



Date : jeudi, 9 juillet 2020

Auteur : Éric Martel-Poliquin, ing., M. Sc. A.

Objet**Survol méthodologique du modèle de transfert modal du MTQ**

1. Contexte

Lors des audiences du BAPE concernant le projet de tramway de la Ville de Québec, il a été demandé au MTQ de détailler son modèle de transfert modal. Afin de bien cadrer l'utilisation du modèle de transfert modal, un survol de l'environnement de simulation développé et utilisé au MTQ sera d'abord fait. Ensuite, le modèle de transfert modal sera présenté de manière plus détaillée. Finalement, une brève explication des différences entre une méthodologie de transfert modal et de choix modal sera présentée.

2. Survol des outils de modélisation du MTQ

La Direction de la modélisation des systèmes de transport du MTQ est formée d'une vingtaine de professionnels et d'ingénieurs regroupés dans 4 équipes lesquelles sont en charge de différentes tâches liées à la modélisation des systèmes de transport.

Les travaux des quatre équipes entrent en interaction pour obtenir un système d'information tel que décrit à la Figure 1.

Les équipes sont les suivantes :

- Collecte et gestion des données

Cette équipe est en charge de planifier et mettre en œuvre les enquêtes Origine-Destination (pastille 1 sur la Figure 1). Les données recueillies lors de ces enquêtes deviennent un intrant incontournable pour la modélisation.

- Analyse et prévision de la demande

Cette équipe est en charge d'analyser les données d'enquête en vue de, entre autres, modéliser la demande en transport à des horizons futurs (pastille 2 sur la Figure 1). Ces prévisions sont basées sur les prévisions démographiques de l'Institut de la statistique du Québec, un inventaire des capacités d'accueil des territoires, des analyses basées sur les tendances lourdes en transport affectant la demande. Le résultat permet de faire évoluer dans le temps les données de l'Enquête Origine-Destination par bonds de 5 ans jusqu'à un horizon de 25 ans.

- Modélisation du transport routier

Cette équipe opère des modèles d'affectation de la demande routière (pastille 3 sur la Figure 1). À l'aide de l'outil Emme, il est possible de simuler l'utilisation du réseau routier en fonction de la demande prévisionnelles ainsi qu'en faisant varier l'offre de transport.

- Modélisation du transport en commun

Cette équipe opère des modèles d'affectation de la demande en transport en commun (pastille 4 sur la Figure 1). À l'aide de l'outil Madigas, il est possible de simuler l'utilisation du réseau de transport en commun en fonction de la demande prévisionnelle ainsi qu'en faisant varier l'offre de transport. Cette équipe, en collaboration avec l'équipe de modélisation routière, opère également un modèle de transfert modal (Pastille 5 sur la Figure 1).

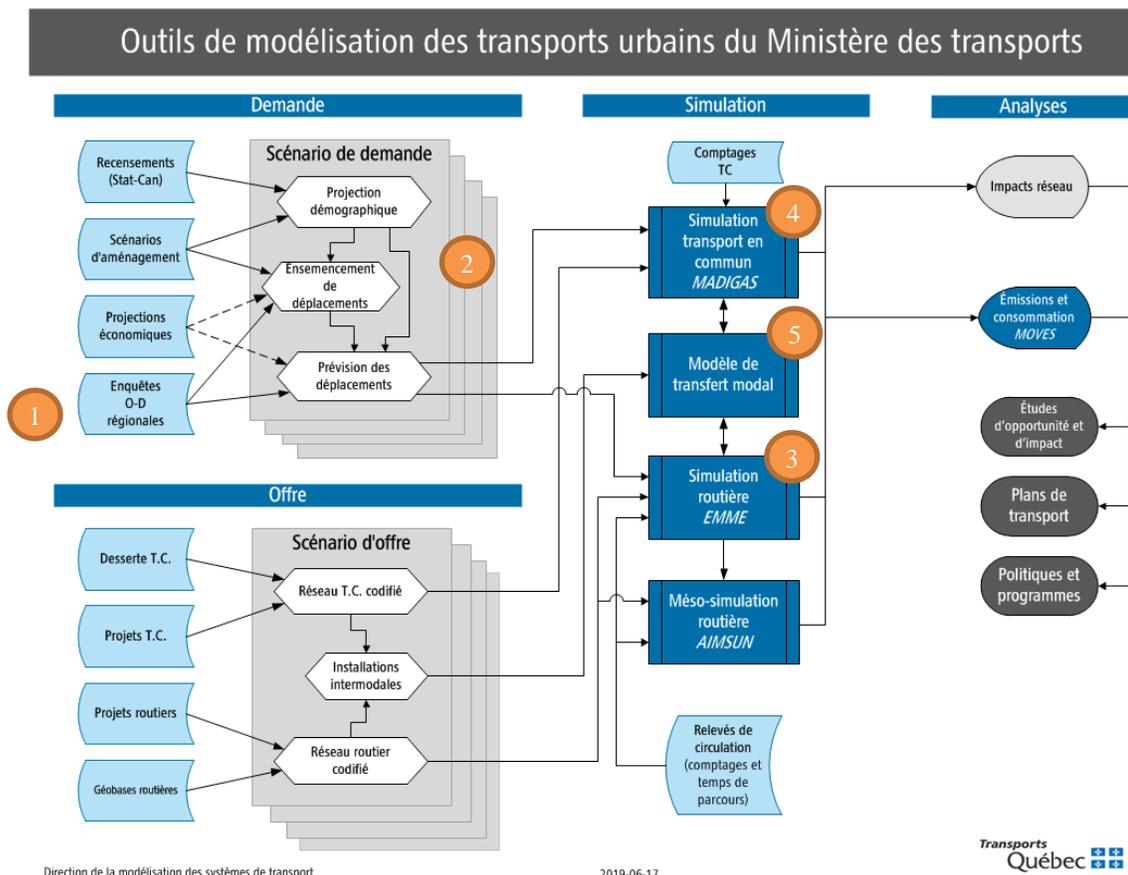


Figure 1 - Outils de modélisation des transports urbains du Ministère des Transports du Québec

3. Modèle de transfert modal

La section 3 suivante fera un survol rapide de la méthodologie de transfert modal développée par le MTQ. Une version plus détaillée de cette méthodologie est disponible en annexe à la section 5.

3.1 Principes de bases

Le modèle de transfert modal (MTM) développé au MTQ est basé sur une méthodologie qui est en développement depuis les années 1980 et qui évolue au fil des années. Au centre de ce

modèle, le principe de transfert modal incrémental à seuil, c'est-à-dire, en décortiquant les trois termes :

- Transfert modal

Modification d'une situation de base connue (part modale observée dans l'Enquête O-D ou projetée selon les tendances lourdes, scénario de base). Les probabilités de transfert vers un autre mode engendrées par une modification de l'offre ou de la demande en transport (scénario d'étude) sont estimées.

- Incrémental

Ce transfert modal est établi en fonction des variations relatives dans les offres de transport routier et TC, entre la situation de base et le scénario étudié.

- À seuil

Ces variations doivent atteindre un certain **seuil minimal** pour susciter un changement de comportement.

