

MODUS v2.1

Documentation détaillée du modèle de déplacements de la DREIF

Mai 2008



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ministère de l'Écologie
du Développement
et de l'Aménagement
durables

Historique des versions du document

Version	Auteur	Date	Commentaires
1	Eric Ladegaillerie	05/05/08	Version initiale – mise en service de MODUS v2.1

Affaire suivie par

Eric Ladegaillerie

DREIF / Pôle Déplacements / Division Études et Stratégie des Déplacements

☎ : 01 40 61 85 03

@ : eric.ladegaillerie@equipement.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX.....	9
PRÉSENTATION.....	11
1. Les modèles de déplacements, outils d'aide à la décision.....	11
1.1. Qu'est-ce que la modélisation ?	11
1.2. Les modèles de déplacements en contexte opérationnel.....	11
2. La modélisation à la DREIF jusqu'à MODUS v2.0.....	12
2.1. Rappel historique.....	12
2.2. Le développement de MODUS v2.1	13
PRINCIPES DE MODÉLISATION UTILISÉS DANS MODUS v2.1	15
1. Typologie de MODUS v2.1.....	15
2. Les constructions préalables	17
2.1. Une vision discrétisée du territoire : le zonage.....	17
2.2. Une vision synthétique de l'urbanisation : les occupations des sols	19
2.3. Une vision schématisée de l'offre de transport : les réseaux.....	19
3. Principes de modélisation de la demande de déplacements dans MODUS v2.1 ...	21
3.1. La référence : l'Enquête Globale Transport.....	21
3.2. La description de la demande de déplacements.....	22
3.3. La segmentation de la demande : catégories de désagrégation et motifs	23
3.4. La caractérisation des déplacements : utilité et processus de décision	26
4. La modélisation du trafic : confrontation entre l'offre et la demande	27
4.1. Principes et objectifs	27
4.2. La réalisation des déplacements : l'affectation	27
ANALYSE DÉTAILLÉE DU FONCTIONNEMENT DE MODUS v2.1.....	29
1. L'architecture de MODUS v2.1	29
2. La préparation des données	30
2.1. Les données zonales.....	30
2.2. Les données interzonales.....	31
3. La détermination des utilités.....	32
3.1. La structure des utilités	33
3.2. Méthode de calibrage des utilités	35
4. L'étape de génération	38
4.1. Calcul des émissions et des attractions.....	38
4.2. Calibrage des émissivités et attractivités.....	40

5. L'étape de distribution	44
5.1. Détermination des flux par OD	44
5.2. Le calibrage de la distribution.....	47
6. L'étape de choix modal	49
6.1. Détermination du choix de mode	49
6.2. Calibrage du choix modal.....	49
7. La finalisation des matrices.....	52
7.1. Passage aux matrices horaires	53
7.2. Finalisation des matrices VP	54
7.3. Finalisation des matrices TC.....	57
8. L'étape d'affectation	57
8.1. Structure – concept de coût généralisé.....	57
8.2. Affectation des matrices VP	58
8.3. Affectation des matrices TC	63
UTILISATION DE MODUS v2.1.....	65
1. Utilisation opérationnelle de MODUS v2.1.....	65
1.1. Utilisation en situation actuelle : la nécessité du calage.....	65
1.2. Utilisation en mode scenario : le report de calage et le bouclage du modèle	65
2. Résultats de MODUS v2.1	65
2.1. Analyse du comportement de MODUS v2.1	65
2.2. Atouts de MODUS v2.1.....	65
2.3. Limites de MODUS v2.1.....	65
ANNEXE 1 : SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES.....	65
ANNEXE 2 : QUEL FUTUR POUR MODUS ?	65
ANNEXE 3 : UTILITÉS ET CHOIX DISCRETS.....	65
1. La notion d'utilité	65
1.1. Dans la théorie économique classique.....	65
1.2. Dans la théorie économique néo-classique.....	65
1.3. L'utilité aléatoire	65
2. Les modèles de choix discrets : exemple du modèle Logit	65
2.1. Définition du modèle Logit	65
2.2. Séquence de choix et combinaison d'utilités	65

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Zonage de base de MODUS v2.1	18
Figure 2 : Zonage TC de MODUS v2.1	18
Figure 3 : Structure de réseau avec exemple de chemin	20
Figure 4 : Les 4 typologies de déplacements ayant lieu à l'heure de pointe (cas de l'HPM)	23
Figure 5 : Structure de matrice OD	23
Figure 6 : Volume des déplacements dans l'EGT 2001 par motifs de MODUS v2.1	25
Figure 7 : Architecture de MODUS v2.1	29
Figure 8 : Zones de la Carte Orange en 2001 et tarification TC de MODUS v2.1	32
Figure 9 : Les 13 classes de portée utilisées pour l'analyse des outputs de MODUS v2.1	36
Figure 10 : Choix modal observé sur les OD de l'EGT 2001 par classe de portée	37
Figure 11 : Choix modal simulé sur les OD de l'EGT 2001 par classe de portée	37
Figure 12 : Calibrage de la génération - régression préliminaire pour élimination des outliers	41
Figure 13 : Calibrage de la génération - régression finale pour déterminer les paramètres	41
Figure 14 : Émissions et attractions observées et simulées par motif	42
Figure 15 : Émissions et attractions observées et simulées par département	42
Figure 16 : Émissions et attractions observées et simulées par catégorie et motif	43
Figure 17 : Émissions et attractions observées et simulées par catégorie et département	44
Figure 18 : Matrice OD initiale et marges cibles	46
Figure 19 : Exemples de matrices OD résultant de 2 itérations du Fratar	46
Figure 20 : Volumes totaux de déplacements observés et simulés par classe de portée	49
Figure 21 : Volumes TC observés et simulés par classe de portée	50
Figure 22 : Volumes VP observés et simulés par classe de portée	50
Figure 23 : Volumes MD observés et simulés par classe de portée	51
Figure 24 : Parts modales observées dans l'EGT 2001 par classe de portée	51
Figure 25 : Parts modales simulées dans MODUS v2.1 par classe de portée	52
Figure 26 : Ajout d'une matrice cordon et types de flux	56
Figure 27 : Intégration des flux d'un générateur spécifique	56
Figure 28 : Distribution log-normale de la valeur du temps dans l'affectation de MODUS v2.1	60
Figure 29 : Modèle prix-temps - Choix d'itinéraire selon la valeur du temps	59
Figure 30 : Courbes temps – débit de MODUS v2.1	62
Figure 31 : Calage et report de calage	65

Figure 32 : Évolution des volumes des matrices VP au cours du bouclage de MODUS v2.1 ...	65
Figure 33 : Évolution de l'indicateur de convergence du bouclage de MODUS v2.1	65
Figure 34 : Évolution du trafic routier en Île de France depuis 25 ans.....	65
Figure 35 : Différence de charges HPS entre les horizons actuels et 2020 dans MODUS v2.1	65
Figure 36 : Arbre figurant une séquence de choix.....	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des réseaux de MODUS v2.1	21
Tableau 2 : Attributs principaux des réseaux de MODUS v2.1	21
Tableau 3 : Table d'agrégation des motifs par origine et destination	24
Tableau 4 : Valeurs par mode des variables intervenant dans les utilités modales	34
Tableau 5 : Paramètres des utilités modales	35
Tableau 6 : Émissivités de MODUS v2.1	39
Tableau 7 : Attractivités de MODUS v2.1	39
Tableau 8 : Taux de désagrégation par catégorie en émission et attraction.....	40
Tableau 9 : Paramètres de distribution.....	45
Tableau 10 : Caractéristiques des matrices finalisées pour l'affectation.....	52
Tableau 11 : Taux horaires TC, VP, MD.....	54
Tableau 12 : Taux d'occupation VP.....	55
Tableau 13 : Types de tronçons dans MODUS v2.1 et coefficient « a » associé.....	61
Tableau 14 : indicateurs journaliers actuels et 2020 dans MODUS v2.1	65
Tableau 15 : trafic routier HPS actuel et 2020 en sortie de MODUS v2.1.....	65
Tableau 16 : trafic routier HPS actuel et 2020 en sortie de MODUS v2.0.....	65

PRÉSENTATION

1. LES MODÈLES DE DÉPLACEMENTS, OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION

1.1. QU'EST-CE QUE LA MODÉLISATION ?

Une modélisation est une description schématique et reproductible de certaines composantes de la réalité par le biais d'indicateurs¹. Le modèle en est la mise en œuvre opérationnelle et se fonde sur la combinaison :

- de *variables*, qui caractérisent de manière supposée exhaustive les états de la réalité à appréhender ;
- de *paramètres*, qui sont des invariants momentanés des comportements, calibrés² sur les phénomènes observés, et dont l'évolution est supposée connue du modélisateur³ ;
- de *lois mathématiques* qui associent variables et paramètres pour déterminer les indicateurs décrivant les aspects de la réalité considérée.

Le corps même du modèle est constitué des paramètres et des lois mathématiques. Les variables n'en sont qu'une donnée d'entrée : chaque jeu de variables décrit un état de la réalité, appelé *scénario*, que la modélisation permet de caractériser.

1.2. LES MODÈLES DE DÉPLACEMENTS EN CONTEXTE OPÉRATIONNEL

Les modèles de déplacements ont pour dessein d'appréhender les comportements de mobilité. Leurs utilisations sont variables ; schématiquement, deux catégories se détachent : certains ont vocation à alimenter les travaux de recherches ou les études très amont (exemple du modèle MATISSE de l'INRETS) ; d'autres ont un aspect directement opérationnel.

C'est à ce second groupe qu'appartient le modèle de déplacements de la DREIF. Sa finalité est de tester des scénarii correspondant à la réalisation prévue ou supposée de projets et de politiques publiques affectant le système de transports. Il joue donc un rôle d'aide à la décision.

Ce contexte opérationnel est à la base de la constitution même du modèle et impose des choix fondamentaux : adaptabilité, simplicité de mise en œuvre, rapidité de calcul.

¹ Dans le cas de MODUS v2.1, ce sont ceux qui caractérisent les déplacements : structure géographique (origine, destination, parcours), structure temporelle (horaires, durée) , intensité (flux).

² Le « calibrage » d'un paramètre est la détermination de sa valeur sur la base des données disponibles afin que la loi de comportement dans laquelle il intervient représente au mieux la réalité modélisée.

³ Un cas d'école est celui de modèles qui visent à représenter les aspects futurs de la réalité et pour lesquels on suppose l'invariance dans le temps des paramètres. C'est le cas de MODUS v2.1.

2. LA MODÉLISATION À LA DREIF JUSQU'À MODUS v2.0

2.1. RAPPEL HISTORIQUE

C'est dans un contexte de rationalisation des choix budgétaires que la DREIF lance au début des années 1970 ses premiers développements de modélisation des déplacements. Ces travaux permettent de formaliser des processus de calcul de la demande de déplacements et d'utilisation des réseaux routiers et de transports collectifs.

Le modèle est ré-estimé après le RGP¹ 1982 et l'EGT² 1983 pour prendre le nom de « Chaîne 85 ». La Chaîne 85 est un modèle avant tout adapté à l'étude du système de transport routier. Le calcul de la demande de déplacements s'effectue selon un processus essentiellement empirique, fondé sur l'estimation des déplacements domicile-travail. La mise en œuvre du modèle est lourde : la Chaîne 85 est hébergée sur le calculateur du SETRA, les temps de calculs sont importants.

Au début des années 1990, des développements significatifs sont réalisés : MODUS, acronyme signifiant « MOdèle de Déplacements Urbains et Suburbains », voit le jour. Des avancées théoriques sont intégrées : structure en 4 étapes, modèle de choix discrets. MODUS contribue à alimenter les études techniques réalisées par l'État et relatives à l'élaboration du Schéma Directeur de la Région Île-de-France de 1994.

La seconde moitié des années 1990 voit s'accomplir une phase importante d'amélioration de MODUS : passage de la chaîne sous format micro-informatique et permettant un accès plus direct au modèle, développement de la partie transports collectifs, perfectionnement de la partie routière grâce aux travaux de l'INRETS.

Les années 2000 offrent de nombreuses opportunités : de nouvelles données sont disponibles avec la réalisation d'un RGP en 1999 et d'une EGT en 2001, les temps de calculs ont fortement diminué grâce à l'essor de l'informatique. MODUS offre certes une base robuste, mais certaines imperfections sont criantes : son calibrage est obsolète ; certaines variables en entrée du modèle doivent rester figées sous peine d'induire des résultats incontrôlés ; des choix dans la modélisation sont discutables et discutés : présence d'une dentelle de redressement finale et absence de bouclage notamment.

La DREIF ouvre donc en 2003 le chantier d'une refonte totale de son modèle. C'est la naissance de MODUS v2.0 qui apporte des avancées certaines : architecture robuste du modèle, prise en compte de la captivité aux TC, suppression de la dentelle, méthodologie de calibrage des paramètres, intégration d'indicateurs de qualité. Il restera pourtant inachevé sous sa forme originelle pour des raisons essentiellement d'ordre technique : sa mise en œuvre est trop lourde pour pouvoir le tester efficacement et le mettre en production.

C'est pour sortir de cette impasse que la DREIF décide fin 2006 de le réutiliser comme socle d'une nouvelle version, avec deux objectifs : consolider les acquis théoriques et disposer d'un outil opérationnel.

¹ RGP : Recensement Général de la Population. Les quatre derniers RGP ont eu lieu en 1975, 1982, 1990 et 1999

² EGT : Enquête Globale de Transport de l'Île-de-France. Elle dresse un panorama global des caractéristiques de la mobilité des Franciliens. Les dernière EGT ont été réalisées à la suite des RGP, dont elles utilisent les bases de sondage : 1976, 1983, 1991 et 2001.

2.2. LE DÉVELOPPEMENT DE MODUS v2.1

MODUS v2.1 est issu du perfectionnement direct des travaux de MODUS v2.0. Les travaux qui ont abouti à une chaîne complète et totalement fonctionnelle se sont déroulés de novembre 2006 à mai 2007.

MODUS v2.1 conserve l'architecture générale de la version précédente tout en l'améliorant à la marge ; il réadapte et améliore les méthodes de calibrage utilisées. En ce sens, MODUS v2.1 n'innove pas, mais consolide les acquis de la version précédente.

En revanche, la grande nouveauté de MODUS v2.1 est l'accent mis sur le caractère opérationnel du modèle. En s'appuyant sur de nombreuses automatisations, il offre de nouvelles possibilités d'exploitation et de contrôle de la fiabilité des résultats. Au bilan, les écueils techniques sur lesquels a achoppé MODUS v2.0 sont désormais corrigés, permettant le déploiement de fonctionnalités essentielles.

Un panorama complet de son fonctionnement est présenté dans ce document.

