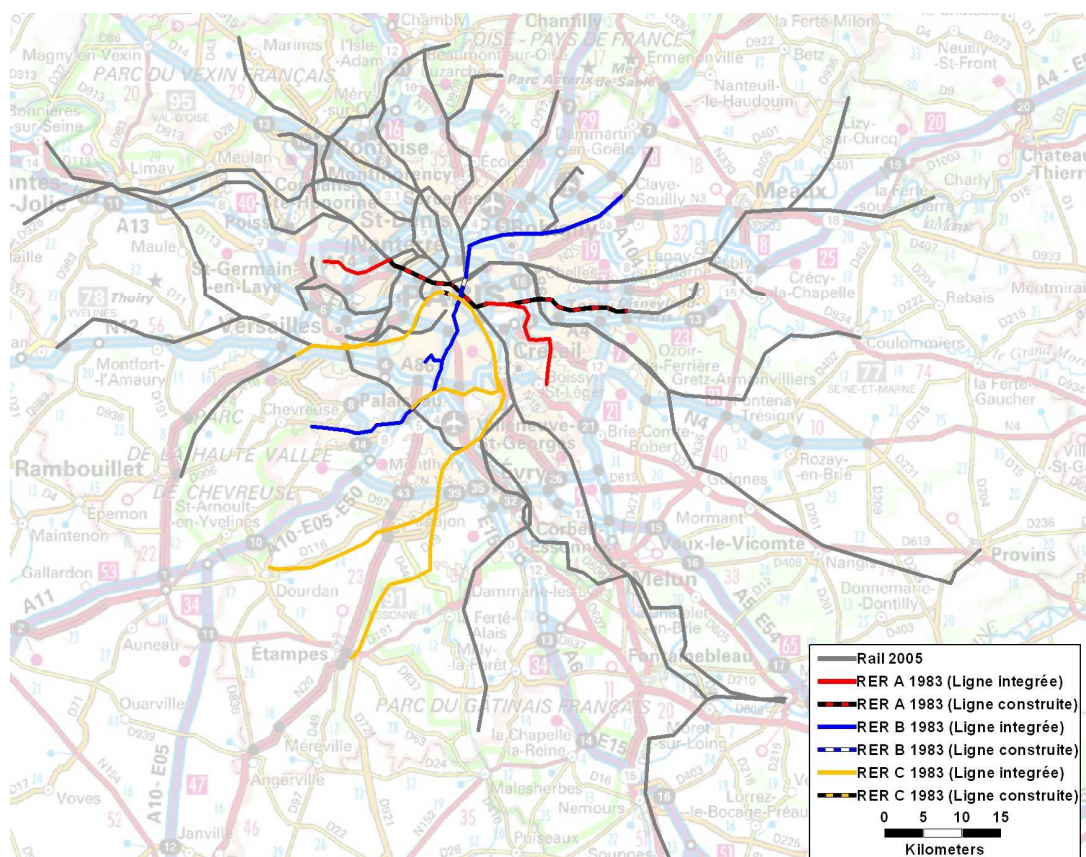
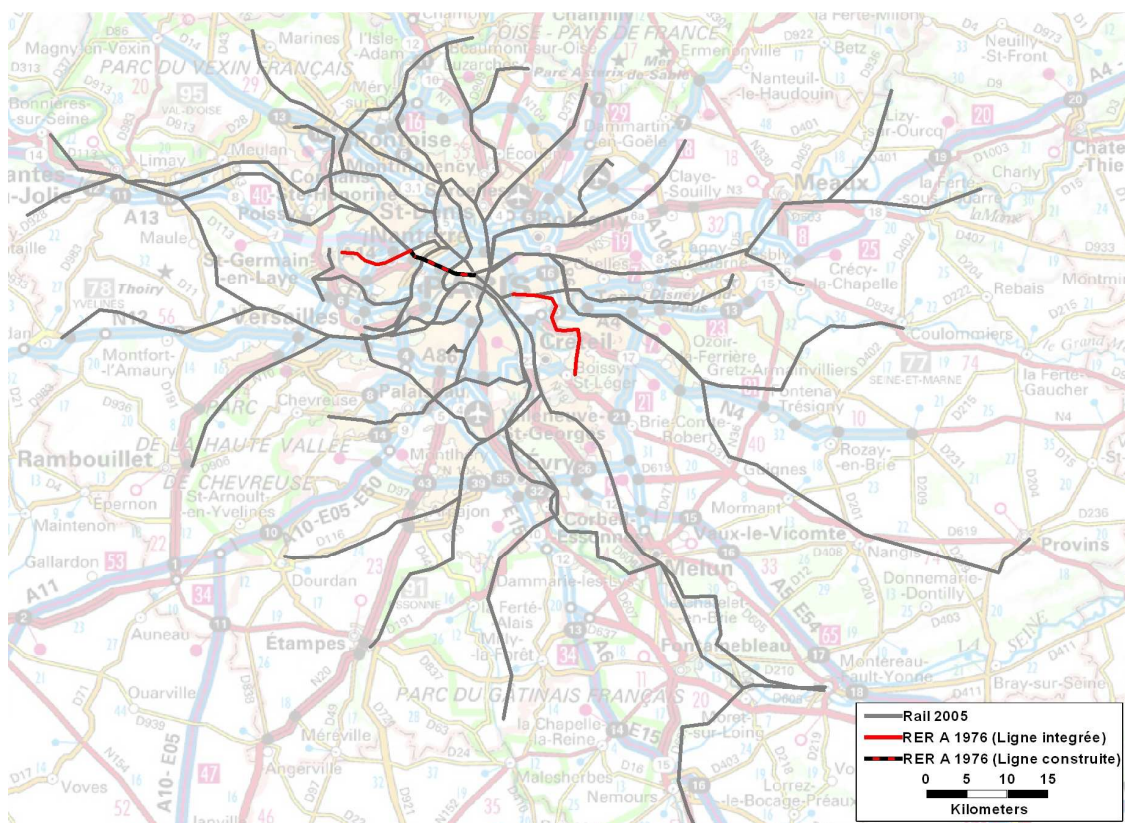
Figure 42 : Couverture d'un indicateur Chaix de 1960 (source : RATP)