3.2 Modes considérés

Le modèle considère trois modes pour un déplacement : l'utilisation exclusive de l'automobile (auto pur), l'utilisation exclusive du transport en commun (TC pur) et l'utilisation du transport en commun et de l'automobile lors d'un même déplacement (bimodal). Le lieu où l'utilisateur passe du mode automobile au mode TC ou inversement est nommé **jonction**.

Cela résulte en la simulation de 7 transferts modaux tels qu'illustrés à la Figure 2 lesquels sont estimés en 4 types :

- a. Transferts entre Auto pur et TC pur (AU-TC)
- b. Transferts entre Auto pur et Bimodal (AU-BI)
- c. Transferts entre TC pur et Bimodal (TC-BI)
- d. Redistribution des bimodaux (BI-BI)¹

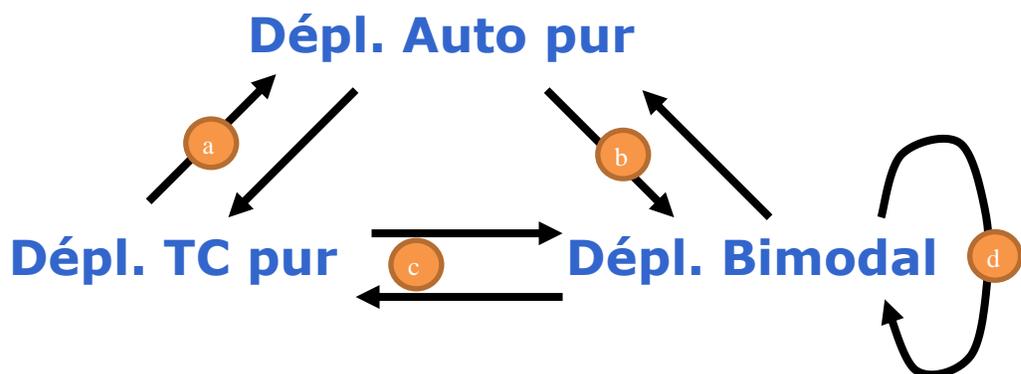


Figure 2 - Types de transferts modaux considérés

¹ La redistribution des bimodaux consiste à déterminer si l'utilisateur bimodal dans le scénario de base vient changer de point de jonction dans le scénario d'étude.

3.3 Courbe de transfert modal

Le transfert modal, autrement dit, la variation de la part modale pour un mode, est fonction de la variation du ratio de temps entre ces deux modes, tel que montré à l'Équation 1.

Équation 1 - Équation de la courbe de transfert modal

$$\Delta \left[\frac{Dépl_{TC}}{Dépl_{total}} \right] = f \left(\Delta \left[\frac{Temps_{TC}}{Temps_{Auto}} \right] \right)$$

Cette relation a généralement l'allure d'une courbe telle que montrée à la Figure 3 où les points en bleu représentent les observations provenant de l'enquête Origine-Destination et où la courbe en rouge est la représentation mathématique de cette relation.

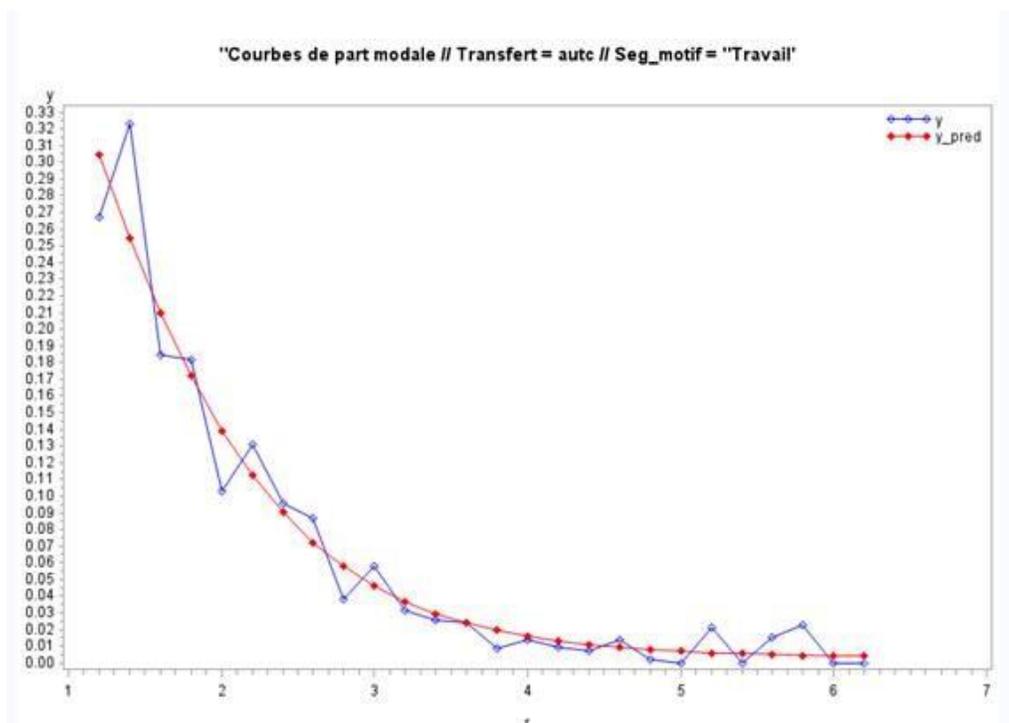


Figure 3 - Exemple de courbe de transfert modal

Cette courbe est estimée à partir du scénario de base et la relation mathématique établie entre le ratio de temps de parcours et la part modale permettra de simuler la situation d'étude où ce ratio va varier. Celle-ci est déterminée pour tous les types de transfert sauf BI-BI qui est traité différemment.

3.4 Application du transfert modal

À partir des caractéristiques du scénario d'étude, de nouveaux temps de parcours sont déterminés pour chaque déplacement. Avant d'appliquer la courbe, on exclut les déplacements qui ne respectent pas le critère de seuil. Les écarts de temps de parcours entre les modes automobile et TC sont comparés pour les deux scénarios (base et étude). La différence des

écarts est ensuite estimée et celle-ci doit être supérieure au seuil défini par hypothèse (généralement posé à 5 min). Les déplacements ne répondant pas à ce critère sont exclus, donc aucun transfert modal n'est calculé pour ceux-ci. Ceci est illustré à la Figure 4.

Scénarios	Modes		Écarts
	Choix observé (Avant)	Option	
	Auto	TC	
Base	40	60	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-20</div> <div style="background-color: #f4a460; padding: 2px;"> $\frac{\text{Temps TC}}{\text{Temps auto}} = \frac{60}{40} = 1,5$ </div>
Étude	42	50	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">-8</div> <div style="background-color: #f4a460; padding: 2px;"> $\frac{\text{Temps TC}}{\text{Temps auto}} = \frac{50}{42} = 1,2$ </div>
Écart Étude - Écart Base		Différence des écarts = 12	

Si différence des écarts > SEUIL → application des courbes

Figure 4 - Application du seuil

La part modale associée au nouveau ratio de temps est ensuite tirée de la courbe de transfert modal. Le taux de transfert modal est calculé à partir de la comparaison des parts modales entre les deux scénarios de base et d'étude comme montré à la Figure 5. La méthode de calcul va aussi varier en fonction de la direction dans laquelle on se déplace sur la courbe. Si on se déplace vers la droite, la part modale du TC diminue, alors que si on se déplace vers la gauche, la part modale augmente.