PRINCIPES DE MODÉLISATION UTILISÉS DANS MODUS V2.1

MODUS v2.1 a pour buts généraux :

- d'évaluer la demande de déplacements des modes motorisés (cf partie 3 de ce chapitre) ;
- de confronter l'offre et la demande afin d'en déduire la qualité de service offerte (cf partie 4 de ce chapitre).

Ce chapitre présente les principes généraux de modélisation mis en œuvre pour répondre à ces objectifs, sans entrer pour l'instant dans le détail du fonctionnement du modèle.

1. TYPOLOGIE DE MODUS v2.1

En se conformant au vocabulaire de la modélisation, voici résumées de manière synthétique les grands partis pris de modélisation dans MODUS v2.1 :

- *Un modèle régional* : MODUS v2.1 s'intéresse à la mobilité des franciliens, et son périmètre d'action géographique couvre donc l'intégralité de la région Île-de-France ;
- *Un modèle à 4 étapes* : cette expression définit l'architecture de MODUS v2.1, constituée d'une combinaison de quatre étapes distinctes et successives qui seront détaillées par la suite : la « génération », la « distribution », le « choix modal », l'« affectation ».
- *Un modèle multimodal* : MODUS v2.1 intègre trois modes de transport, la voiture particulière (VP), les transports en commun (TC) et les modes doux (MD), dont deux avec affectation de la demande (VP et TC).
- *Un modèle agrégé* : les lois comportementales des étapes de génération, distribution et choix modal de MODUS v2.1 s'appliquent à des catégories de populations dont les déplacements présentent des caractéristiques communes. Les modèles « désagrégés » se placent quant à eux au niveau de l'individu, les déplacements dépendant alors directement des caractéristiques individuelles¹.
- *Un modèle doublement contraint* : cette formule caractérise les contraintes qui encadrent la relation entre les étapes de génération et de distribution (cf partie 5.1 du chapitre « Analyse

¹ Il est possible de raffiner cette description en précisant que MODUS v2.1 est en fait un modèle « agrégé catégoriel » ou « semi-désagrégé », puisqu'il désagrège partiellement la population en raisonnant à l'échelle de sous-groupes considérés comme homogènes en matière de déplacements. Un modèle « désagrégé » est un modèle qui a poussé cette logique de désagrégation jusqu'au bout.

détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 »). Pour mémoire, il existe également des modèles « simplement contraints en émission » et « simplement contraints en attraction ».

- *Un modèle macroscopique* : MODUS v2.1 est un modèle macroscopique car l'étape d'affectation utilise des flux agrégés de déplacements ; les modèles microscopiques se placent quant à eux à l'échelle de l'individu – ou du véhicule – pour en décrire le comportement spécifique.
- *Un modèle statique* : les lois de MODUS v2.1 ont pour but d'aboutir à la description « moyennée » des déplacements ayant lieu durant une tranche horaire bien déterminée, en l'occurrence l'heure de pointe du matin (HPM) et l'heure du pointe du soir (HPS). Le terme « statique » décrit plus généralement les modèles qui se fondent sur des lois décrivant les comportements moyens¹ – horaires ou tout autre pas de temps – contrairement aux modèles dits « dynamiques » qui s'attachent à présenter le déroulement temporel des déplacements.
- *Une affectation VP prix-temps à contrainte de capacité* : la description du trafic routier proposée dans MODUS v2.1 repose sur la prise en compte de deux facteurs : l'arbitrage entre le prix et le temps du déplacement et la limitation du débit de la voirie suite aux phénomènes de congestion.
- *Une affectation TC multi-chemin sans contrainte de capacité* : la gestion du trafic TC de MODUS v2.1 s'appuie sur la combinaison des différents parcours en TC possibles² pour réaliser un déplacement ; il se distingue donc des modèles « mono-chemin » qui ne considère que le chemin considéré comme le plus court. Par ailleurs, MODUS v2.1 ne tient pas compte des limites de capacité des lignes TC.
- *Un modèle bouclé* : MODUS v2.1 est dit « bouclé » car, en mode scénario, il produit des matrices de déplacements à l'équilibre, issus de la réinjection itérative des résultats de l'affectation en entrée de la chaîne de modélisation – opération appelée « bouclage » du modèle (cf partie 1.2.3 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 »).

¹ On pourra faire lien avec les considérations de mécanique des fluides qui caractérisent le « régime permanent » d'un écoulement.

² Dans une certaine limite, notamment de temps et de nombre de correspondances.

2. LES CONSTRUCTIONS PRÉALABLES

Comme pour tout modèle à 4 étapes, la mise en œuvre de MODUS v2.1 suppose diverses constructions préalables ; la qualité de la modélisation repose en grande partie sur leur qualité.

2.1. UNE VISION DISCRÉTISÉE DU TERRITOIRE : LE ZONAGE

Le zonage est une partition du périmètre géographique du modèle en un nombre fini de zones correspondant à l'ensemble des origines et destinations possibles. À chacune d'entre elle est attachée un centroïde, point de départ ou d'arrivée des déplacements (cf ci-dessous, partie 2.3.1 de ce chapitre). Le choix du découpage des zones influe directement sur le fonctionnement du modèle : la précision des résultats augmente avec la finesse du zonage, mais les temps de calculs aussi.

Le zonage de MODUS v2.1 est constitué d'un découpage de l'Île-de-France en 1277 zones dont la taille croît avec l'éloignement de Paris. C'est sur la base de ce zonage que s'effectue l'ensemble des calculs internes de la chaîne du modèle, d'où son nom de « zonage MODUS ».

Son découpage s'appuie sur celui des îlots du RGP 1999. Il est « compatible » avec les limites administratives franciliennes ; selon l'éloignement de Paris, deux cas sont ainsi possibles : une commune est partitionnée en diverses zones ou, inversement, une zone est un regroupement de communes ; en revanche, le zonage s'inscrit entièrement dans les limites départementales.

Le zonage MODUS est utilisé dans l'ensemble des phases concernant les déplacements VP. En fin de chaîne, afin de décrire les déplacements routiers d'origine ou destination non franciliennes, le modèle utilise également 28 zones dites « externes », portant le total à 1305 zones (cf partie 7.2 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 »).

En revanche, l'affectation du mode TC utilise un zonage spécifique de 1192 zones dit « zonage TC », sans zones externes, compatible avec les communes, et dans lequel est inclus le zonage MODUS (autrement dit, les zones TC sont toujours des regroupements de zones MODUS). L'utilisation du zonage TC nécessite une conversion préalable des matrices : cf partie 7.3 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 ».

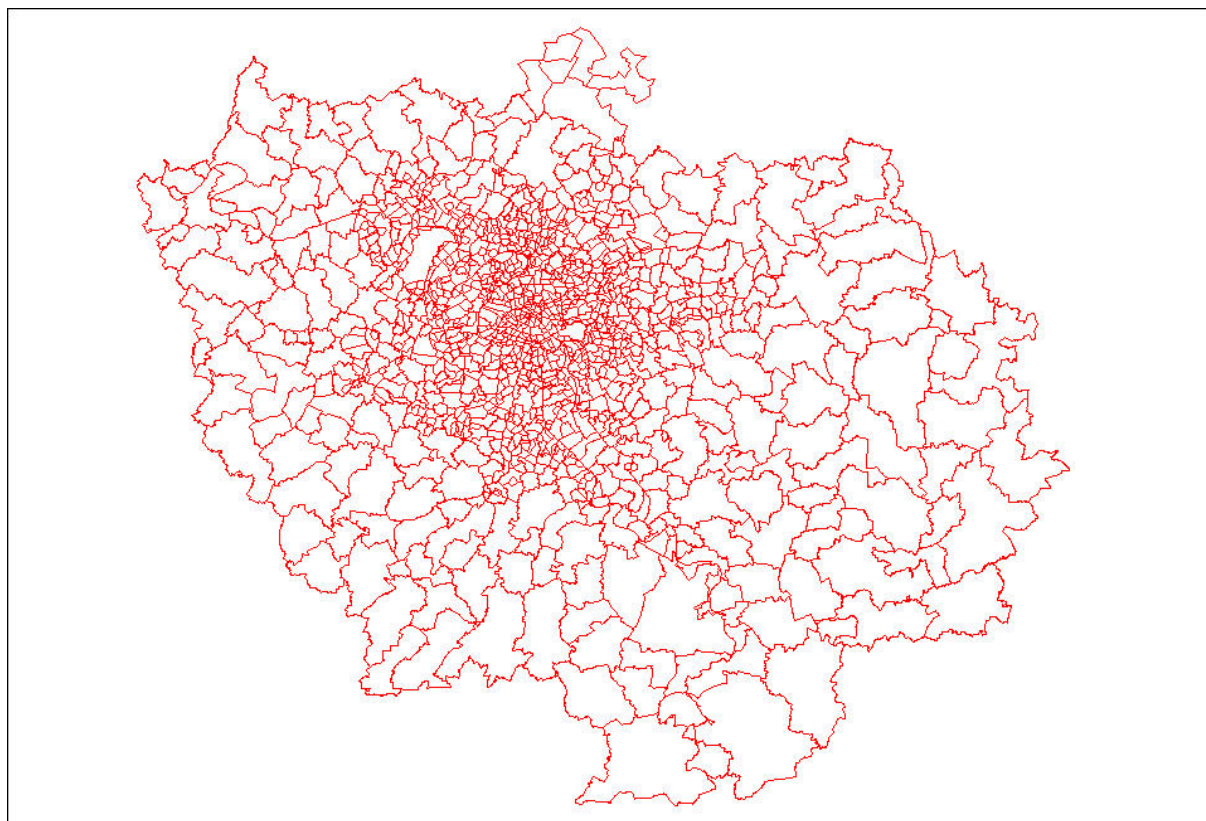


Figure 1 : Zonage de base de MODUS v2.1

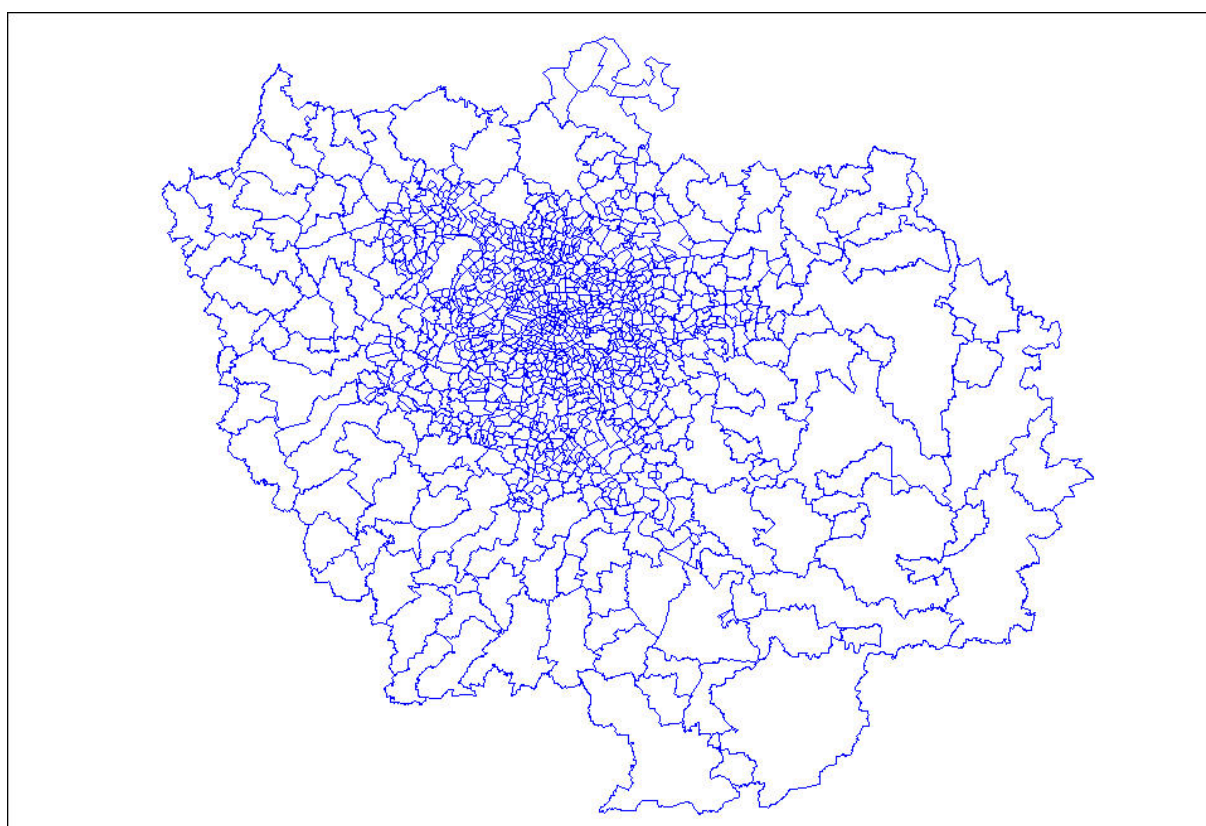


Figure 2 : Zonage TC de MODUS v2.1

2.2. UNE VISION SYNTHÉTIQUE DE L'URBANISATION : LES OCCUPATIONS DES SOLS

Le zonage MODUS est renseigné afin de servir de base géographisée des données socio-démographiques nécessaires à la modélisation ; dans chaque zone est ainsi décrite l'urbanisation par le biais des « occupations des sols », notées OS. Elles donnent accès aux données :

- physiques de la zone : surfaces totales et bâties ;
- de population : totale et active ;
- d'emplois : total, commerce, loisirs, tertiaire ;
- de capacités d'accueil pour les étudiants de l'enseignement supérieur.

2.3. UNE VISION SCHÉMATISÉE DE L'OFFRE DE TRANSPORT : LES RÉSEAUX

2.3.1. LA STRUCTURE DE RÉSEAU

L'offre de transport est appréhendée grâce à la représentation schématique du « réseau », constituée de deux types d'objets :

- les *arcs* qui matérialisent les infrastructures sur lesquelles ont lieu les déplacements : tronçons de voirie pour un réseau VP, voies ferrées, de métro, de tramway, de bus pour un réseau TC.
- les *nœuds* qui sont les extrémités des arcs et matérialisent des points singuliers du réseau : changement de type de voirie, croisement, arrêt de TC, etc.

Signalons un type d'arc et de nœud particulier :

- les *centroïdes* sont des nœuds attachés aux zones et qui constituent le lien entre le zonage et le réseau : ils correspondent aux entrées et sorties du réseau, autrement dit aux points de départ et d'arrivée des déplacements¹. Chaque zone possède un seul et unique centroïde.
- les *connecteurs de centroïde* assure la liaison des centroïdes au réseau de transport par un arc « fictif », sans lien avec la réalité (appelé parfois arc de rabattement dans le cas des TC), qui modélise le déplacement réalisé par les usagers pour rejoindre et quitter le réseau de transport.