12

65

Période	Ligne	Métro
Avant 1968		
68-76	3	Gambetta – Galliéri, débranchement de la ligne 3 bis
	7	Débranchement de la ligne 7 bis
	8	Charenton-Ecoles – Maison-Alfort – Créteil Préfecture
	13	Jonction avec ancienne 14 par la création du tronçon Saint-Lazare – Invalides Nord : Carrefour-Pleyel – Saint-Denis Basilique Sud (ancienne 14) : Porte de Vanves – Châtillon
76-83	7	Porte de la Villette – Fort d’Aubervilliers et Maison-Blanche – Kremlin-Bicêtre
	10	Boulogne – Jean Jaurès et Pont de Saint-Cloud
	13	Porte de Clichy jusqu’à Genevilliers – Gabriel Péri
83-91	5	Eglise de Pantin – Bobigny – Pablo Picasso
	7	Le Kremlin-Bicêtre – Villejuif – Louis Aragon et Fort d’Aubervilliers – La Courneuve
91-99	1	Pont de Neuilly – Grande Arche de la Défense
	13	Saint-Denis Basilique – Saint-Denis Université
	14	Mise en service entre Grande Bibliothèque et Madeleine
99-Actuel	13	Asnières – Gennevilliers Les Courtilles
	14	Madeleine – Saint-Lazare et Bibliothèque – Olympiades

Figure 44 : Tableau récapitulatif des principales étapes de construction du métro depuis 1968