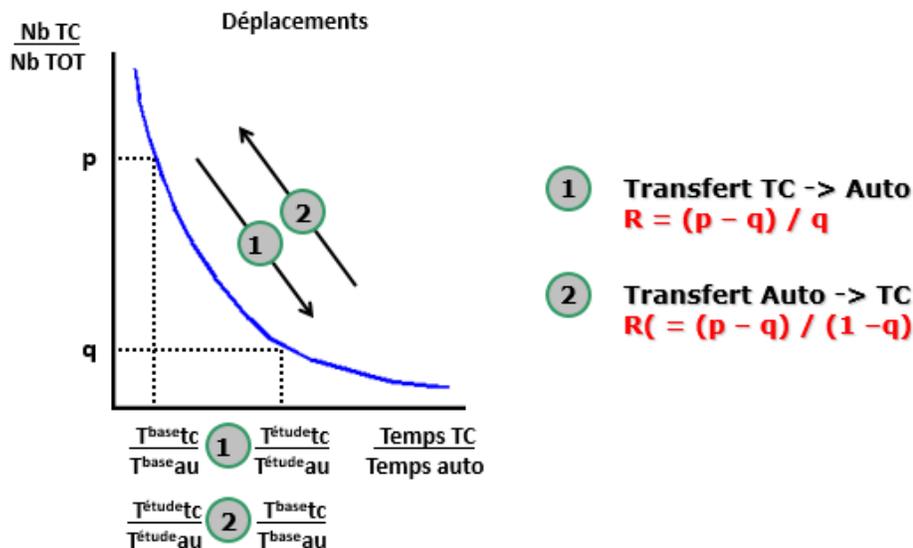


Figure 5 - Application de la courbe de transfert modal

À la Figure 6, on illustre un exemple de calcul correspondant aux données montrées à la Figure 4. On peut voir que dans une telle situation où la part modale part du TC s'améliore, on est en mesure d'obtenir la proportion du déplacement auto auquel on applique un transfert modal

devenant un déplacement TC. Dans le cas présent, pour un déplacement avec un facteur d'expansion de 10 dans le scénario de base, on obtiendrait 9,29 déplacements en automobile et 0,71 déplacement en TC dans le scénario d'étude.

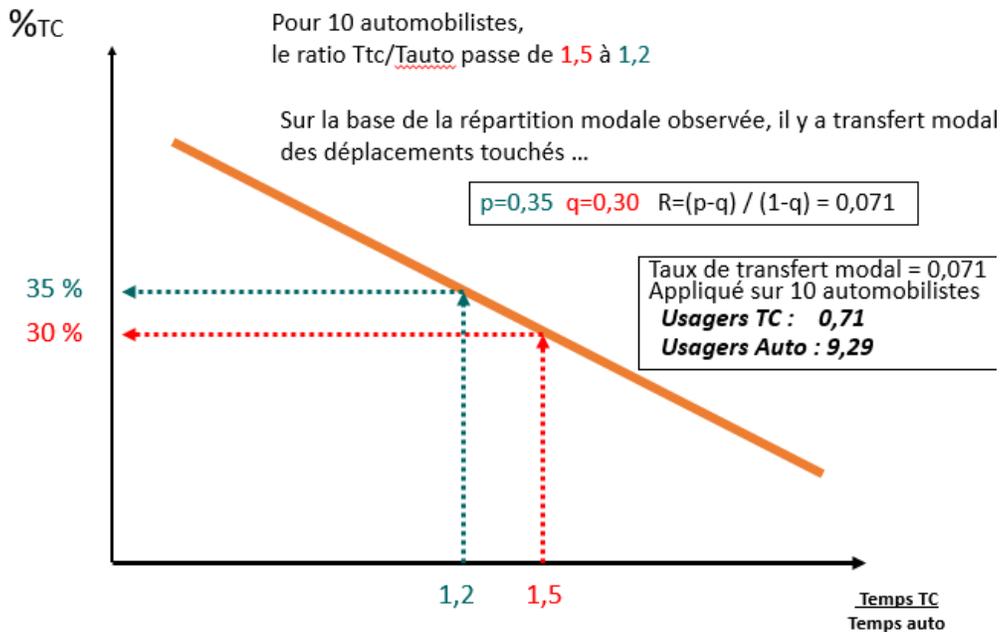


Figure 6 - Détermination du taux de transfert modal

Ce processus est fait pour chaque type de transfert (AU-TC, TC-BI et AU-BI).

3.5 Transferts bimodaux

Les transferts vers les bimodaux sont plus complexes, car une multitude de points de jonction est à considérer, et chaque point de jonction engendre un temps de déplacement différent.

Deux types de transferts bimodaux sont à considérer, les nouveaux bimodaux (provenant des transferts TC-BI et AU-BI) et les bimodaux à redistribuer (BI-BI) lesquels déclaraient déjà un déplacement bimodal dans l'enquête Origine-Destination.

Comme les stationnements incitatifs associés aux points de jonction ont une capacité finie, la priorité est d'abord donnée aux BI-BI, lesquels sont distribués dans les jonctions existantes et dans les nouvelles jonctions du scénario d'étude en fonction de leur attractivité. Une fois les BI-BI redistribués, les nouveaux bimodaux sont ensuite distribués dans les places restantes.

L'attractivité des jonctions est déterminée à partir d'un modèle de choix discret qui permet de déterminer la probabilité d'utiliser une jonction donnée pour un déplacement. Les déplacements sont distribués dans la jonction la plus probable pour chaque déplacement et en fonction de l'heure d'arrivée au stationnement. Ainsi, les BI-BI sont redistribués dans leur jonction la plus attractive tant qu'il reste de la place, lorsque la capacité est atteinte, le déplacement est dirigé vers la deuxième jonction la plus probable et ainsi de suite. Une fois tous les BI-BI redistribués, on applique le même principe aux autres bimodaux. Si aucune place ne peut être trouvée, le transfert modal est annulé.

3.6 Bilan initial

Au terme de tous les transferts modaux, on recrée un nouveau fichier dans un format similaire au fichier d'enquête Origine-Destination. Pour chaque déplacement créé, le déplacement initial est copié et son mode ainsi que son facteur d'expansion sont modifiés pour représenter le transfert modal calculé. Le déplacement initial quant à lui est conservé, mais les déplacements transférés y sont soustraits. Le bilan du nombre global de déplacements est donc conservé.

3.7 Itérations du modèle

Le transfert modal ainsi calculé engendre une nouvelle situation où la demande auto est modifiée. Or, les temps de déplacement auto sont fonction de la demande auto. De plus, le transfert modal est aussi fonction des temps de déplacement auto. On doit donc répéter l'exercice de transfert modal de manière itérative afin d'obtenir une situation d'équilibre des temps auto. Généralement, 2 ou 3 itérations sont suffisantes pour atteindre la convergence.

3.8 Bilan final du transfert modal

Une fois la convergence atteinte, un nouveau fichier de demande post-transfert modal est disponible dans un format compatible avec les données des enquêtes Origine-Destination. Cela permet de faire toute analyse ou modélisation nécessaire avec les méthodes habituelles.