Grâce aux centroïdes et aux connecteurs de centroïde, chaque zone est connectée physiquement au système de transport.

La construction des réseaux suppose un certain nombre de choix : hypothèses simplificatrices car tous les tronçons ne sont pas retenus, positionnement des centroïdes, choix de connexion par les connecteurs... Il s'agit de disposer d'une description du réseau répondant aux objectifs de la modélisation, et dont la précision reste comparable à celle du zonage, tout en étant la plus exacte possible.

La figure suivante présente cette structure de réseau, ainsi qu'un chemin entre deux centroïdes :

¹ Les centroïdes constituent en fait les extrémités du graphe constitué par le réseau.

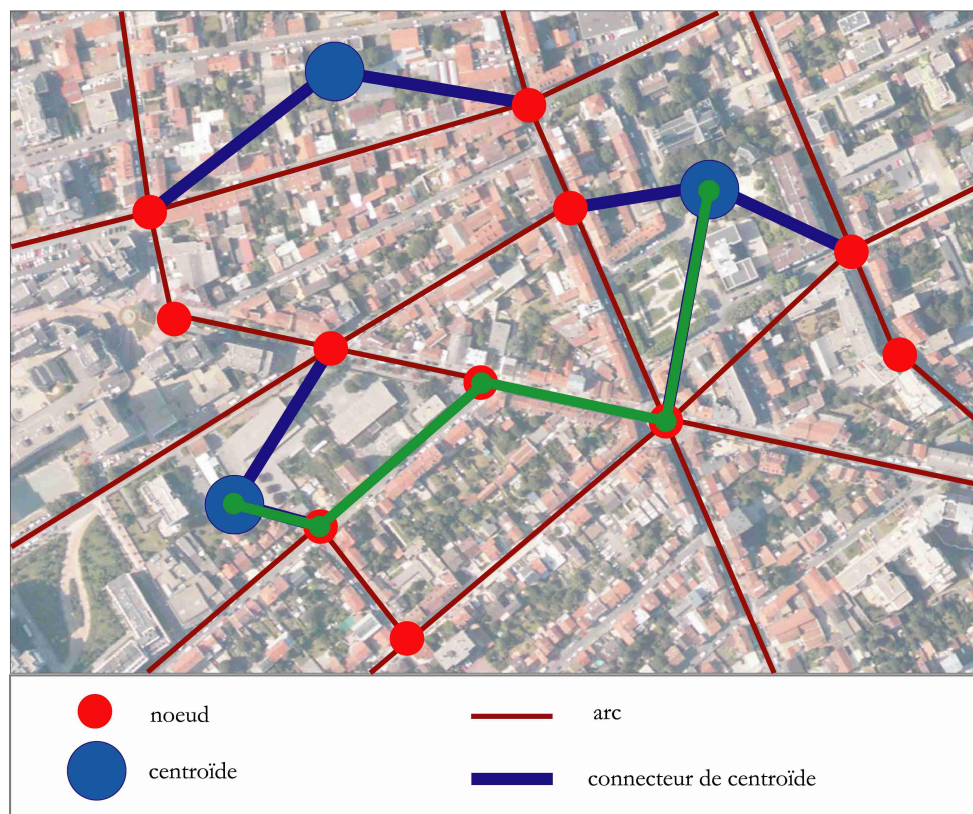


Figure 3 : Structure de réseau avec exemple de chemin

Remarque : une conséquence importante de cette structure de réseau est que les déplacements ayant lieu à l'intérieur d'une même zone – les déplacements « intrazonaux » – sont invisibles sur les réseaux affectés.

Cette structure permet de décrire les systèmes de transports routier et collectifs, soit de manière distincte par la construction de 2 réseaux séparés, soit de manière combinée au travers d'un réseau de base commun. Notons que dans le cas de la description d'un réseau de TC, il faut préciser la structure décrite précédemment par l'adjonction d'objets supplémentaires :

- les *lignes de TC*, qui empruntent les arcs du réseau de base, et se déclinent éventuellement en missions correspondant aux différents services offerts sur une même ligne ;
- les *arrêts*, correspondant à certains nœuds spécifiques auxquels s'effectuent les entrées et sorties des lignes TC.

2.3.2. LES RÉSEAUX DE MODUS v2.1

MODUS v2.1 utilise deux réseaux distincts, VP et TC, dont voici les caractéristiques :

	Réseau VP	Réseau TC
Nœuds	16 800	16 700
Arcs	36 600	50 200
Centroïdes	1 305	1 192
Connecteurs	3 500	16 200
Lignes	-	640
Missions	-	4 200
Arrêts	-	15 900

Tableau 1 : Caractéristiques des réseaux de MODUS v2.1

A l'instar du zonage, les réseaux sont renseignés : les arcs, les nœuds, les lignes, les missions et les arrêts possèdent des attributs qui les caractérisent.

	Réseau VP	Réseau TC
Nœuds	Mouvements autorisés	Arrêt ou non, lignes desservies
Arcs	Longueur, vitesse, capacité, temps de parcours, péage, charge	Longueur, moyen de transport accepté, temps de parcours, charge
Lignes / Missions	-	Arrêts, horaires de service, fréquence, temps de parcours, temps d'arrêt, charge

Tableau 2 : Attributs principaux des réseaux de MODUS v2.1

Les réseaux deviennent de fait des objets opérationnels qui permettent de caractériser les déplacements potentiels (parcours, temps, longueur, coût etc.) et de déterminer leur coût généralisé (cf partie 8.1 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 »).

3. PRINCIPES DE MODÉLISATION DE LA DEMANDE DE DÉPLACEMENTS DANS MODUS v2.1

Le premier objectif de MODUS v2.1 est de représenter la demande de mobilité en Île-de-France. Pour ce faire, une partie des algorithmes constitue un bloc indépendant qui correspond à la « modélisation de la demande »

3.1. LA RÉFÉRENCE : L'ENQUÊTE GLOBALE TRANSPORT

La modélisation de la demande dans MODUS v2.1 s'appuie sur les résultats issus de l'EGT 2001 pour les points suivants : analyse structurelle de la mobilité et conséquence en termes de modélisation, calibrage des paramètres et contrôle de qualité des résultats.

L'enquête présente les réponses fournies par 10 500 ménages sur leurs habitudes journalières de mobilité ; elle permet notamment d'appréhender les caractéristiques des 81 386 déplacements réalisés, fournissant une image de la situation générale en Île-de-France un jour de semaine :

- Données déplacements : modes de transport utilisés, motifs en jeu, horaires, distances...
- Données individus : lieu de résidence, disposition d'une voiture, du permis de conduire...

La précision géographique de l'enquête est élevée : le découpage utilisé est un carroyage régulier de côté 300 m. Sa représentativité est globalement bonne puisque le poids d'une observation – environ 440 – est faible : les 81 386 observations correspondent à environ 35 millions de déplacements quotidiens. Concrètement, cette précision permet de connaître les dynamiques à l'échelle du département, voire plus finement dans les zones où l'échantillonnage est plus resserré (proche banlieue par exemple).

Pour ces raisons, l'EGT 2001 est une source d'information essentielle pour la construction de MODUS v2.1

3.2. LA DESCRIPTION DE LA DEMANDE DE DÉPLACEMENTS

3.2.1. LES MODES CONSIDÉRÉS DANS LE CALCUL DE LA DEMANDE

MODUS v2.1 est un modèle multimodal ; les paragraphes précédents ont apporté des précisions sur ses deux réseaux, VP et TC.

La partie « calcul de la demande » est plus détaillée, puisqu'elle envisage par ailleurs le mode MD (modes doux). Ce dernier n'a pas besoin de la description précise d'un réseau¹ car les cheminements qu'ils engendrent peuvent être approximatés par des lignes droites effectuées sans autre contrainte que celle d'une vitesse de déplacement limitée. En revanche, ils doivent être considérés à part entière dans le calcul de la demande : en offrant une alternative aux modes motorisés sur les courtes distances, ils constituent plus du tiers des déplacements en Île-de-France.

Pour conclure, voici la constitution exacte des trois modes considérés² dans MODUS v2.1 :

- VP : conducteurs et passagers des véhicules particuliers et utilitaires ;
- TC : transiliens, RER, métro, bus, transports scolaires et employeurs ;
- MD : marche, roller, vélo.

3.2.2. LA TEMPORALITÉ DES DÉPLACEMENTS

L'un des objectifs du calcul de la demande de déplacements est d'analyser la qualité de service fournie en retour par l'offre de transport. Pour cela, certaines périodes de la journée sont dimensionnantes pour les modes motorisés : les heures de pointe du matin (HPM) et du soir (HPS). C'est donc sur ces créneaux particuliers qu'est focalisée la modélisation de la demande.

Ces périodes horaires ont été fixées par convention dans MODUS v2.1 comme suit :

- HPM : heure moyenne représentative des déplacements concernant la période 7h – 9h ;
- HPS : heure moyenne représentative des déplacements concernant la période 17h – 19h.

A titre de précision, un déplacement est considéré comme concernant la période horaire 7h – 9h (respectivement 17h-19h) si son départ a lieu avant 9h (resp. 19h) ou son arrivée après 7h (resp. 17h).

¹ Une conséquence est que MODUS v2.1 n'a pas d'affectation MD.

² On remarquera que cette description ne prend en compte ni les taxis, ni les deux roues motorisés, ni les poids-lourds. A noter que ces derniers font l'objet d'un ajout a posteriori à la demande VP (cf partie 7.2 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 »).

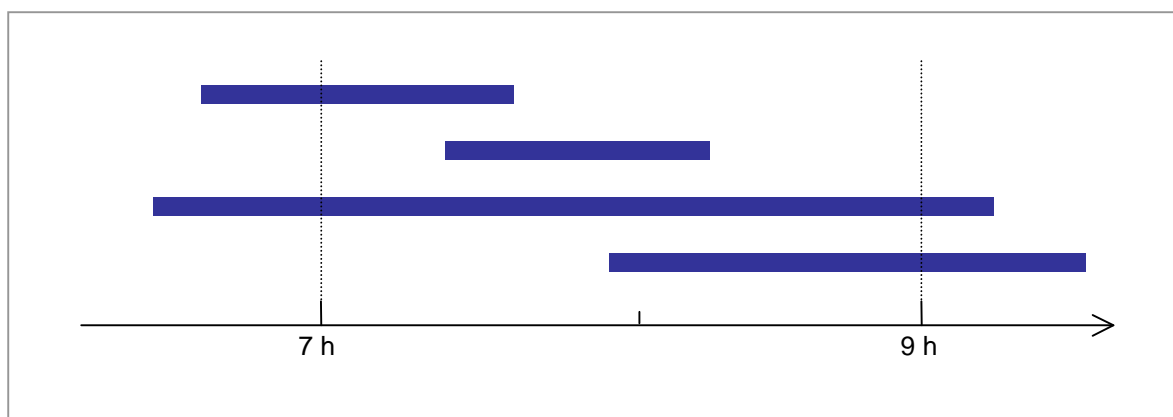


Figure 4 : Les 4 typologies de déplacements ayant lieu à l'heure de pointe (cas de l'HPM)

3.2.3. L'OUTIL DESCRIPTIF DE LA DEMANDE : LA MATRICE OD

La demande de déplacements est appréhendée dans MODUS v2.1 par le biais de « matrices origines-destinations », dites matrices OD, qui représentent les flux (demandés) entre les différentes zones. En ligne figure la zone origine, en colonne la zone destination ; ainsi, la case (i, j) d'une matrice OD correspond au flux au départ de la zone i en destination de la zone j , noté par convention F_{ij} .

O \ D	1	2	j	.....	1277
1				\vdots		
2				\vdots		
\vdots				\vdots		
i	F_{ij}	.....	.....
\vdots				\vdots		
1277				\vdots		

Figure 5 : Structure de matrice OD

Les matrices OD permettent une description contextualisée : demande attachée à un mode particulier, à un horaire spécifique, à une typologie d'utilisateurs ou de déplacements.

Pour résumer, l'objectif opérationnel du calcul de la demande dans MODUS v2.1 est la détermination de matrices OD des modes VP et TC en HPM et HPS par modélisation du comportement des usagers des modes VP, TC et MD.

3.3. LA SEGMENTATION DE LA DEMANDE : CATÉGORIES DE DÉSAGRÉGATION ET MOTIFS

La modélisation se fonde sur l'utilisation de lois comportementales décrivant les processus à caractériser. Dans le cas des modèles de déplacements, il apparaît comme utile de faire des

distinctions dans les traitements effectués afin d'augmenter la pertinence des résultats. Cette opération est qualifiée de « segmentation » ; elle opère sur deux niveaux successifs dans MODUS v2.1 : celui de l'individu tout d'abord, puis celui du déplacement en lui-même.

3.3.1. SEGMENTATION AU NIVEAU DE L'INDIVIDU : LA DÉSAGRÉGATION EN CATÉGORIES

Les déterminants des déplacements dépendent des caractéristiques des individus, ce qui explique l'intérêt de les regrouper en catégories estimées homogènes du point de vue de la mobilité.

Dans les faits, MODUS v2.1 désagrège la population en deux catégories définies par la condition « possession d'un véhicule particulier et possession du permis de conduire », qui traduit la facilité d'accès au mode VP¹, facteur évidemment central dans les choix de déplacements².

3.3.2. SEGMENTATION AU NIVEAU DES DÉPLACEMENTS : LES MOTIFS

Les déplacements eux-mêmes possèdent des caractéristiques intrinsèques, dont le motif est l'une des principales. Pour cette raison, MODUS v2.1 distingue 5 motifs « non-orientés » caractérisant l'origine et la destination du déplacement :

- Domicile
- Travail³
- Achats
- Loisirs
- Affaires personnelles

La combinaison par origine et destination des 5 motifs non-orientés aboutit à la détermination de 8 motifs « orientés », définis par la table d'agrégation suivante :

	<i>Domicile</i>	<i>Travail</i>	<i>Achats</i>	<i>Loisirs</i>	<i>Aff. Perso.</i>
<i>Domicile</i>	-	1	3	7	3
<i>Travail</i>	2	5	5	5	5
<i>Achats</i>	4	5	6	6	6
<i>Loisirs</i>	8	5	6	6	6
<i>Aff. perso.</i>	4	5	6	6	6

Tableau 3 : Table d'agrégation des motifs par origine et destination

Les motifs orientés sont ainsi :

1. Domicile → Travail
2. Travail → Domicile
3. Domicile → Achats/Affaires personnelles

¹ Dans la suite du texte et par abus de langage, on appellera « non-captifs » les détenteurs d'un permis de conduire possédant un VP.

² D'autres désagréations pourraient s'avérer tout aussi pertinentes : sexe, revenus etc.

³ Y compris les « affaires professionnelles » non basées sur le lieu de travail.