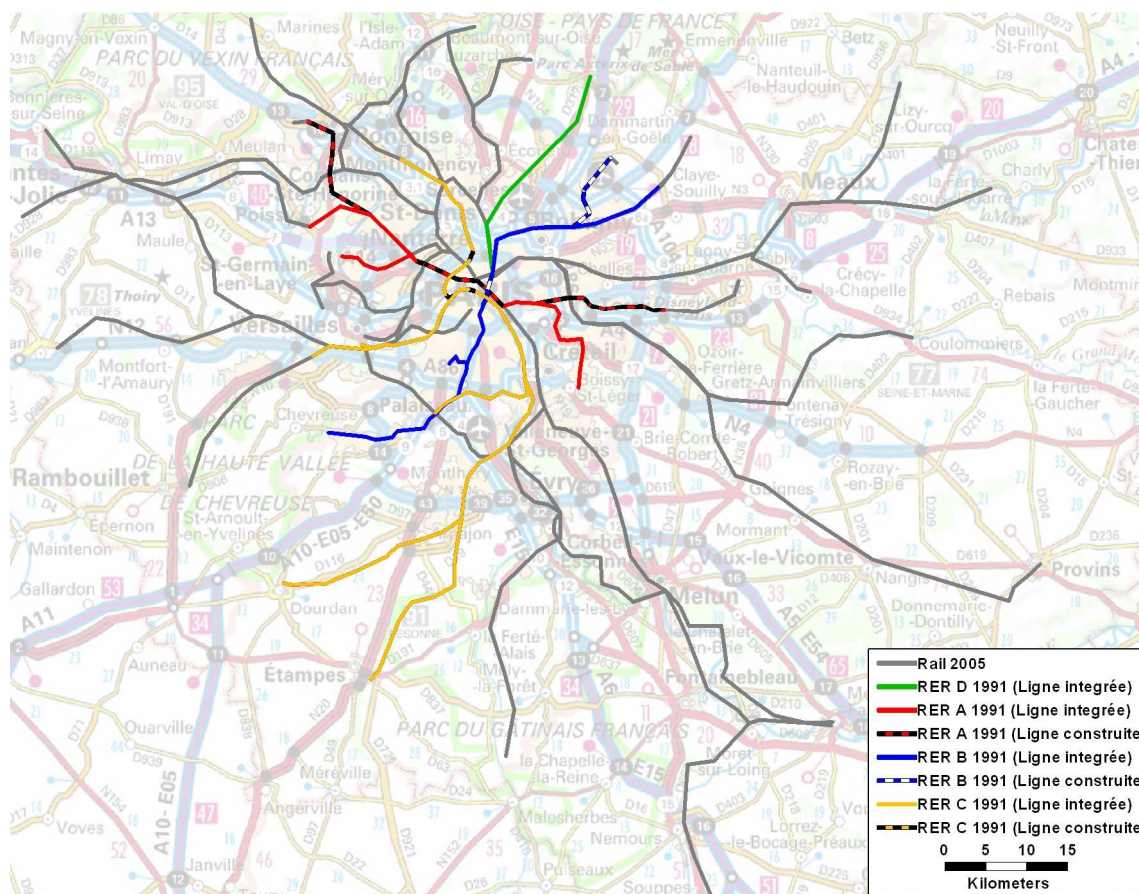


Figure 47 : Réseau RER en 1991 (source : SNCF)