4. Transfert modal vs Choix modal

Le MTQ développe depuis les années 1980 un modèle de transfert modal. En parallèle, des méthodologies de choix modal émergent depuis plusieurs années également. Ces deux méthodologies ont pour objectif de déterminer une modification de la demande en transport associée à une modification de l'offre en transport pour un scénario donné. Un modèle de transfert modal cherche à représenter les échanges entre des modes définis en fonction de leur compétitivité relative dans un scénario d'étude. Les paramètres et hypothèses utilisées ont pour objectif de modéliser, pour un déplacement, l'utilité de passer d'un mode à l'autre.

Un modèle de choix modal cherche à déterminer la probabilité pour un déplacement d'être effectués avec un des modes considérés. Le déplacement initial sera redistribué vers les modes en fonction de la probabilité qu'ils soient utilisés. Ces modèles sont souvent basés sur des méthodes statistiques tel des modèles logistiques multinomiaux, entre autres.

Ce sont donc deux approches différentes pour répondre à un problème commun. Il n'est pas avisé de comparer les hypothèses liées à une méthode et à une autre, étant donné que celles-ci sont spécifiques et faites dans un contexte différent.

Il est d'ailleurs très difficile de juger de la qualité d'un modèle a posteriori. La modélisation est une tâche extrêmement complexe qui nécessite l'utilisation d'une quantité impressionnante de données, de méthodes, d'hypothèses et d'expertise. Ces exercices font appel à des logiciels sophistiqués qui doivent être calibrés en fonction d'une myriade de paramètres difficilement interprétables dans le contexte spécifique d'un projet donné. Conséquemment, la modélisation n'est pas une science parfaite, mais plutôt un travail constant vers une meilleure représentation de la situation à simuler. C'est un travail éternellement perfectible et il n'y aura jamais de modèle parfait et dont la qualité est indiscutable. La modélisation est donc un domaine d'expertise technique, mais aussi une place pour le débat, le questionnement, le doute, etc.

Ainsi, lors du développement d'un modèle de transport, il peut être pertinent de former un comité technique spécialisé en modélisation dont les membres seraient des professionnels experts dans le domaine de la modélisation. Ce comité encadrerait les travaux de l'équipe de travail tout au long du processus en proposant un plan de travail détaillé, lequel comporterait différents jalons lors desquels les experts peuvent examiner les résultats obtenus et en juger la qualité. Tout au long du processus, les experts pourront également discuter de l'approche méthodologique envisagée par l'équipe de travail pour chacune des étapes du développement. Ces rencontres sont également un lieu d'échange où les différentes parties prenantes peuvent partager leurs connaissances et les données pertinentes à l'élaboration du modèle. Au terme du processus, un rapport est remis, lequel est révisé par le comité technique modélisation et approuvé. Ceci a comme avantage de créer un terrain neutre où les experts peuvent discuter et partager sur des questions techniques. Cela favorise également une meilleure adhérence pour les différents organismes impliqués étant donné que leurs experts trouvent un terrain d'entente au niveau technique. De plus, tout au long du processus, les organismes peuvent avoir un aperçu préliminaire sur les résultats, cela permettant une meilleure compréhension des enjeux ainsi que de permettre de faire des analyses complémentaires pour informer les différentes parties prenantes au besoin sur des éléments spécifiques. Ce type de démarche contribue à permettre de situer le débat au niveau de la prise de décision plutôt que sur les données et les modèles utilisés.

5. Annexe

5.1 Méthodologie détaillée

5.1.1 Identification des déplacements considérés

À partir de l'enquête Origine-Destination, une extraction des déplacements correspondant à l'un des trois modes définis à la section 0 est effectuée.

Ensuite, ces déplacements sont filtrés pour retirer les déplacements qui sont jugés captifs. La notion de captivité est définie comme la possibilité pour une personne d'effectivement faire un transfert modal. Une série de critères sont posés comme hypothèse. Par exemple, il est considéré qu'un déplacement TC pur effectué par une personne ne détenant pas de permis de conduire ou ne possédant pas de voiture n'engendrera pas de transfert modal vers l'automobile. Un autre exemple serait un automobiliste qui se déplace selon une chaîne de déplacement complexe (arrêt à un ou plusieurs lieux lors d'un déplacement); celui-ci serait considéré comme captif de l'automobile. Une fois les déplacements filtrés, il en résulte une première base de travail qui représente les déplacements pouvant faire l'objet d'un transfert modal.

5.2 Temps de parcours des déplacements

Pour chaque déplacement considéré, on simule, dans le scénario de base, les temps de parcours en fonction des 3 modes identifiés précédemment. Le temps de parcours en auto pur est estimé à partir du modèle de transport routier (Emme), les temps de parcours en TC pur sont estimés à partir du modèle de transport en commun (Madigas), les déplacements bimodaux sont l'addition du temps de parcours en auto et en TC, passant par le lieu de jonction déclaré.

5.3 Construction des courbes de transfert modal

Les transferts sont estimés à partir de « courbes de choix modal ». Ces courbes, qui représentent la répartition de la part modale entre deux modes selon leur niveau de service respectif, sont définies pour chaque paire de modes analysée à partir de l'information extraite de l'enquête Origine-Destination. Le niveau de service (axe des X) est défini comme le ratio du temps de déplacement des deux modes. Prenons l'exemple de la courbe AU-TC : le ratio des temps théoriques modélisés (temps TC / temps auto) est calculé pour chaque déplacement ayant pour mode l'auto ou le TC. Tous les déplacements avec des ratios similaires sont regroupés (à intervalle de 0,1) et on calcule la part modale de chaque groupe en se basant sur les facteurs d'expansion de l'Enquête. Lorsqu'il y a moins de déplacements que le seuil de significativité de l'Enquête Origine-Destination pour un ratio particulier, celui-ci n'est pas conservé. Voici une représentation graphique des ratios mesurés à la Figure 7.

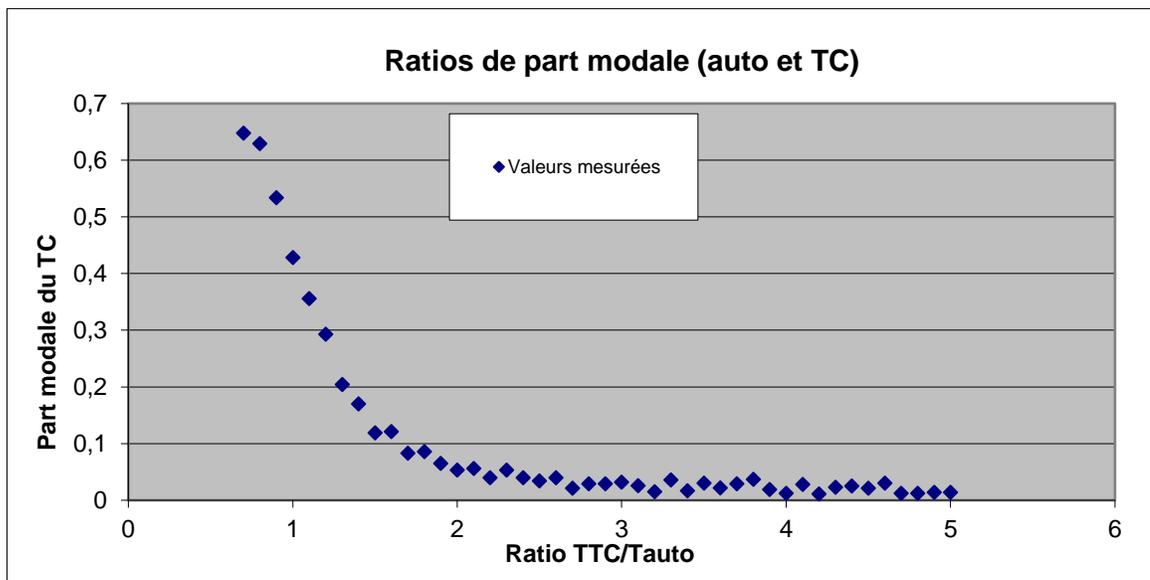


Figure 7 – Observation de la part modale du TC en fonction des ratios de temps TC/temps auto

Basé sur ces les valeurs théoriques obtenues, une courbe de tendance est calculée sous la forme suivante :

Équation 2 - Courbe de transfert modal

$$y = a + \left(\frac{e^{bx}}{c + e^{bx}} \right)$$

Les valeurs des coefficients a, b et c sont alors déduits afin de former la courbe qui épouse le mieux les valeurs mesurées.