4. Achats/Affaires personnelles → Domicile
5. Basé Travail et non basé Domicile
6. Non basé Travail et non basé Domicile
7. Domicile → Loisirs
8. Loisirs → Domicile

Ce choix de regroupements s'appuie sur trois éléments.

Tout d'abord, la vitesse de calcul des ordinateurs actuels impose de travailler avec un nombre de motifs limité¹ : l'expérience montre qu'une décomposition en 8 motifs est la limite pour mettre en œuvre le modèle aisément, et donc de manière opérationnelle.

Dans ce cadre, la construction de la table d'agrégation s'appuie sur une analyse qualitative des déplacements : distinction typologique des motifs basés au domicile (1-4,7,8), au travail (5), et ni domicile, ni travail (6) ; puis pour les motifs domiciles qui sont en volume les plus nombreux (cf ci-dessous), distinction « économique » des motifs d'ordre professionnels (1,2), de consommation privée (3,4), de loisirs (7,8).

Enfin, une analyse quantitative des motifs permet de valider ces choix : l'objectif est d'obtenir des volumes de déplacements suffisants et homogènes par motifs, afin de calibrer efficacement le modèle par rapport aux données existantes. Voici les résultats de la décomposition journalière des déplacements par motifs issus de l'EGT 2001 :

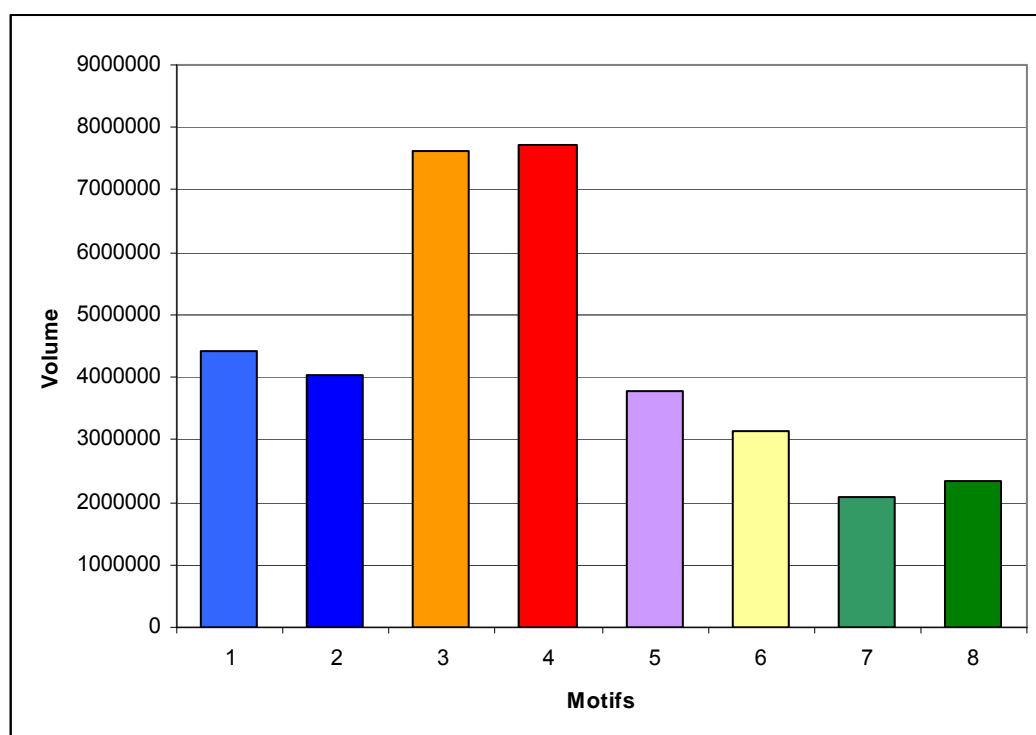


Figure 6 : Volume des déplacements dans l'EGT 2001 par motifs de MODUS v2.1

On obtient ainsi une distribution des déplacements qui ne fait pas apparaître de motifs sous-représentés : le motif 7, le plus faible en volume, représente environ 6% des 35 millions

¹ D'autant plus qu'une désagrégation en deux catégories a lieu au niveau des individus.

de déplacements quotidiens en Île-de-France. Par ailleurs, si l'on fait exception des motifs 3 et 4, la distribution est très homogène. Étant donné les contraintes de choix dans la définition des motifs, ces résultats sont acceptables.

En conclusion, les réflexions exposées dans ces paragraphes conduisent donc à segmenter la demande en 16 groupes, issus de la désagrégation des individus en 2 catégories et de la décomposition des déplacements en 8 motifs. La conséquence concrète est que MODUS v2.1 procède par décomposition des calculs selon ces 16 groupes dès que cela est pertinent : la plupart des paramètres de MODUS v2.1 dépendent ainsi de la catégorie du déplacement et du motif de déplacement.

3.4. LA CARACTÉRISATION DES DÉPLACEMENTS : UTILITÉ ET PROCESSUS DE DÉCISION

3.4.1. UTILITÉ MODALE ET MULTIMODALE

Pour modéliser les processus de choix des individus qui amènent aux pratiques de mobilité observées, MODUS v2.1 s'appuie sur le concept d'« utilité » issu de la théorie des choix discrets. Le lecteur se référera à l'« Utilités et Choix discrets » pour la description mathématique exacte des concepts que nous allons aborder intuitivement ici.

L'utilité représente l'intérêt que retire un individu d'effectuer un choix parmi d'autres ; elle dépend a priori de ses caractéristiques propres et de celles du choix ; l'arbitrage qu'il effectue s'interprète comme une comparaison des utilités des différentes options¹.

MODUS v2.1 attache une utilité élémentaire à chacun des déplacements potentiels. Le choix a été fait de ne la faire dépendre que des caractéristiques des déplacements, qui sont principalement (cf partie 3.1 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 » pour une présentation précise) :

- le mode ;
- la typologie de distance² ;
- le temps de déplacement ;
- le coût du déplacement ;
- les possibilités de stationnement ;

Cette utilité élémentaire est « modale » dans le sens où elle dépend du mode de déplacements. La connaissance des utilités modales d'une OD permet de déterminer l'utilité « multimodale » de l'OD, combinant les intérêts des différents modes.

Cette boîte à outil théorique est au cœur même de MODUS v2.1 : l'utilité est l'unique déterminant de la chaîne de décisions qui va conduire au choix des caractéristiques du déplacement.

¹ A la différence du coût généralisé qui n'en est qu'une forme particulière, l'utilité est une grandeur sans dimension ; en particulier, ce n'est pas une grandeur monétaire. Ce n'est en fait qu'un outil de d'arbitrage abstrait.

² Les modes motorisés souffrent de la lourdeur de leur mise en œuvre sur les courtes distances : c'est ce qui est traduit ici.

3.4.2. DÉCOMPOSITION DES PROCESSUS DE DÉCISION : GÉNÉRATION, DISTRIBUTION, CHOIX MODAL

Afin de mettre en œuvre opérationnellement le concept d'utilité, MODUS v2.1 présente une interprétation schématique et séquentielle du processus de décision à la base de la mobilité.

1. *Étape de génération* : il s'agit plus d'une étape de cadrage que d'une étape de choix. Elle fixe le volume des déplacements qui vont avoir lieu, par le biais du nombre de départs, appelés « émissions » et du nombre d'arrivées, appelés « attractions ». A l'issue de l'étape de génération, la question de l'opportunité du déplacement ne se pose plus : seules restent à en déterminer les caractéristiques géographiques et modales.
2. *Étape de distribution* : le cadrage de volume ayant été fixé par la génération, il s'agit désormais de coupler les départs et les arrivées. D'un point de vue intuitif, il s'agit d'un choix de destination : le déplacement est émis lors de la génération, la distribution fixe sa destination en tenant compte de la contrainte fixée par les attractions.
Pour déterminer le choix de destination, MODUS v2.1 utilise les utilités multimodales dont la construction vient d'être présentée : elles permettent en effet de comparer les OD indépendamment du mode.
3. *Étape de choix modal* : la destination étant fixée, le mode reste à déterminer. Les utilités modales, qui permettent de comparer les modes entre eux, sont utilisées à leur tour.

La mise en œuvre de cette séquence est à la base de la modélisation de la demande¹ de MODUS v2.1.

4. LA MODÉLISATION DU TRAFIC : CONFRONTATION ENTRE L'OFFRE ET LA DEMANDE

4.1. PRINCIPES ET OBJECTIFS

La demande de déplacements concrétisée par les matrices OD VP et TC en HPM et HPS. a pour vocation à se réaliser dans le cadre de l'offre de transport modélisée par les réseaux. L'objectif est d'en déduire la qualité de service offerte aux usagers et de caractériser le fonctionnement des infrastructures : c'est ce que l'on appelle la « modélisation du trafic ».

4.2. LA RÉALISATION DES DÉPLACEMENTS : L'AFFECTATION

La modélisation du trafic correspond à la dernière étape de MODUS v2.1 : les affectations des modes VP et TC, qui s'effectuent de manière totalement indépendante.

¹ Il faut garder à l'esprit que cette décomposition n'est qu'un parti pris de modélisation, susceptible d'être remis en question. Ainsi, certains modèles postulent que le choix de mode a lieu avant le choix de destination, d'autres que ces deux étapes sont réalisées simultanément etc.

4.2.1. LA RECHERCHE D'ITINÉRAIRE

L'affectation est en premier lieu un processus de recherche d'itinéraire : elle associe aux OD demandées les parcours effectués sur le réseau. En sortie d'affectation, on obtient un réseau dit « affecté » ou « chargé » qui présente les volumes de déplacements ou « charges » sur chacun des arcs ; il permet de déterminer les indicateurs de qualité de service : congestion, temps de parcours (celui-ci dépendant de la charge), vitesse etc.

Dans MODUS v2.1, le principe de base de la recherche d'itinéraire est l'optimisation du coût généralisé associé au déplacement¹ : celui-ci intègre notamment les composantes temporelles et monétaires du trajet que l'usager, supposé rationnel, cherche à minimiser (cf partie 8 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 » pour une présentation précise).

4.2.2. L'INTERACTION ENTRE L'OFFRE ET LA DEMANDE

Dans le cas de l'affectation VP, MODUS v2.1 intègre les phénomènes de congestion de la voirie qui apparaissent suite à la réalisation de la demande : les temps de parcours sont modifiés, impactant l'offre de transport VP proposée. Un processus itératif est alors nécessaire pour intégrer les reports d'itinéraires induits par l'évolution de la qualité de service. Le résultat en sortie d'affectation VP modélise par conséquent une situation d'équilibre entre offre et demande.

En revanche, MODUS v2.1 n'applique pas de principe analogue dans le cas de l'affectation TC : la réalisation de la demande n'impacte pas l'offre.

¹ Le coût généralisé du déplacement, utilisé dans la modélisation du trafic, est distinct de l'utilité, utilisée dans la modélisation de la demande.

ANALYSE DÉTAILLÉE DU FONCTIONNEMENT DE MODUS V2.1

1. L'ARCHITECTURE DE MODUS v2.1

Voici un schéma récapitulatif de l'architecture de MODUS v2.1 :

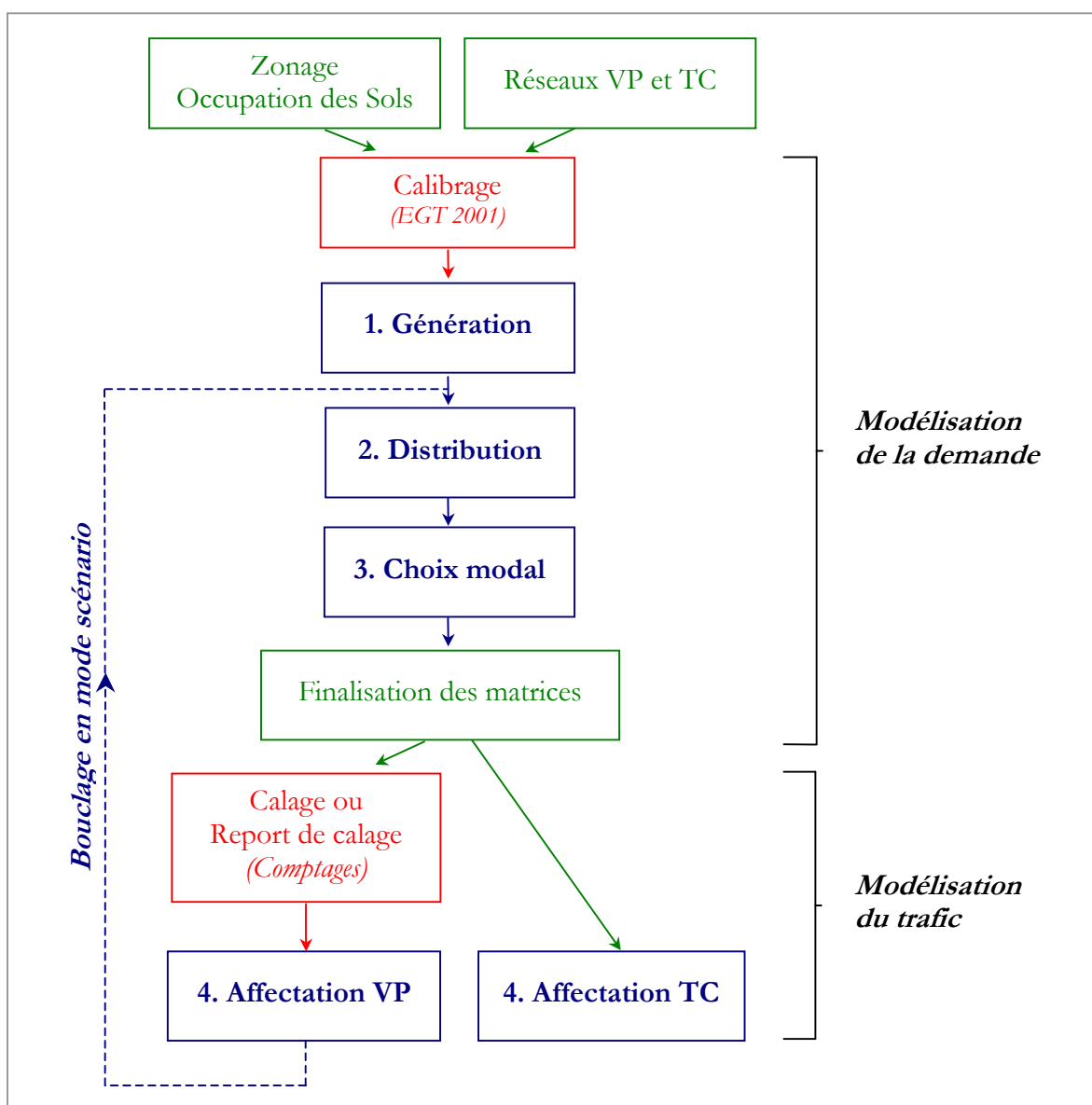


Figure 7 : Architecture de MODUS v2.1

En bleu figure la séquence des 4 étapes de MODUS v2.1.