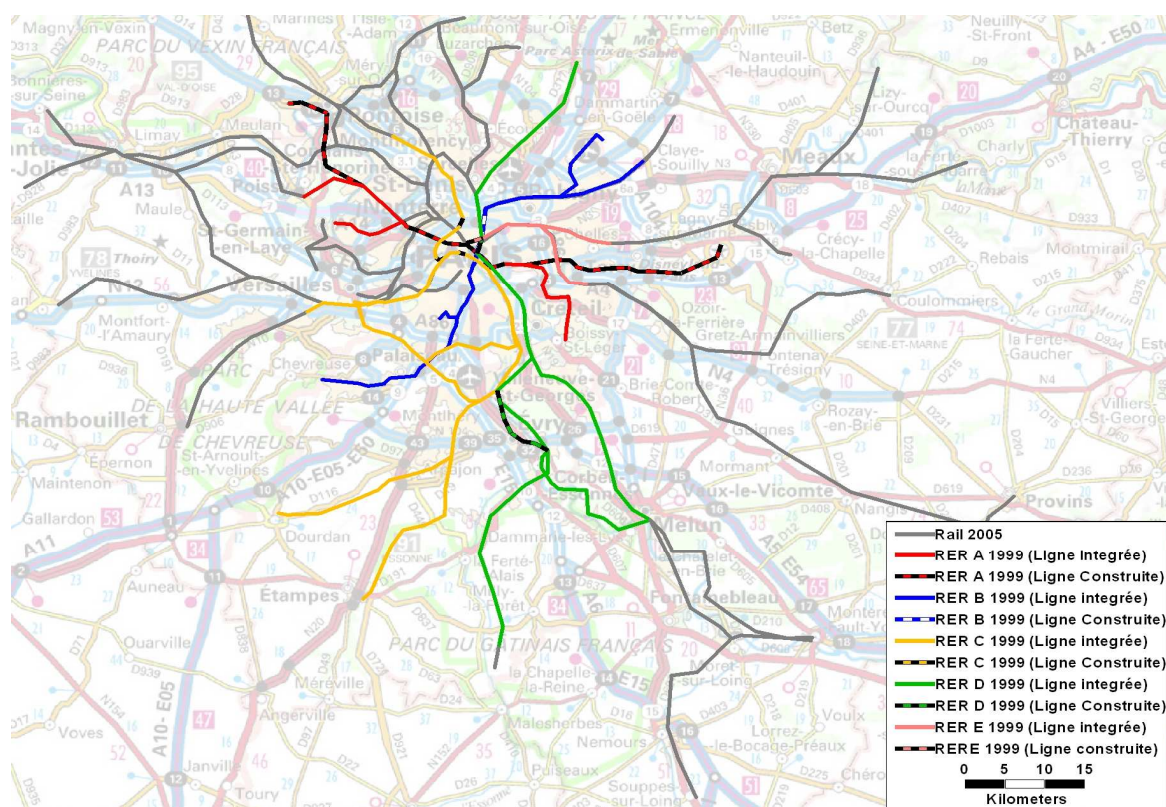


Figure 48 : Réseau RER en 1999 (source : SNCF)

Période	Ligne	RER
Avant 1968		
68-76	A	Mise en service de la station Nation, nouveau terminus de la ligne de Vincennes Etoile – La Défense et Etoile – Auber Connexion à Saint-Germain en Laye en utilisant l'ancienne ligne Paris – Saint-Germain Gare de Nanterre Préfecture
76-83	A	Devient RER A avec jonction Auber – Nation et jonction avec ligne de Sceaux devenue RER B Ouverture de la branche Noisy le Grand – Mont d'Est et prolongement jusqu'à Torcy
	B	La ligne de sceaux devient le RER B, prolongement jusqu'à Châtelet – Les Halles Prolongement jusqu'à Gare du Nord et correspondance avec Roissy et Mitry-Claye
	C	Création de la Transversale Rive Gauche par connexion des gares des Invalides et d'Orsay Devient RER C et prolongement jusqu'à Saint-Quentin en Yvelines grâce à l'intégration de la ligne Paris – Chartres
83-91	A	Interconnexion ouest, branche de Cergy Interconnexion ouest, branche de Poissy SACEM
	B	Interconnexion Nord-Sud avec relève des conducteurs SNCF/RATP Gare Saint-Michel – Notre-Dame Orlyval entre Antony et Aéroport d'Orly
	C	Trains à 2 niveaux Connexion avec RER B à Saint-Michel – Notre-Dame Branche Vallée de Montmorency – Invalides, gare Porte de Clichy
	D	Création de la ligne D du RER par prolongement des trains terminus Villiers-le-Bel de Gare du Nord à Châtelet-Les Halles (87) Prolongement de Goussainville à Orry-la-Ville (90)
91-99	A	Prolongement jusqu'à Marne la Vallée Chessy Cergy – Saint-Christophe à Cergy – Le Haut Premier train à 2 niveaux
	B	Prolongement Roissy – Aéroport Charles de Gaulle 2 TGV Gare Plaine – Stade de France et fermeture de Plaine-Voyageurs
	C	Intégration officielle de la branche Juvisy – Versailles Chantiers
	D	Interconnexion Nord-Sud Gare Stade de France – Saint-Denis
	E	Mise en service des branches Saint-Lazare jusqu'à Chelles-Gournay et Villiers-sur-Marne – Le Plessis-Trévisé
99- Actuel	A	Gare Val d'Europe
	B	Suppression des relèves de conducteurs
	C	De Montigny-Beauchamp jusqu'à Pontoise Gare Saint-Ouen-l'Aumône – Liesse Plus aucun train à 1 niveau
	E	Prolongement jusqu'à Tournan

Figure 49 : Tableau récapitulatif des principales étapes de construction du RER depuis 1968