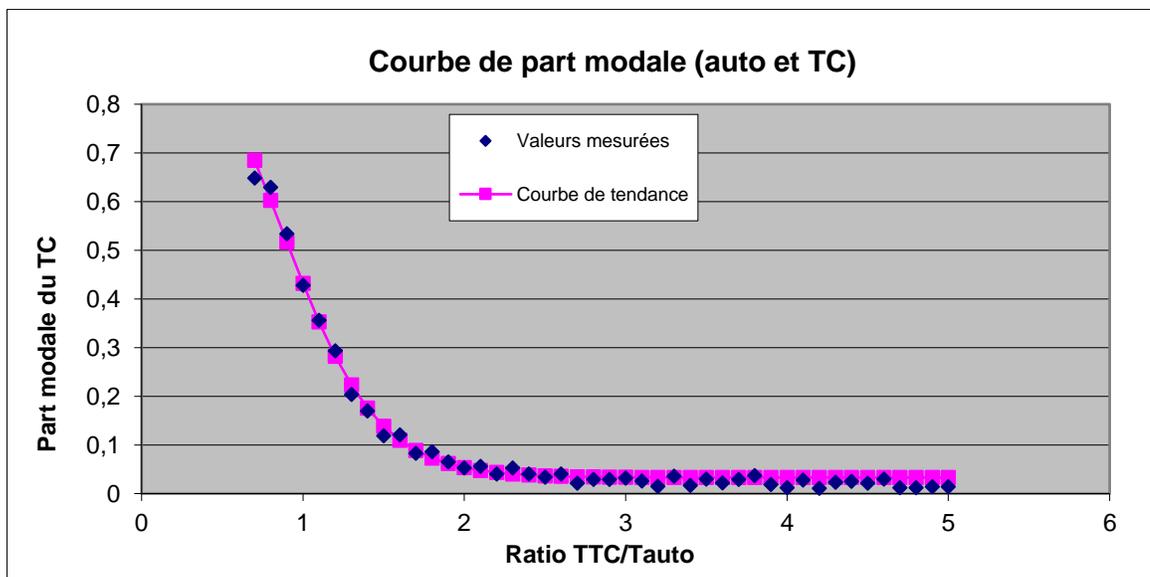


Figure 8 - Courbe de transfert modal

Par définition, les courbes utilisées pour calculer le transfert modal se basent uniquement sur les temps de déplacements. Cependant, le temps de déplacement n'est pas l'unique facteur qui détermine le choix modal d'une personne. Par exemple, pour un même ratio de temps, un

déplacement au centre-ville est plus probable de se faire en TC qu'un déplacement vers tout autre secteur. Une manière d'intégrer ces facteurs est de segmenter les déplacements par groupes spécifiques (ex : déplacement à destination centre-ville, à destination secteurs centraux et à destination autre). Une courbe sera alors définie pour chaque groupe tel qu'expliqué plus haut.

Il est possible que la courbe de tendance ne représente pas adéquatement tous les points du graphique. C'est le cas de l'exemple de courbe AU-BI présentée à la Figure 9 pour les déplacements à destination du centre-ville, où la part modale semble atteindre un plafond à partir d'un ratio de 0,9.

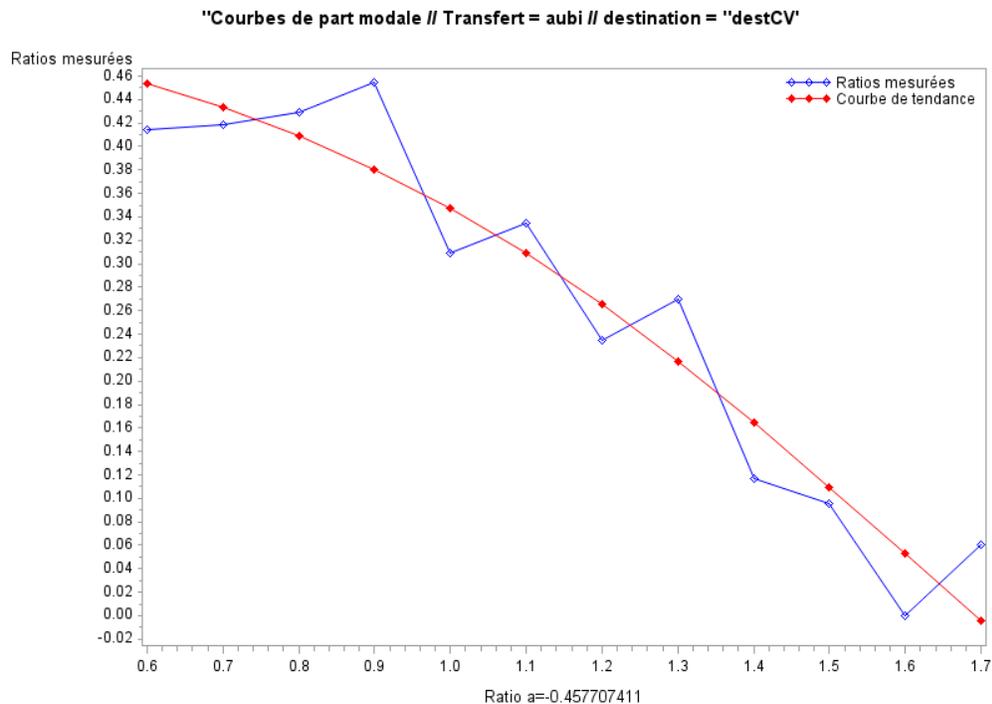


Figure 9 - Exemple de courbe de transfert modal AU-BI devant être plafonnée

Les parts modales sont sous-estimées pour les ratios de 0,8 et 0,9, et surestimées pour ceux de 0,6 et 0,7. En général, on remarque que la courbe de tendance est trop « aplatie » pour les ratios mesurés. Pour pallier le problème, tel qu'illustré à la Figure 10, on exclut la section plafonnée lors du calcul de la courbe : dans ce cas, cela représente les ratios de 0,8 et moins.