En vert sont représentées les phases utilisant des données figées, permettant ou venant compléter les étapes de modélisation à proprement parler.

En rouge apparaissent les étapes de calcul (paramétrage, redressement) ayant pour vocation d'assurer les meilleurs outputs permis par les choix de modélisation.

Les blocs de modélisation de la demande et de modélisation de trafic apparaissent explicitement. Le premier produit les matrices OD HPM et HPS des modes VP, TC, MD dans le zonage MODUS 1277 zones, le second les réseaux chargés TC et VP en HPM et HPS.

2. LA PRÉPARATION DES DONNÉES

La préparation des données est l'étape préliminaire à la mise en œuvre effective de MODUS v2.1. Elles sont de deux types : les données « zonales », ne dépendant que de la zone, et « interzonales », attachées à un couple OD. Elles sont déterminées grâce au zonage et aux réseaux constitués préalablement.

2.1. LES DONNÉES ZONALES

Données d'occupation des sols directement attachées au zonage

Les OS sont issues du RGP 1999 et de l'ERE¹ 2001, ainsi que d'une enquête menée par la DREIF en 2003 sur l'accueil des étudiants :

- Population totale P_{tot}
- Population active P_{act}
- Nombre d'emplois total E_{tot}
- Nombre d'emplois de commerce E_{com}
- Nombre d'emplois de loisirs E_{loi}
- Nombre d'emplois tertiaires E_{ter}
- Nombre de place pour les étudiants de l'enseignement supérieur P_{etu}
- Surface bâtie S_{bat}
- Surface total S_{tot}

Données calculées

- Densité humaine $Dens_h$ définie par :

$$Dens_h = \frac{P_{tot} + E_{tot}}{S_{bat}}$$

- Distance « intrazonale » : la distance D_{intra} est une distance caractéristique de la zone ; elle représente la longueur moyenne d'un déplacement interne à la zone. Pour une zone de surface S , distante des trois autres zones les plus proches de D_1 , D_2 et D_3 , on définit D_{intra} par la formule :

$$\Pi \cdot D_{intra}^2 = \sqrt{S} \cdot \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3} \quad \text{soit donc} \quad D_{intra} = \sqrt{\frac{1}{\Pi} \cdot \sqrt{S} \cdot \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}}$$

Autrement dit : la surface d'un disque de rayon D_{intra} est égale à celle d'un rectangle de côtés

¹ ERE : Enquête Régionale Emploi.

- la racine de la surface de la zone,
- la moyenne géométrique des distances aux 3 zones les plus proches.

Cette formule procède par moyenne pour tenir compte de la taille de la zone, qui impacte la distance que l'on peut y parcourir et la distance moyenne pour sortir de la zone, appréhendée grâce aux trois zones les plus proches.

2.2. LES DONNÉES INTERZONALES

Distances

- à vol d'oiseau D_{vol} entre deux zones distinctes ;
- de parcours D_{par} , précisant la distance D_{vol} en incluant les distances parcourues dans les zones origine et destination :

$$\begin{aligned} D_{par} &= D_{intraO} + D_{vol} + D_{intraD} && \text{si } O \neq D \\ &= D_{intra} && \text{si } O = D \end{aligned}$$

Temps de parcours

- en VP : temps en charge T_{VPM} et T_{VPS} , issus du réseau affecté à l'HPM et à l'HPS¹ ; la moyenne est actuellement calculée par pondération par les flux des différents itinéraires possibles sur l'OD.
- en TC : temps de rabattement T_{rab} , temps d'attente au départ T_{att} , temps en véhicule T_{veh} , temps de marche T_{mar} , temps de correspondance T_{cor} , temps d'accès à destination T_{acc} ; ces temps seront présentés dans la partie 8.3.1 de ce chapitre relative au coût généralisé TC.
- en MD : temps de parcours T_{MD} , calculé sur la base de la distance de parcours D_{par} et d'une vitesse v de 3 km/h.

$$T_{MD} = \frac{D_{par}}{v}$$

Tarification

La tarification concerne uniquement les TC ; elle est notée CO et calculée sur la base de la tarification Carte Orange 2001 en décomposant les cas en deux catégories² :

1. le département d'origine et de destination sont différents ; on suppose que le déplacement est assez complexe pour imposer à l'utilisateur d'effectuer une correspondance à Paris ou tout du moins en zone dense : le prix est donc celui de la carte orange zone 1 à la zone de tarification la plus élevée entre origine et destination ;

¹ Ici se pose donc un problème central de la modélisation des déplacements : pour disposer des temps en charge nécessaire à l'exécution du modèle, il faut avoir réalisé une affectation et donc avoir exécuté au moins une fois le modèle. Dans le cas présent, le problème est résolu :

- pour la situation actuelle : en réexploitant des données issues d'une version précédente du modèle, quitte à procéder à quelques itérations pour recalculer des temps en charge issus directement de MODUS v2.1 ;
- pour la situation future : grâce au bouclage (cf partie 1.2.3 du chapitre « Analyse détaillée du fonctionnement de MODUS v2.1 »).

² Dans MODUS v2.0, cette variable avait également été testée en la divisant par la mobilité au lieu de résidence; le pouvoir explicatif du modèle n'en avait pas été amélioré.

2. le département d'origine et de destination sont identiques; on suppose que le déplacement est plus simple, et que l'utilisateur paie l'abonnement minimal permettant le déplacement : prix minimal de l'abonnement donnant droit à la circulation dans la zone de tarification s'il n'y a pas de changement de zone de tarification ; prix de l'abonnement entre les deux zones de tarifications sinon.

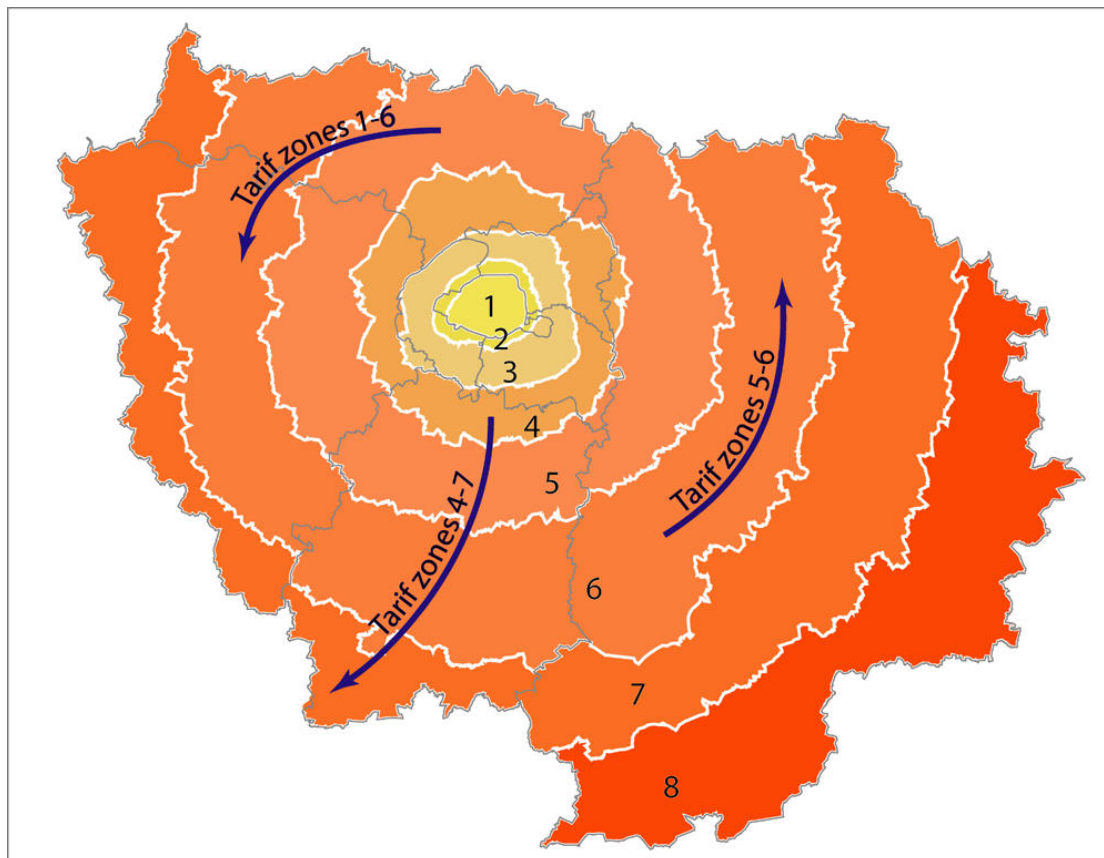


Figure 8 : Zones de la Carte Orange en 2001 et tarification TC de MODUS v2.1

3. LA DÉTERMINATION DES UTILITÉS

Le calcul des utilités constitue l'étape préliminaire à la mise en œuvre effective de la chaîne de modélisation.

Le cadre théorique dans lequel se place MODUS v2.1 est celui des utilités aléatoires et des choix discrets, concrétisés par un modèle Logit : le lecteur se réfère à l'Annexe 3 : « Utilités et Choix discrets » pour consulter des précisions sur les résultats exploités directement ici.

3.1. LA STRUCTURE DES UTILITÉS

Structure des utilités modales

Dans ce cadre, MODUS v2.1 fait l'hypothèse que la partie déterministe des utilités modales¹ est combinaison linéaire de variables décrivant les caractéristiques des modes sur l'OD considérée. Les variables sont :

- les indicatrices des modes i_{TC} , i_{VP} , i_{MD} ; elles permettent de caractériser le mode utilisé² ;
- les pénalités à courte distance pour les modes motorisés k_{TC} , k_{VP} ; elles concrétisent le fait que les MD sont d'une utilisation plus facile sur les courtes distances, au-delà du simple gain de temps ;
- les temps de parcours : le temps passé hors du véhicule T_{nv} , les temps de déplacements du matin et du soir T_{vM} et T_{vS} ;
- le coût kilométrique c_{km} , caractéristique du coût d'utilisation des VP ;
- la tarification tf , caractéristique du coût d'utilisation des TC ;
- le stationnement pk , traduisant un surcoût pour les VP dépendant des possibilités de stationnement.

Les utilités modales U^{TC} , U^{VP} , U^{MD} s'expriment donc sous la forme suivante :

$$U^{\text{mode}} = \alpha \cdot i_{TC} + \beta \cdot i_{VP} + \chi \cdot i_{MD} + \delta \cdot k_{TC} + \varepsilon \cdot k_{VP} + \phi \cdot T_{nv} + \varphi \cdot T_{vM} + \gamma \cdot T_{vS} + \eta \cdot c_{km} + \lambda \cdot tf + \mu \cdot pk$$

les variables i_{TC}, \dots, pk prenant des valeurs différentes suivant le mode et l'OD considérés. En utilisant les données zonales et interzonales, voici un tableau récapitulatif de leurs valeurs pour les trois modes de MODUS v2.1 :

¹ Dans le cadre de cet exposé, la partie stochastique des utilités n'interviendra pas explicitement : elle est seulement sous-jacente dans l'utilisation du modèle Logit. Nous assimilerons donc désormais les utilités à leur partie déterministe.

² Le paramètre associé à une indicatrice est parfois appelée « constante modale » du mode considéré.

	TC	VP	MD
i_{TC}	1	0	0
i_{VP}	0	1	0
i_{MD}	0	0	1
k_{TC}	$\exp(-D_{par})$	0	0
k_{VP}	0	$\exp(-D_{par})$	0
T_{nv}	$T_{rub} + T_{mar} + T_{acc} + T_{att} + T_{cor}$	0	0
T_{vM}	T_{reb}	T_{VPM}	T_{MD}
T_{vS}	T_{reb}	T_{VPS}	T_{MD}
c_{km}	0	D_{vol}	0
tf	CO	0	0
pk	0	$Dens_{hO} + Dens_{hD}$	0

Tableau 4 : Valeurs par mode des variables intervenant dans les utilités modales

Remarque : les utilités étant des grandeurs sans dimension, seule comptent la cohérence internes des données, et les choix de « sens » qui sont faits : ainsi, pour le calcul des variables de pénalité k_{TC} et k_{VP} , D_{par} est exprimé en km, de telle sorte à ce que l'impact ne soit effectivement significatif qu'à courte distance (<3 km).

Les paramètres des utilités modales respectent la segmentation de la demande présentée précédemment : ils sont décomposés en 16 jeux correspondant chacun à une catégorie d'usagers et de motifs de déplacements. Le tableau suivant présente leurs valeurs :

Cat.	Motif	Valeur du paramètre de l'utilité modale associé à la variable :										
		i_{TC}	i_{VP}	i_{MD}	k_{TC}	k_{VP}	T_{nV}	T_{vM}	T_{vS}	c_{km}	tf	pk
Captifs	1	0.25908	-1.08207	0.82272	-4.31082	-2.55978	-0.00675	0	-0.03861	-0.00608	0	-19.43789
	2	0.02725	-0.95732	0.93040	-4.31151	-2.26343	-0.00682	-0.02791	-0.01336	-0.02155	0	-18.1558
	3	-0.54775	-0.98648	1.53209	-2.90379	-1.46150	-0.00182	-0.01819	-0.02586	-0.02263	-0.00055	-12.93803
	4	-0.32732	-1.08943	1.41573	-3.23108	-1.28029	-0.00261	-0.01274	-0.02827	-0.01434	-0.00473	-12.56526
	5	0.22605	-1.47335	1.24730	-4.70052	-0.49625	-0.02980	-0.02404	-0.01929	-0.01766	0	-1.25747
	6	0.03430	-1.26062	1.22630	-3.39204	-0.15000	-0.05228	-0.00006	-0.04160	-0.03190	-0.00398	-3.40402
	7	-0.54422	-0.81162	1.35543	-3.65278	-2.06679	-0.02712	0	-0.04129	0	0	-14.09688
	8	-0.49279	-0.92639	1.41911	-3.15391	-0.70779	-0.02609	0	-0.04146	0	0	-7.74356
Non-Captifs	1	-0.95013	0.80036	0.14521	-5.60574	-2.05692	-0.01554	-0.02200	-0.01299	-0.04927	0	-10.51792
	2	-1.11107	0.61670	0.49229	-5.23772	-1.24664	-0.01491	0	-0.04150	-0.04929	0	-8.88995
	3	-1.63484	0.61077	1.02278	-2.67526	-0.79984	-0.00024	-0.00433	-0.03140	-0.00612	0	-8.97794
	4	-1.73309	0.50883	1.22352	-2.24393	-0.46338	-0.00123	0	-0.04027	-0.00324	0	-9.14747
	5	-1.31530	0.47502	0.83863	-4.78480	-1.32634	-0.04328	-0.00899	-0.04458	-0.04830	0	-6.84171
	6	-1.42833	0.88715	0.54072	-4.00288	-1.34047	-0.01820	0	-0.03228	-0.02085	0	-7.48964
	7	-1.14851	0.49592	0.65165	-5.79521	-1.91260	-0.02970	-0.00066	-0.02892	-0.01434	0	-6.57513
	8	-1.09933	0.59487	0.50361	-8.52500	-1.98853	-0.02351	0	-0.02635	-0.00729	0	-5.37057

Tableau 5 : Paramètres des utilités modales

Structure de l'utilité multimodale

En accord avec les résultats théoriques sur le modèle Logit, l'utilité multimodale U^{TM} est calculée par « logsum » (cf Annexe 3 : « Utilités et Choix discrets ») à partir des utilités modales U^{TC} , U^{VP} , U^{MD} . L'absence de données sur la dispersion des utilités modales conduit à ne pas faire intervenir de pondération, ce qui conduit à la formule :

$$U^{TM} = \ln(e^{U^{TC}} + e^{U^{VP}} + e^{U^{MD}})$$

3.2. MÉTHODE DE CALIBRAGE DES UTILITÉS

Principe de la démarche

Fixons une origine i et une destination j . Un jeu de paramètres fixé permet de déterminer les utilités modales U_{ij}^{TC} , U_{ij}^{VP} , U_{ij}^{MD} et le modèle Logit fournit les probabilités de choix des différents modes sur cette OD :

$$p_{ij}^{TC} = \frac{e^{U_{ij}^{TC}}}{e^{U_{ij}^{TC}} + e^{U_{ij}^{VP}} + e^{U_{ij}^{MD}}} \quad p_{ij}^{VP} = \frac{e^{U_{ij}^{VP}}}{e^{U_{ij}^{TC}} + e^{U_{ij}^{VP}} + e^{U_{ij}^{MD}}} \quad p_{ij}^{MD} = \frac{e^{U_{ij}^{MD}}}{e^{U_{ij}^{TC}} + e^{U_{ij}^{VP}} + e^{U_{ij}^{MD}}}$$

Le calibrage des utilités dans MODUS v2.1 s'appuie alors sur le choix de mode observé dans l'EGT 2001 : les paramètres sont déterminés afin que le représenter au mieux par l'application d'un modèle Logit conforme à la théorie des choix discrets.

Ainsi, si un déplacement entre une origine i et une destination j recensé dans l'EGT 2001 s'est effectué en TC, le calibrage cherchera à déterminer un jeu de paramètres vérifiant en particulier¹ : $p_{ij}^{TC} > p_{ij}^{VP}$ et $p_{ij}^{TC} > p_{ij}^{MD}$.

Mise en œuvre opérationnelle

La mise en œuvre de cette démarche utilise la méthode du maximum de vraisemblance : c'est une méthode statistique classique permettant de déterminer les paramètres minimisant la différence entre les résultats d'une distribution de probabilité et les observations effectives sur un échantillon donné.

Pour cela, notons k une observation de l'EGT 2001, δ_k son poids dans l'échantillon et p_k la probabilité calculée par le modèle Logit pour le mode effectivement utilisé dans l'observation ; la log-vraisemblance de l'échantillon est définie par :

$$L = - \sum_{k \in EGT} \delta_k \cdot \log(p_k)$$

Les probabilités étant inférieures à 1, la log-vraisemblance est une valeur positive qui dépend du jeu de paramètres utilisés dans le calcul des utilités. Remarquons par ailleurs que si le modèle Logit était parfaitement descriptif et les paramètres parfaitement calibrés, on aurait $p_k = 1$ pour tout k , et la log-vraisemblance serait par conséquent nulle.

Le calibrage cherche à tendre vers cette situation limite en déterminant le jeu de paramètres pour lequel la log-vraisemblance est minimale. Cette minimisation s'effectue par optimisation numérique et aboutit aux valeurs présentées dans le Tableau 5.

Pour conclure, précisons que l'optimisation a lieu sur chaque segment de demande correspondant à une catégorie et un motif fixés : on obtient ainsi 16 jeux de paramètres. Par ailleurs, conformément à l'intuition, des contraintes de négativité sont imposées à l'ensemble des paramètres, à l'exception de ceux attachés aux indicatrices de mode.

Résultats

Afin d'analyser la qualité du calibrage, on applique le modèle Logit aux OD observées dans l'EGT 2001. La comparaison des parts modales obtenues avec celles de l'EGT 2001 est réalisée selon la portée des OD, suivant le découpage en 13 classes présenté ci-dessous :

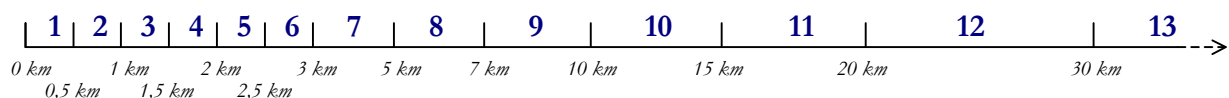


Figure 9 : Les 13 classes de portée utilisées pour l'analyse des outputs de MODUS v2.1

¹ Ceci est bien sûr illustratif, mais un peu simpliste : le but du calibrage n'est pas d'obtenir un résultat parfait sur une OD considérée isolément, mais d'avoir un résultat bon en moyenne.

Les graphiques ci-dessous présentent cette démarche :

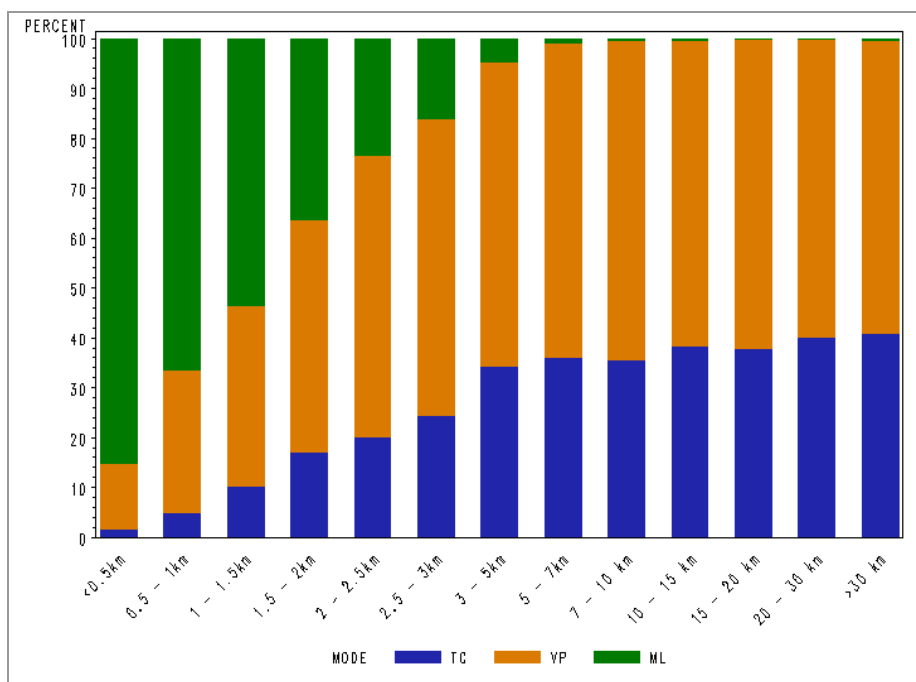


Figure 10 : Choix modal observé sur les OD de l'EGT 2001 par classe de portée

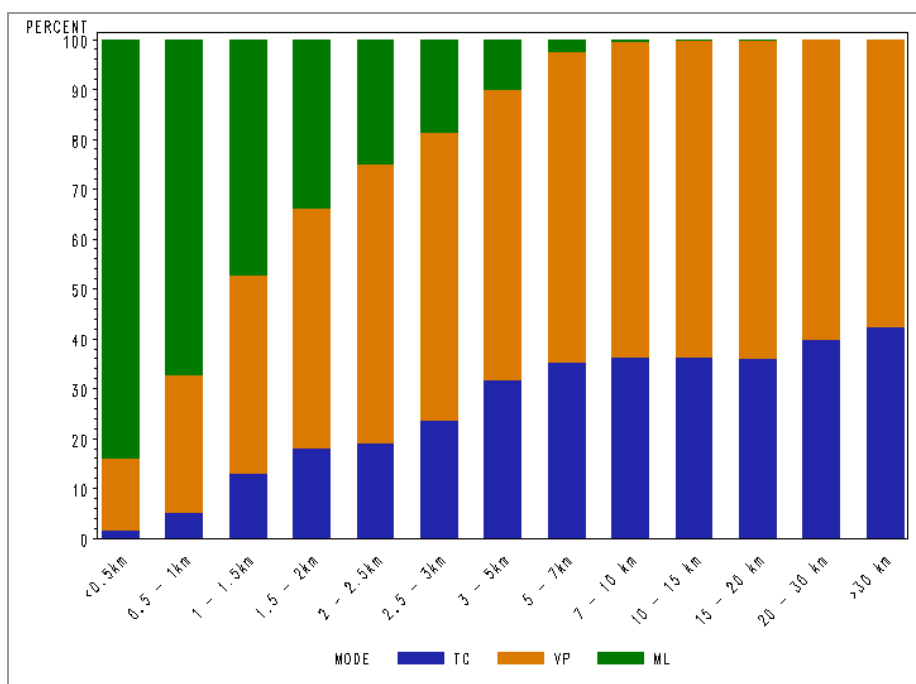


Figure 11 : Choix modal simulé sur les OD de l'EGT 2001 par classe de portée

Les résultats sont donc satisfaisants : la structure du choix modal suivant les classes de portée est très bien simulée par MODUS v2.1.

4. L'ÉTAPE DE GÉNÉRATION

La génération est la première étape constitutive de l'architecture d'un modèle classique à 4 étapes. Elle fournit un cadrage des volumes de déplacements.

4.1. CALCUL DES ÉMISSIONS ET DES ATTRACTIONS

Démarche de l'étape

La génération a pour objectif de fournir deux vecteurs attachés au zonage, appelés « émissions » et « attractions ». Pour chaque zone, ils fournissent le nombre de déplacements au départ de celle-ci – les déplacements émis ou émissions – et le nombre de déplacements l'ayant pour destination – les déplacements attirés ou attractions.

Segmentation a priori de la génération

Dans MODUS v2.1, les émissions et attractions sont journalières et segmentées seulement par motif¹. En effet, le calibrage de la génération (voir ci-dessous) impose d'utiliser un assez grand nombre de données pour obtenir des résultats agrégés significatifs ; or toute restriction des analyses aux observations de l'EGT 2001 concernant des tranches horaires ou des catégories d'usagers limite le nombre d'observations utilisables, en particulier pour certains motifs.

Méthode de calcul

Les émissions et attractions sont calculées sur l'hypothèse qu'elles sont des combinaisons linéaires des OS décrites dans la partie 2.1 de ce chapitre. Ainsi, pour une zone donnée, l'émission E et l'attraction A sont de la forme suivante :

$$E = e_1 \cdot P_{tot} + e_2 \cdot P_{act} + e_3 \cdot E_{tot} + e_4 \cdot E_{com} + e_5 \cdot E_{loi} + e_6 \cdot E_{ter} + e_7 \cdot P_{etu}$$

$$A = a_1 \cdot P_{tot} + a_2 \cdot P_{act} + a_3 \cdot E_{tot} + a_4 \cdot E_{com} + a_5 \cdot E_{loi} + a_6 \cdot E_{ter} + a_7 \cdot P_{etu}$$

Cette hypothèse s'illustre aisément dans le cas des déplacements pour le motif domicile-travail : ceux-ci sont réalisés par les actifs qui se rendent sur leurs lieux d'activité ; les déplacements sont donc émis par les zones de résidence des populations actives (variable P_{act}) et attirés par les zones de localisation des emplois (variable E_{loi}). La dépendance linéaire se conçoit tout aussi aisément car elle traduit une proportionnalité conforme à l'intuition.

Les paramètres e_k et a_k , attachés respectivement aux émissions et attractions, sont appelés « émissivités » et « attractivités » ; ils ne dépendent que des motifs (en particulier, ce sont des paramètres régionaux) et prennent les valeurs suivantes :

¹ La première idée est naturellement de vouloir calculer la génération directement en HPM et HPS pour les 16 segments de demande.

Motif	Valeur de l'émissivité associée à la variable :						
	P_{tot}	P_{act}	E_{tot}	E_{com}	E_{loi}	E_{ter}	P_{etu}
1. Domicile → Travail	0	0.9098	0	0	0	0	0.037
2. Travail → Domicile	0.00371	0	0.6542	0.8343	0	0	0.1399
3. Domicile → Achat/Aff. Perso	0.6763	0	0	0	0	0	0
4. Achat/Aff. Perso → Domicile	0.6122	0	0	1.2515	0	0.0267	0.034
5. Basé Travail et Non Basé Domicile	0	0	0.2397	0.4785	0	0.5758	0.0452
6. Non Basé Travail et Non Basé Domicile	0	0.3469	0	0.154	0.3889	0.2994	0.0305
7. Domicile → Loisirs	0	0.4399	0	0	0.6442	0.00274	0
8. Loisirs → Domicile	0.0244	0.1643	0	0.527	0.8658	0.1711	0.0297

Tableau 6 : Émissivités de MODUS v2.1

Motif	Valeur de l'attractivité associée à la variable :						
	P_{tot}	P_{act}	E_{tot}	E_{com}	E_{loi}	E_{ter}	P_{etu}
1. Domicile → Travail	0	0	0.7603	0.7194	0	0	0.1649
2. Travail → Domicile	0.0282	0.7407	0	0	0	0	0.02
3. Domicile → Achat/Aff. Perso	0.608	0	0	1.1738	0	0.00674	0.046
4. Achat/Aff. Perso → Domicile	0.6965	0	0	0	0	0	0
5. Basé Travail et Non Basé Domicile	0	0.00361	0	0.5658	0	0.8427	0.0488
6. Non Basé Travail et Non Basé Domicile	0	0.3208	0	0.677	0.5521	0.2371	0.0209
7. Domicile → Loisirs	0.0194	0.2104	0	0.1169	0.7649	0.1543	0.00471
8. Loisirs → Domicile	0	0.4973	0	0	0.578	0.00197	0.00274

Tableau 7 : Attractivités de MODUS v2.1

Segmentation a posteriori

Pour se conformer à la décomposition en 16 groupes sur laquelle se base la modélisation de la demande, MODUS v2.1 effectue une segmentation a posteriori : une fois les émissions et attractions calculées, celles-ci sont décomposées suivant la catégorie, captifs ou non-captifs.