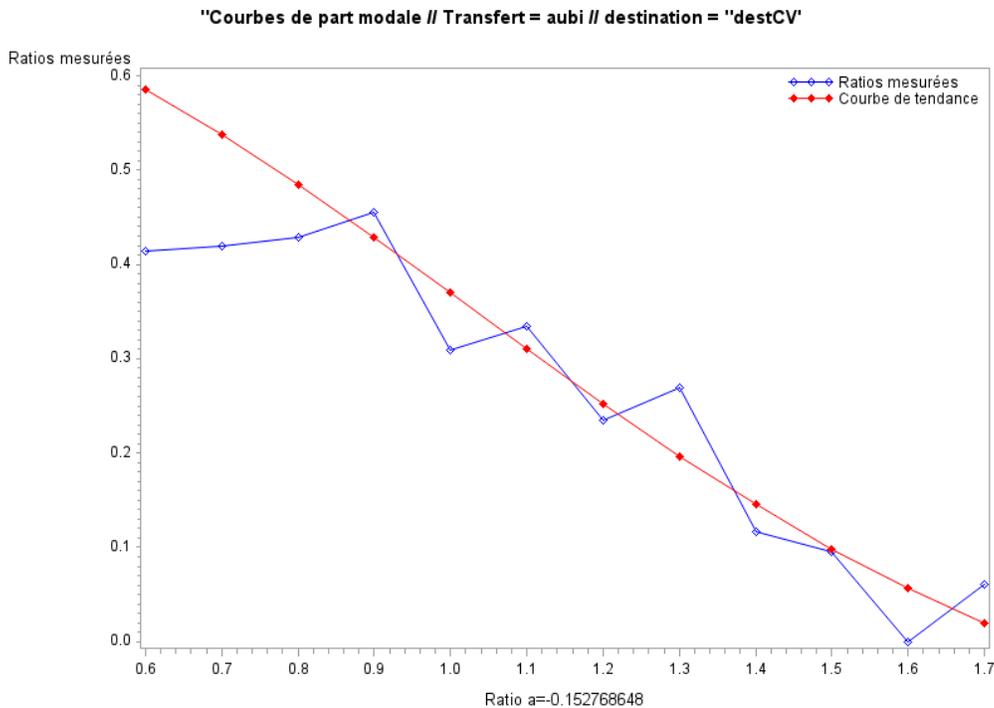


Figure 10 - Exemple de courbe de transfert modal AU-BI plafonnée

Évidemment, puisque les ratios de 0,8 et moins ont été exclus lors du calcul de la courbe, les résultats prédits par la courbe pour ces ratios ne seront pas utilisés. La courbe sera plafonnée à la valeur de la part modale définie par la courbe pour le ratio de 0,9 pour tous les ratios inférieurs à ce dernier (environ 0,42 dans ce cas).

5.4 Calcul du transfert modal

Afin de simplifier les explications, seul le transfert AU-TC sera mentionné. L'identifiant « autc » dans les noms de variables se rapporte à ce type de transfert. Le processus décrit dans cette section est identique pour les autres types de transferts. Les identifiants « aubi » et « tcbi » se réfèrent aux transferts AU-BI et TC-BI, respectivement. Les transferts BI-BI sont traités à une étape subséquente.

Pour qu'il y ait un transfert modal, il doit y avoir un changement de situation. Ainsi, les temps de déplacements du scénario de base seront différents de ceux du scénario d'étude. On définit les variables suivantes:

ratioautc_av : Le ratio de temps TC et temps auto pour le scénario de base;

ratioautc_ap : Le ratio de temps TC et temps auto pour le scénario d'étude;

qautc : La part modale TC (vs auto) pour le scénario de base;

pautc : La part modale TC (vs auto) pour le scénario d'étude;

tsfm_au_tc : Le taux de transfert modal de l'auto vers le TC, pour chaque déplacement;

tsfm_tc_au : Le taux de transfert modal du TC vers l'auto, pour chaque déplacement;

$fexp_ap_autc$: Nombre de déplacements auto transférés au TC;

$fexp_ap_tcau$: Nombre de déplacements TC transférés à l'auto;

$fexp_av$: Facteur d'expansion prévisionnel du déplacement au scénario d'étude.

Tout d'abord, pour chaque déplacement auto ou TC, on obtient les ratios des temps TC/auto pour les deux scénarios :

$$ratioautc_av = \frac{temps_{tc}}{temps_{auto}} \text{ (scénario de base)}$$

$$ratioautc_ap = \frac{temps_{tc}}{temps_{auto}} \text{ (scénario d'étude)}$$

Ensuite, on déduit la part modale associée à ce ratio selon la courbe de tendance, pour les deux scénarios :

$$qautc = a + \left(\frac{e^{b \cdot ratioautc_av}}{c + e^{b \cdot ratioautc_av}} \right)$$

$$pautc = a + \left(\frac{e^{b \cdot ratioautc_ap}}{c + e^{b \cdot ratioautc_ap}} \right)$$

Troisièmement, on calcule le taux de transfert modal vers chaque mode :

$$tsfm_au_tc = \frac{pautc - qautc}{1 - qautc}$$

$$tsfm_tc_au = \frac{qautc - pautc}{qautc}$$

Finalement, on calcule le nombre de déplacements transférés:

$$Fexp_ap_autc = tsfm_au_tc * fexp_av$$

$$Fexp_ap_tcau = tsfm_tc_au * fexp_av$$

Le seuil minimal d'un transfert pour qu'il soit considéré est de 0,5. Ces étapes sont effectuées pour les deux autres types de transfert, soit AU-BI et TC-BI.

5.5 Sous-modèle de transfert modal pour les déplacements bimodaux

Les déplacements bimodaux sont plus complexes à considérer, car le temps de déplacement dépend du point de jonction choisi. Le choix de la jonction dépend de nombreux facteurs, notamment, le temps d'accès en voiture, le temps de transport vers la destination en TC, la taille du stationnement, l'intensité du service TC au lieu de jonction, etc.

5.5.1 Univers de choix restreint (UCR)

Dans le scénario de projet, de nouvelles jonctions sont souvent disponibles pour les usagers, ce qui peut engendrer de nouveaux déplacements bimodaux pour les usagers du TC ou de l'auto. De plus, les usagers bimodaux actuels pourraient décider de changer de point de jonction. Comme le temps de parcours varie en fonction du point de jonction, il faudrait faire l'application de la courbe de transfert on doit estimer les temps de parcours bimodaux pour chacune des options de point de jonction.

Cependant, il est invraisemblable que l'ensemble des jonctions soit considéré comme choix potentiel pour tous les déplacements bimodaux; le nombre de jonctions dans une région peut atteindre les centaines. Ainsi, il est nécessaire de réduire considérablement le nombre de choix ce qui faciliterait l'élaboration d'un modèle de choix de jonction. Une « mesure d'attractivité » qui est calculée pour chaque jonction, pour ne conserver que les 10 plus « attractives ». Étant donné que nous connaissons la jonction déclarée pour les bimodaux de l'enquête Origine-Destination, il est possible de juger de la pertinence de la mesure d'attractivité (l'objectif étant d'avoir le plus de jonctions déclarées parmi les 10 jonctions les plus attractives).

Après de nombreuses analyses, la mesure d'attractivité produisant les meilleurs résultats est simplement la distance à vol d'oiseau OJ. En d'autres termes, ce sont les 10 jonctions les plus proches de l'origine qui font partie de l'univers de choix restreint (UCR) pour ce déplacement. On procède ensuite à une analyse des déplacements pour lesquels la jonction déclarée ne fait pas partie de l'UCR défini. L'analyse de ces erreurs révèle parfois un certain nombre de jonctions plus éloignées qui semblent avoir un pouvoir d'attraction notable. Lorsqu'une grande concentration est notée, on ajoute également ces jonctions à l'UCR de tous les déplacements. On vient ensuite estimer les temps de parcours bimodaux pour chaque déplacement en fonction de tous les points de jonction faisant partie de l'UCR.

5.5.2 Modèle de choix de jonction

Dans le scénario d'étude, des temps de parcours pour chaque jonction de l'UCR sont maintenant disponibles. Pour déterminer quelle jonction est celle offrant la meilleure option de point de jonction, un modèle de choix de jonction a été développé. Le choix d'une jonction dans un déplacement bimodal est dépendant d'une multitude de facteurs. L'objectif de cette étape est d'identifier lesquels exercent une influence statistiquement significative et d'en quantifier leur effet. Cela permettra d'obtenir une équation, ou une fonction d'utilité, qui permet de calculer la probabilité de choisir chaque option dans l'univers de choix. La régression choisie est le logit multinomial.

À noter qu'un modèle parfait qui reproduit la réalité à 100% ne peut pas exister. Il existe dans la population des comportements et des décisions qui ne peuvent pas toujours être captés par les variables disponibles dans nos bases de données. Il en revient alors au modélisateur de décider du moment où l'amélioration marginale d'un modèle ne vaut plus l'effort requis pour y parvenir. C'est à ce moment où l'« art » de la modélisation rentre en compte.

La régression logistique multinomiale est testée selon plusieurs combinaisons de variables afin d'obtenir le meilleur résultat possible. C'est ici que les variables susceptibles d'influencer le choix de jonction sont identifiées. Des exemples de variables qui ont été utilisées dans ce modèle : temps de parcours modélisé en auto entre l'origine et la jonction, jonction ayant moins de 100 déplacements déclarés dans l'Enquête Origine-Destination, la jonction est située à dans un sous-territoire spécifique, temps de parcours TC la jonction et la destination, nombre de places de

stationnements auto disponibles à la jonction, la jonction donne accès à un mode lourd, tortuosité du déplacement, etc.

Cette étape nécessite une connaissance des résultats statistiques des régressions afin de juger adéquatement de sa qualité. Deux indices sont considérés pour juger de la robustesse statistique du modèle :

- Le t-stat

Cet indice est examiné pour chaque variable de la fonction d'utilité et permet de juger de la significativité statistique de son impact sur le choix de jonction. Le t-stat est simplement l'estimation du coefficient de la variable (son impact) divisé par sa marge d'erreur. En principe, seules les variables avec un t-stat supérieur à 1,96 sont conservées (le signe du t-stat est sans importance) – cela correspond à un seuil de signification de 95%, généralement utilisé dans la littérature. Il peut toutefois être acceptable de conserver des variables avec un t-stat inférieur à cette limite, si le modélisateur estime qu'il est primordial d'avoir cette variable dans son modèle. Au final, il en vient au modélisateur de juger de la pertinence de chaque variable testée.

- Indice de confusion

Ce deuxième indice est obtenu en appliquant le modèle de choix de jonction aux bimodaux existant et en comparant les jonctions déclarées à celles que le modèle simule. Autrement dit, la capacité du modèle à reproduire le choix déclaré est évaluée. Plus particulièrement, la jonction déclarée est comparée avec la jonction simulée pour chaque déplacement bimodal ayant servi à calibrer le modèle.

5.5.3 Application du transfert modal pour les déplacements bimodaux

La logique des courbes de transfert modal ne peut pas s'appliquer pour calculer le transfert BI-BI puisque c'est le même mode avant et après. La méthodologie suivante a été développée afin de quantifier ce type de transfert. Un exemple sera utilisé afin d'illustrer concrètement cette méthodologie.

Dans cet exemple fictif illustré au Tableau 1, il y a 5 choix de jonction, dont celle qui a été déclarée dans l'enquête Origine-Destination. Le facteur prévisionnel (f_{exp_av}) de ce déplacement est de 30, et 5 de ces déplacements ont déjà été transférés vers l'auto (3) et le TC (2).

Tout d'abord, une probabilité de choix est associée à chaque jonction potentielle d'un déplacement bimodal existant à partir de la fonction d'utilité développée. Pour qu'il y ait un potentiel de transfert de la jonction déclarée vers une autre jonction, deux conditions doivent être respectées :

1. La probabilité de choisir l'option dans le scénario d'étude doit correspondre au moins à 90% (hypothèse) de la probabilité de la meilleure option dans ce scénario d'étude. Autrement dit, **l'attractivité absolue** du choix au scénario d'étude est évaluée. Dans cet exemple, la jonction la plus attrayante dans le scénario d'étude est la troisième jonction, avec 33% de probabilité d'être choisie; le seuil minimal pour considérer les autres jonctions est alors de $(0,9) \times (33\%) = 29,7\%$. Ainsi, toutes les jonctions ayant au moins 29,7% de probabilité rencontreraient la condition 1.

2. La différence de l'attrait de l'option potentielle entre les deux scénarios doit être égale ou supérieure à la différence de celle de la jonction déclarée dans l'enquête OD. Autrement dit, **l'attractivité relative** du choix par rapport au scénario de base est évaluée. Dans cet exemple, la jonction déclarée (jonction 2) s'est améliorée de 5%. Les options qui ont au moins 5% d'amélioration respectent alors la condition 2.

Tableau 1 – Exemple d'application du transfert modal BI-BI

Jonction (choix)	Probabilité (scénario de base)	Probabilité (scénario d'étude)	Condition 1 respectée	Condition 2 respectée
1	20%	30%	1	1
2*	20%	25%	-	-
3	30%	33%	1	0
4	2%	10%	0	1
5	28%	2%	0	0

*La jonction 2 est la jonction déclarée dans l'enquête OD.

Seule l'option 1 respecte les deux conditions. La prochaine étape est alors de trouver le nombre de déplacements transférés vers cette jonction. Les variables suivantes sont définies :

f_{exp_av} : Facteur d'expansion prévisionnel du déplacement au scénario d'étude;

$f_{exp_ap_biau}$: Nombre de déplacements bimode transférés à l'auto;

$f_{exp_ap_bitc}$: Nombre de déplacements bimode transférés au TC;

$f_{exp_av_nt}$: Facteur d'expansion non transféré du déplacement;

$prob_decl_av$: Probabilité de la jonction déclarée pour le scénario de base;

$prob_decl_ap$: Probabilité de la jonction déclarée pour le scénario d'étude;

$diff_rel_decl$: Taux de changement entre les deux scénarios pour la jonction déclarée;

$prob_opt_av$: Probabilité de la jonction potentielle pour le scénario de base;

$prob_opt_ap$: Probabilité de la jonction potentielle pour le scénario d'étude;

$diff_rel_opt$: Taux de changement entre les deux scénarios pour la jonction potentielle;

$tsfm_bi_bi$: Taux de transfert modal bimode à bimode;

$f_{exp_ap_bi}$: Nombre de déplacements bimodes transférés à la nouvelle jonction.