Pour cela, des taux de désagrégation en émission et attraction sont utilisés ; ils sont déterminés par ratio grâce à l'EGT 2001 et sont différenciés par couronne d'appartenance de la zone considérée, Paris, Petite Couronne (PC) et Grande Couronne (GC) : la différence de dépendance au VP entre zone dense et zone périphérique est ainsi prise en compte.

Le tableau suivant présente les valeurs obtenues :

Motif	Catégorie	TX en émission			TX en attraction		
		Paris	PC	GC	Paris	PC	GC
1	C	0.495	0.264	0.144	0.388	0.249	0.147
	NC	0.505	0.736	0.856	0.612	0.751	0.853
2	C	0.359	0.235	0.143	0.469	0.248	0.139
	NC	0.641	0.765	0.857	0.531	0.752	0.861
3	C	0.495	0.356	0.224	0.476	0.355	0.224
	NC	0.505	0.644	0.776	0.524	0.645	0.776
4	C	0.487	0.357	0.224	0.503	0.359	0.225
	NC	0.513	0.643	0.776	0.497	0.641	0.775
5	C	0.338	0.185	0.076	0.332	0.185	0.074
	NC	0.662	0.815	0.924	0.668	0.815	0.926
6	C	0.469	0.272	0.160	0.481	0.270	0.158
	NC	0.531	0.728	0.840	0.519	0.730	0.842
7	C	0.524	0.321	0.209	0.486	0.314	0.222
	NC	0.476	0.679	0.791	0.514	0.686	0.778
8	C	0.489	0.312	0.214	0.528	0.324	0.202
	NC	0.511	0.688	0.786	0.472	0.676	0.798

Tableau 8 : Taux de désagrégation par catégorie en émission et attraction

4.2. CALIBRAGE DES ÉMISSIVITÉS ET ATTRACTIVITÉS

Principe de la démarche

Le calibrage des émissivités et attractivités est effectué par régression linéaire. Un découpage géographique compatible avec le zonage MODUS est fixé, puis renseigné avec les volumes de déplacements issus de l'EGT 2001 et les informations socio-démographiques issues des OS. On dispose alors d'une base de données sur laquelle il est possible d'analyser par régression les corrélations linéaires entre déplacements émis ou attirés et les données d'urbanisation : le résultat fournit exactement les paramètres désirés.

Afin d'assurer la significativité des valeurs obtenues, plusieurs précautions sont prises :

- le zonage MODUS est trop fin par rapport à l'EGT 2001 pour pouvoir être utilisé directement dans la régression ; par conséquent, on définit un découpage géographique plus lâche, par agrégation des zones MODUS dès que leur taille est infracommunale ;
- on ne conserve dans la démarche que les zones du découpage précédent pour lesquelles on dispose d'au minimum 5 observations de l'EGT 2001 ;
- on élimine les observations « déviantes » (appelées « outliers ») : pour cela, on effectue une régression préliminaire, sans aucune contrainte. Elle permet de déterminer une valeur approximative des émissivités et attractivités, puis un intervalle de confiance (fixée arbitrairement à 99,5%) autour des valeurs des émissions et attractions simulées par le modèle. On élimine alors les données de l'enquête utilisées dans cette régression qui sortent de cet intervalle de confiance.
- on effectue une seconde régression en imposant la positivité des coefficients, conformément à l'intuition.
- un contrôle a posteriori est effectué pour s'assurer que le nombre de données utilisées dans la régression finale est suffisant (au moins 5).

Les figures suivantes illustrent la démarche dans le cas du motif 1 (Domicile → Travail), dans le cadre simplifié de l'analyse de la corrélation entre les émissions et la population active :

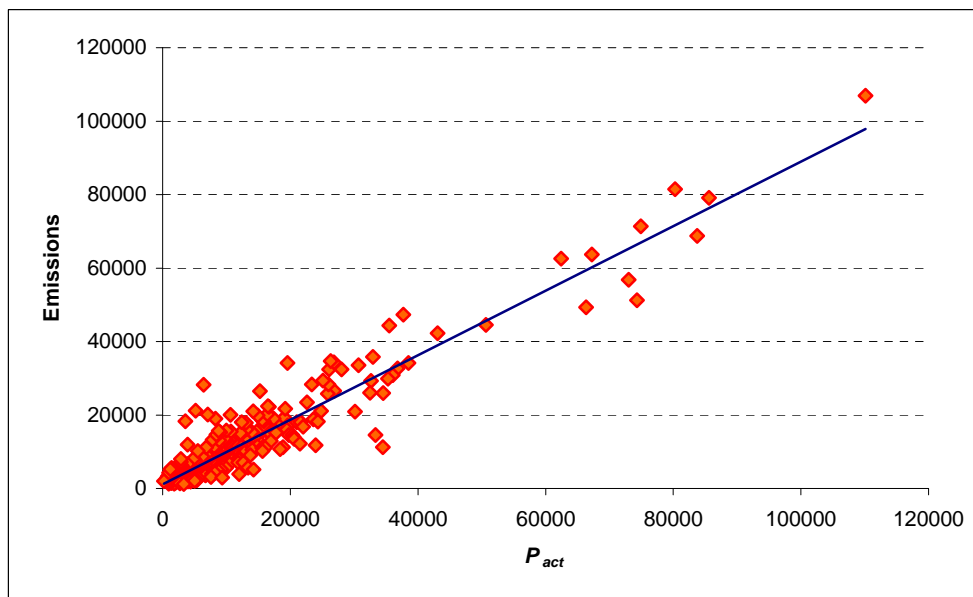


Figure 12 : Calibrage de la génération - régression préliminaire pour élimination des outliers

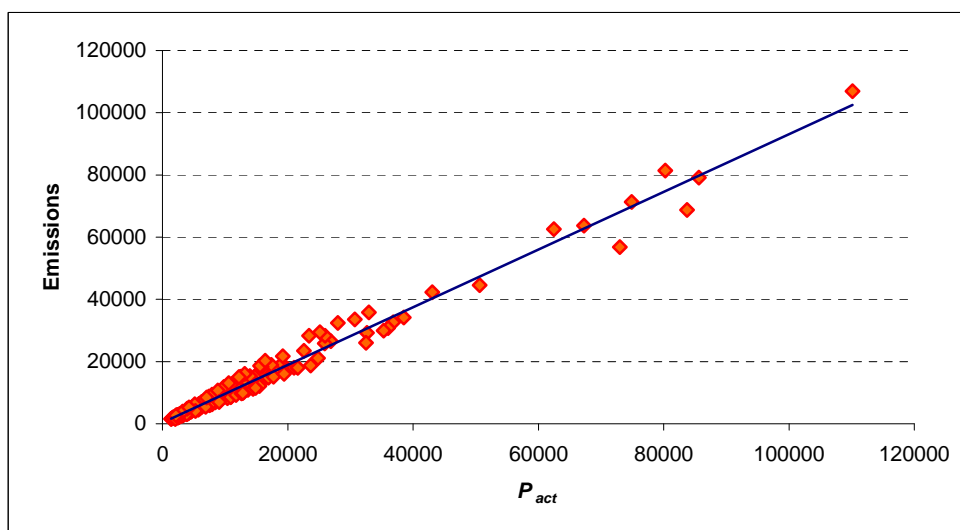


Figure 13 : Calibrage de la génération - régression finale pour déterminer les paramètres

Résultats de la génération

La comparaison par motif des sorties de l'étape de génération (« simulés ») avec les données de l'EGT 2001 (« observés ») donne des résultats satisfaisants. Les volumes des attractions et émissions sont très proches, en cohérence avec l'intuition : la génération de MODUS v2.1 s'intéressant aux déplacements journaliers, elle implique un équilibre entre émission et attraction traduisant le retour des voyageurs à leur point d'origine en fin de journée (le domicile généralement).

Par ailleurs, les déplacements simulés sont en moyenne légèrement supérieurs à ceux observés ; les facteurs explicatifs sont divers : imprécision de l'EGT 2001 en dehors de la zone dense impliquant des biais dans le calibrage, imperfections dans le choix des données significatives (seuil de 5 observations, détermination des outlyers)...

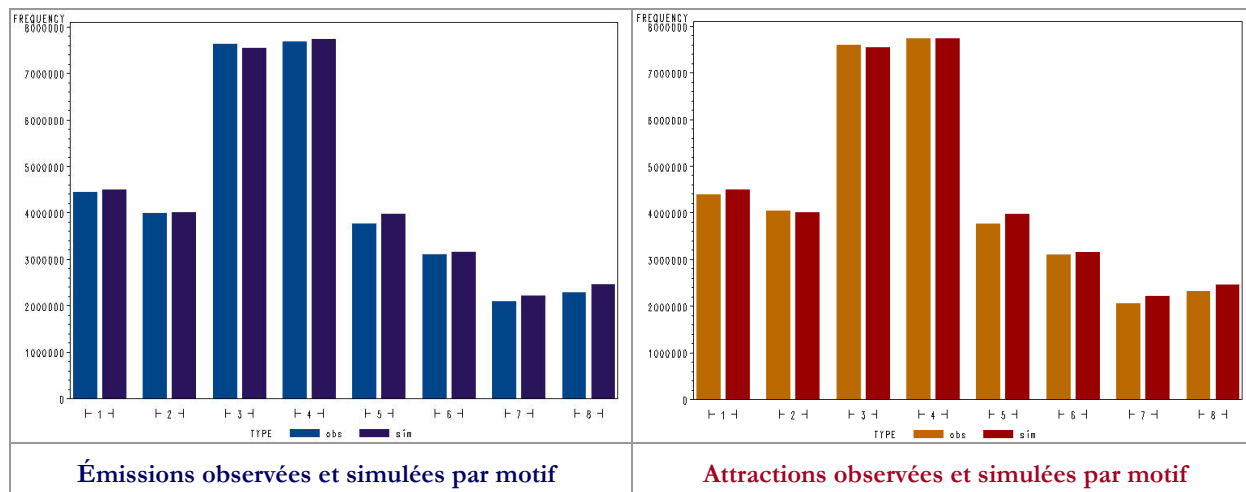


Figure 14 : Émissions et attractions observées et simulées par motif

La structure de la génération par département montre une situation plus contrastée, ce qui est compréhensible : le calibrage s'est effectué par motif, sans contrainte géographique. On n'observe pas de typologie spécifique à la Petite Couronne ou à la Grande Couronne : il est donc difficile d'en tirer des enseignements quant à la qualité de la méthode.

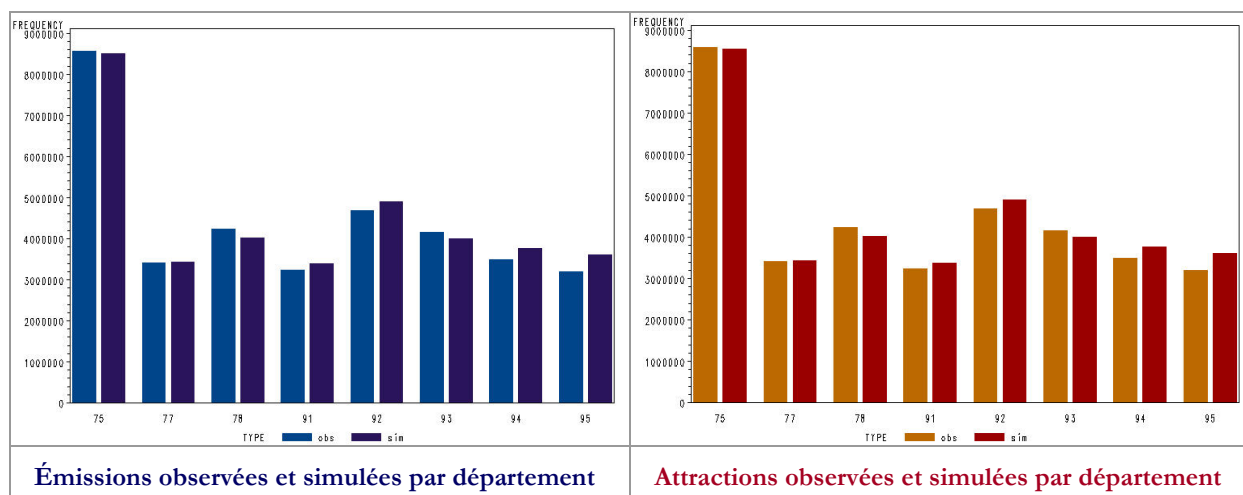


Figure 15 : Émissions et attractions observées et simulées par département

Résultats de la désagrégation de la génération

L'application des taux de désagrégation en émission et attraction par motif et par couronne conserve globalement les structures précédentes : c'était évident par motif, les taux étant construits pour ; en revanche, on peut conclure que l'erreur induite par l'application d'un taux non différencié par département n'a pas d'impact négatif significatif.