Pour commencer, il faut calculer le nombre de déplacements bimodaux non transférés précédemment. Ceci est obtenu en soustrayant les transferts AU-BI et TC-BI déjà calculés du facteur d'expansion du déplacement considéré dans le scénario d'étude (section 5.4). Autrement dit, pour un déplacement bimodal donné, les transferts vers les modes auto et TC calculés précédemment sont soustraits à son facteur d'expansion afin de ne conserver que les déplacements restants :

$$f_{exp_av_nt} = f_{exp_av} - f_{exp_ap_biau} - f_{exp_ap_bitc}$$

Dans cet exemple, le nombre de déplacements non transférés est de $30 - 3 - 2 = 25$. Le taux de changement de la probabilité de la jonction déclarée et de celui de la jonction potentielle est ensuite calculé :

$$diff_rel_decl = \frac{prob_decl_ap - prob_decl_av}{prob_decl_av}$$

$$diff_rel_opt = \frac{prob_opt_ap - prob_opt_av}{prob_opt_ap}$$

Dans ce cas, cela donnerait un taux de changement de 25% et de 33% pour les jonctions déclarées et potentielles, respectivement. Il est important de noter que le dénominateur est différent d'une équation à l'autre. La raison est que le taux de changement pour la jonction potentielle est calculé par rapport à la situation d'après pour s'assurer que le résultat ne dépasse jamais 100%. Cela évitera d'obtenir des résultats aberrants dans la prochaine étape, qui consiste à calculer le taux de transfert selon la moyenne des taux de changements :

$$tsfm_bi_bi = \frac{diff_rel_opt - diff_rel_decl}{2}$$

Le résultat du transfert serait alors $(33-25)/2 = 4\%$ de transfert. Cela semble un résultat acceptable étant donné que la jonction déclarée a été améliorée et que l'option potentielle qui respecte les deux conditions ne représente pas un choix assez différent de la situation de base pour susciter un grand changement de comportement. Finalement, le nombre de déplacements transférés est obtenu :

$$Fexp_ap_bi = tsfm_tc_bi * fexp_av_nt$$

Ainsi, un nombre de déplacements de $(4\%)*(25) = 1$ vers la jonction 1 est déterminé. Il reste alors 24 déplacements vers la jonction déclarée, la jonction 2.

5.5.4 Conducteur à l'origine (co) vs passager à l'origine (po)

Les déplacements bimodaux sont catégorisés en deux familles : les conducteurs à l'origine, où le premier segment du trajet est auto-conducteur (co), et les passagers à l'origine (po), où le premier segment du trajet est auto-passager. Lors d'un transfert à un mode bimodal, le sous-mode assigné dépendra du mode déclaré dans l'enquête. Le Tableau 2 suivant résume les différentes combinaisons possibles.

Tableau 2 : Type de bimode (co vs po) suite à un transfert selon le mode avant

Mode avant	Mode après
Auto (ac)	Bimode (co)
Auto (ap)	Bimode (po)
TC	Bimode (co)
Bimode (co)	Bimode (co)
Bimode (po)	Bimode (po)

Il est important de distinguer ces deux catégories, car il existe une contrainte aux transferts pour les co qui n'affecte pas le po. En fait, tous les transferts au mode co demeurent des transferts « potentiels » jusqu'à ce que la capacité de stationnement aux jonctions soit prise en compte. En d'autres termes, s'il reste de la place de stationnement à la jonction vers laquelle se fait le transfert, ce dernier sera confirmé. Sinon, le transfert est annulé.

5.5.5 Prise en compte de la capacité de stationnement auto aux jonctions pour les transferts vers le mode bimodal (co)

Le nombre de places de stationnement à une jonction contraint le nombre de déplacements qui y seront transférés. Une méthodologie a été développée afin de prioriser les transferts vers le mode bimodal (co) selon le type de transfert et l'heure de déplacement déclarée. C'est un processus itératif qui « remplit » graduellement les jonctions en suivant un ordre de priorisation, jusqu'à ce que toutes les jonctions soient à capacité ou que tous les transferts bimodaux (co) trouvent une place de stationnement.

Afin d'alléger le texte, le nombre de places de stationnement automobile sera simplement désigné « capacité » pour le reste du texte. D'autre part, un déplacement bimodal dans cette section est nécessairement un déplacement conducteur à l'origine (co). On définit les variables suivantes :

$fexp_nt$: Le nombre de déplacements (bimodes) à la jonction déclarée qui n'ont pas été transférés aux modes suivant - auto, TC et bimode (à une autre jonction) :

$capac_auto$: La capacité à une jonction;

$capac_resid$: La capacité résiduelle à une jonction.

La première étape est de trouver le nouveau nombre de déplacements bimodaux déclarés qui n'ont pas été transférés à une autre jonction. Pour chaque déplacement déclaré bimodal, on soustrait le nombre de déplacements transférés vers une nouvelle jonction à son ancien nombre de déplacements non transférés. S'il y a un transfert potentiel à plus d'une jonction pour ce déplacement, celle ayant le plus grand nombre de déplacements transférés est considérée :

$$fexp_nt = fexp_av_nt - \max(fexp_ap_bi)$$

Les déplacements aux jonctions déclarés qui n'ont pas été transférés serviront à obtenir la capacité résiduelle à chaque jonction. Cette capacité représente en fait le nombre de places de stationnements disponibles pour accueillir les transferts.

$$capac_resid = capac_auto - \Sigma fexp_nt$$

La capacité résiduelle aux jonctions étant maintenant connue, le remplissage est effectué en priorisant les types de transfert suivants :

1. Les déplacements bimodaux transférés en bimode vers une autre jonction (BI-BI);
2. Les déplacements auto (ac) transférés en bimode (AU-BI);
3. Les déplacements TC transférés en bimode (TC-BI);

À l'intérieur de chaque catégorie, les déplacements sont ordonnés selon l'heure de départ déclarée dans l'enquête OD. S'il y a plus d'une jonction avec un potentiel de transfert pour un déplacement donné, elles sont ordonnées selon la probabilité de les choisir (voir section 5.5.2). Un déplacement peut être transféré à une jonction avec la probabilité maximum.

3.7 Bilan initial du transfert modal

Une fois tous les transferts modaux estimés, un nouveau fichier en format enquête Origine-Destination est créé faisant le solde des transferts modaux de chaque type. De nouvelles observations sont créées dans le fichier résultat pour chaque type de transfert ayant un facteur d'expansion correspondant au transfert calculé, lesquels sont soustraits aux déplacements desquels ils sont issus.

Une matrice de déplacements en automobile est ensuite extraite à partir de la nouvelle demande post-transfert modal. De nouveaux temps de parcours en automobile sont calculés dans Emme. Cela est nécessaire, car les temps de parcours en automobile sont fonction de la demande, or si la demande en auto est modifiée dans le processus de transfert modal, les temps de parcours auto vont changer.

Il est donc ensuite nécessaire de faire des itérations avec le modèle de transfert modal à partir des nouveaux temps de déplacement en automobile. Généralement, le modèle converge après 2 ou 3 itérations.

3.8 Bilan final du transfert modal

Une fois la convergence atteinte, un nouveau fichier de demande post-transfert modale est disponible dans un format compatible avec les données des enquêtes Origine-Destination. Cela permet de faire toute analyse ou modélisation nécessaire avec les méthodes habituelles.