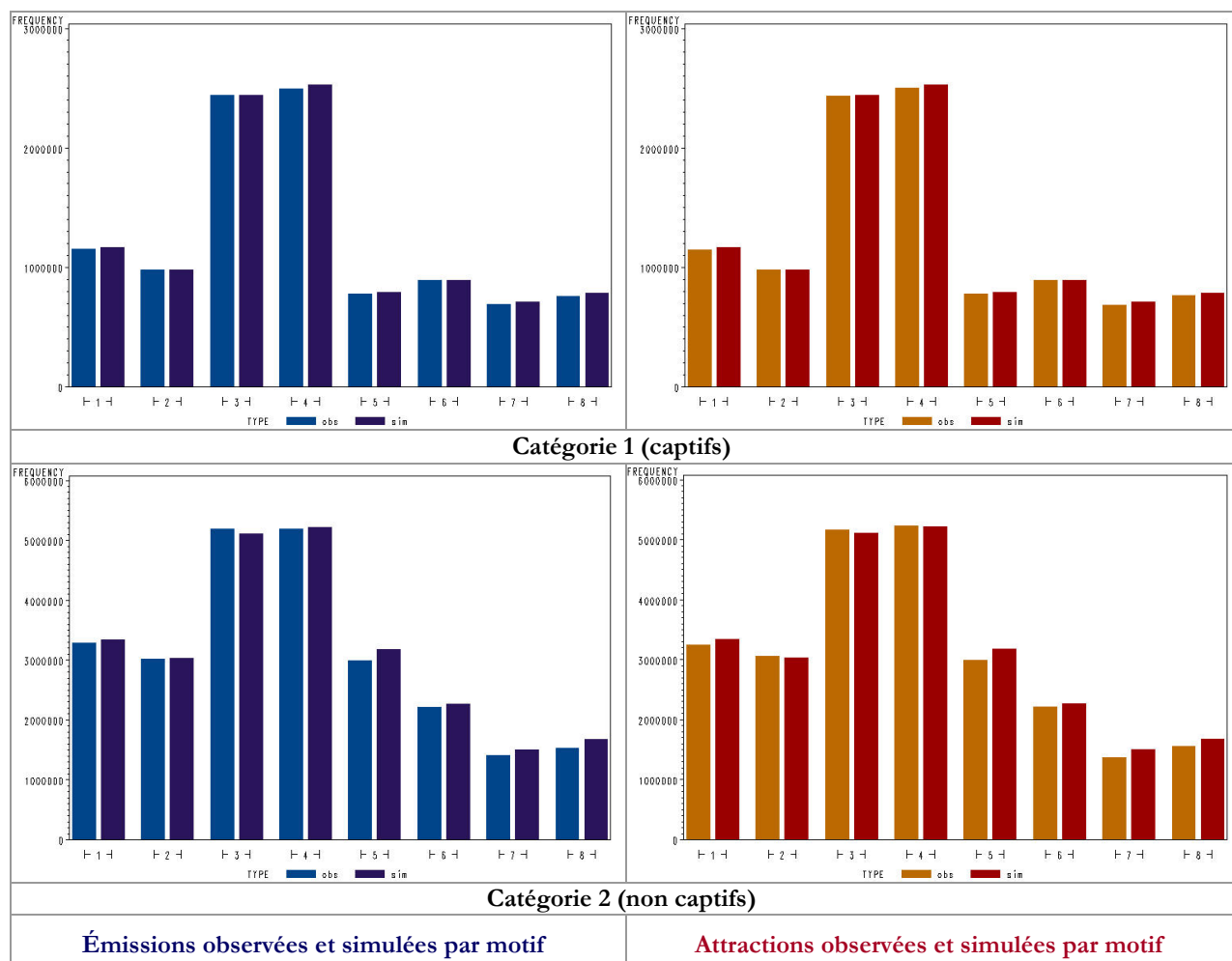


Figure 16 : Émissions et attractions observées et simulées par catégorie et motif

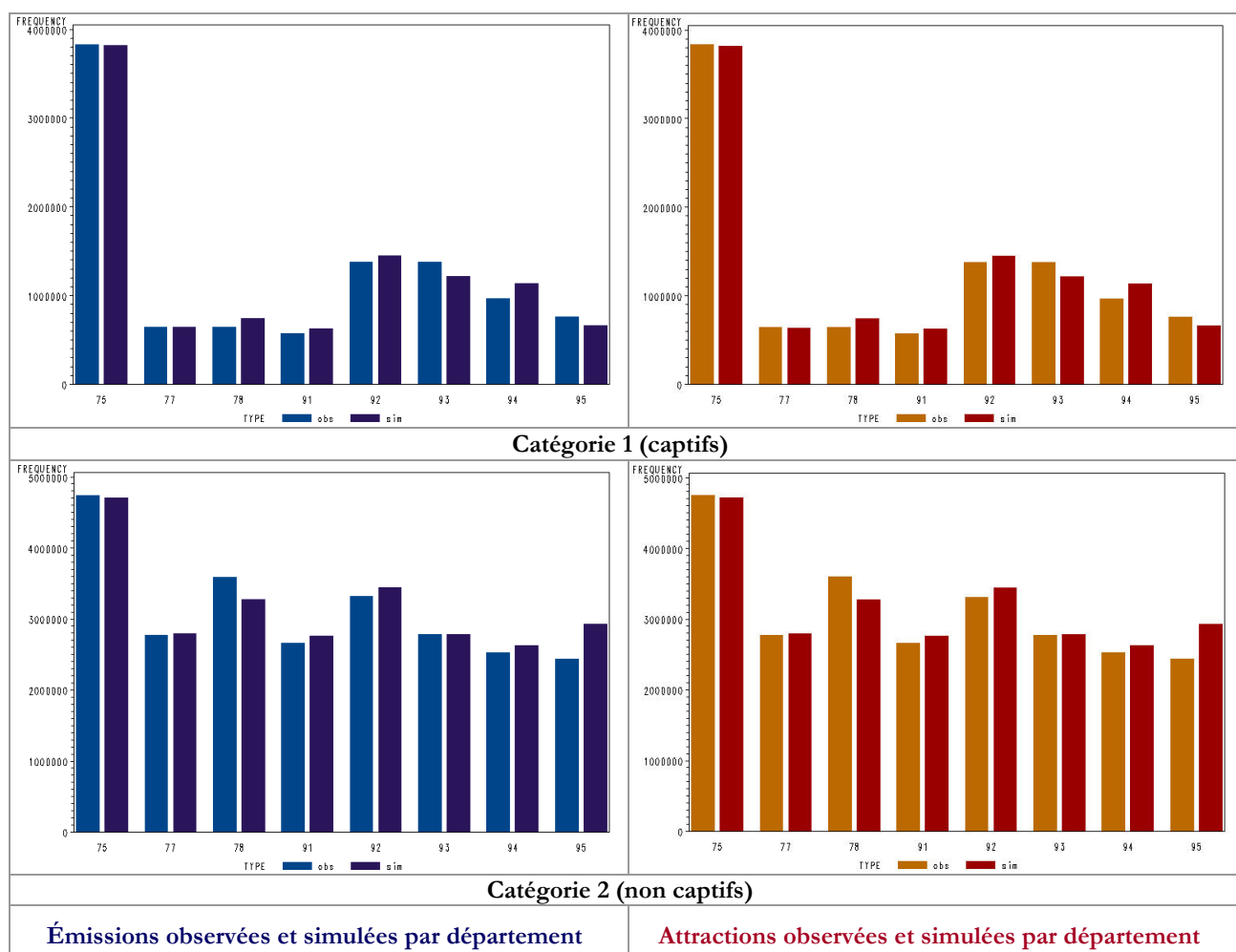


Figure 17 : Émissions et attractions observées et simulées par catégorie et département

5. L'ÉTAPE DE DISTRIBUTION

La distribution est la seconde étape dans l'enchaînement séquentiel d'un modèle classique à 4 étapes. Elle fournit une description des flux par OD tous modes confondus.

5.1. DÉTERMINATION DES FLUX PAR OD

Démarche de l'étape

A partir des émissions et des attractions issues de l'étape de génération, la distribution détermine la matrice des flux tous modes pour l'ensemble des OD du zonage : concrètement, elle répartit géographiquement les émissions en tenant compte de la structure des attractions et de l'offre de transport – cette dernière étant traduite par le calcul des utilités.

Le modèle gravitaire

La première étape de la distribution des flux s'appuie sur les hypothèses suivantes : le flux F_{ij} entre une origine i et une destination j dépend de l'émission E_i de la zone i , de l'attraction A_j de la zone j , et de l'utilité U_{ij} entre les deux zones. Ces hypothèses sont intuitives : un déplacement est issu d'une émission, s'oriente selon la structure des attractions, le tout sous la contrainte d'une maximisation de l'utilité.

Pour mettre en œuvre opérationnellement ces idées, MODUS v2.1 utilise un modèle dit « gravitaire », qui propose un lien entre le flux F_{ij} et le couple (E_i, A_j) en s'appuyant sur une analogie physique : à l'instar de la force de gravité¹, on postule que le flux F_{ij} s'écrit sous la forme :

$$F_{ij} = E_i \cdot A_j \cdot g(U_{ij})$$

où g est une fonction croissante.

De manière évidente, la définition exacte de la fonction g impacte directement les résultats de l'étape de distribution. MODUS v2.1 opte pour une formulation classique de type exponentielle, déterminée par une constante positive α appelée « paramètre de distribution », (qui dépend du motif et de la catégorie de désagrégation afin de respecter la segmentation de la demande) :

$$F_{ij} = E_i \cdot A_j \cdot e^{\alpha U_{ij}}$$

Les hypothèses sont donc bien respectées : les flux dépendent des émissions et attractions, et croissent avec l'utilité.

Le tableau suivant présente la valeur actuellement utilisée du paramètre de distribution α

Cat.	Captifs								Non-Captifs							
Motif	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Par. α	2.991	2.351	2.817	2.937	2.711	2.302	2.444	2.368	1.657	1.506	4.207	3.528	1.834	5.023	4.152	5.481

Tableau 9 : Paramètres de distribution

Contraintes en émissions et attractions : l'algorithme du Fratar

Par construction, la somme de la ligne i (respectivement la colonne j) d'une matrice OD correspond à l'émission de la zone i (respectivement l'attraction de la zone j). Cette remarque faite, on constate que le modèle gravitaire offre l'inconvénient de déformer les volumes des déplacements : les émissions et attractions recalculés à partir des flux F_{ij} précédents n'ont aucune raison de correspondre pas à celles déterminées directement par l'étape de génération. Une opération de redressement est donc nécessaire : elle s'effectue par le biais de l'« algorithme du Fratar »² qui opère sur les « marges » de la matrice OD, c'est-à-dire ses lignes et ses colonnes. En notant :

- E_i et A_j les émissions et attractions issues de l'étape de génération,

¹ E^i et A^j étant assimilés aux masses de deux corps, et l'opposé de U^{ij} à la distance qui les sépare.

² Aussi appelé parfois « algorithme de Furness »

- F_{ij}^n , E_i^n , A_j^n les flux, émissions et attractions de la matrice OD issue des calculs du Fratar, l'indice n prenant la valeur 0 pour les outputs du modèle gravitaire, puis kE et kEA (E pour émission, A pour attraction) pour les outputs successifs de la $k^{\text{ème}}$ itération, le Fratar définit une nouvelle matrice OD de flux en deux étapes:

$$1. \text{ Équilibrage des émissions : } F_{ij}^{1E} = \frac{E_i}{E_i^0} \cdot F_{ij}^0$$

Par construction, cette matrice OD vérifie $E_i^{1E} = E_i$, mais a priori $A_j^{1E} \neq A_j$.

$$2. \text{ Équilibrage des attractions : } F_{ij}^{1EA} = \frac{A_j}{A_j^{1E}} \cdot F_{ij}^{1E}$$

Par construction, cette matrice OD vérifie $A_j^{1EA} = A_j$, mais a priori $E_i^{1EA} \neq E_i$.

Ce bloc de deux opérations détermine donc successivement des matrices équilibrées en émissions, puis en attractions. La théorie montre qu'en répétant ce processus de manière itérative, on obtient une convergence vers des flux équilibrés à la fois en émission et attraction.

Exemple : l'exemple ci-dessous présente les résultats des deux premières itérations du Fratar sur un exemple de matrice OD et de contraintes en émission et attractions quelconques ; on constate que la convergence vers une matrice équilibrée est rapide.

F_{ij}^0				E_i^0	E_i
	2	6	3	11	12
	3	8	4	15	3
	1	5	9	15	8
A_j^0	6	19	16		
A_j	10	5	8		

Figure 18 : Matrice OD initiale et marges cibles

F_{ij}^{1E}				E_i^{1E}	E_i
	2.2	6.5	3.3	12	12
	0.6	1.6	0.8	3	3
	0.5	2.7	4.8	8	8
A_j^{1E}	3.3	10.8	8.9		
A_j	10	5	8		
Équilibrage en émissions n°1					

F_{ij}^{1EA}				E_i^{1EA}	E_i
	6.6	3.0	3.0	12.6	12
	1.8	0.7	0.7	3.3	3
	1.6	1.2	4.3	7.2	8
A_j^{1EA}	10	5	8		
A_j	10	5	8		
Équilibrage en attractions n°1					

F_{ij}^{2E}				E_i^{2E}	E_i
	6.3	2.9	2.8	12	12
	1.7	0.7	0.7	3	3
	1.8	1.4	4.8	8	8
A_j^{2E}	9.7	4.9	8.3		
A_j	10	5	8		
Équilibrage en émissions n°2					

F_{ij}^{2EA}				E_i^{2EA}	E_i
	6.5	2.9	2.7	12.1	12
	1.7	0.7	0.6	3.0	3
	1.8	1.4	4.6	7.9	8
A_j^{2EA}	10	5	8		
A_j	10	5	8		
Équilibrage en attractions n°2					

Figure 19 : Exemples de matrices OD résultant de 2 itérations du Fratar

Interprétation : avant toute chose, le Fratar est un algorithme intuitif qui a l'intérêt de converger rapidement. Il peut toutefois s'interpréter concrètement : il impose en fait de respecter des contraintes de saturation en émission et attraction, une zone ne pouvant émettre ou attirer plus de flux qu'elle n'en est capable. Cela revient en fait respecter le bon sens, qui nous indique par exemple qu'un actif ne peut générer simultanément plusieurs déplacements domicile-travail, ou encore qu'un emploi ne peut être occupé par deux personnes différentes.

Remarque : MODUS v2.1 impose un équilibre en émissions et attractions. Pour cette raison, il s'agit d'un modèle doublement contraint. Certains modèles ne sont contraints qu'en émissions ou attractions.

En conclusion, l'application du modèle gravitaire aux émissions et attractions de l'étape de génération, suivie de l'équilibre aux marges par l'algorithme du Fratar, conduit à l'obtention de matrices OD tous modes par catégorie de désagrégation et motifs.

5.2. LE CALIBRAGE DE LA DISTRIBUTION

Principe de la démarche

Le calibrage de la distribution consiste en la détermination du paramètre de distribution optimal au vu des matrices produites par application du modèle gravitaire et du Fratar.

Le terme « optimal » reste à préciser. En raison de leur trop faible précision, les données d'enquête ne permettent pas de construire une matrice à l'échelle du zonage qui pourrait servir de cible à la distribution de MODUS v2.1 : en effet, l'EGT 2001 ne peut être utilisée qu'à l'échelle départementale, ce qui est insuffisant en terme de désagrégation pour espérer calibrer correctement le paramètre de distribution.

Dans ce cadre, c'est au modélisateur de choisir l'objet même de l'optimum cible, les possibilités étant nombreuses et pouvant être combinées : notamment caractéristiques de longueurs, de temps, de géographie des déplacements¹.

MODUS v2.1 fait le choix de calibrer la distribution par rapport à la structure des portées des déplacements observée en Île-de-France : c'est en effet un objectif essentiel que de bien

¹ En ce sens, on notera que cette démarche diffère radicalement de celle de MODUS v2.0.

Dans ce dernier, l'étape de distribution est construite autour d'un modèle de choix discret (de type Logit) qui représente le choix de destination ; le calibrage est effectué en conséquence (par maximum de vraisemblance, comme pour les utilités : cf partie 3.2 de ce chapitre) ; on peut montrer que la formulation analytique de cette construction revient au final à celle d'un modèle de type gravitaire.

MODUS v2.1 change de point de vue en développant une approche agrégée : le modèle gravitaire est pris comme postulat de base. Le calibrage n'est pas effectué au niveau des choix individuels mais de manière globale, pour obtenir la qualité souhaitée vis-à-vis de la spécification attendue.

La raison de cette modification tient essentiellement à la difficulté d'appliquer la théorie des choix discrets au choix de destination. Tout d'abord, l'éventail des choix à appréhender est très large puisqu'il correspond à la taille du zonage, ce qui rend difficile la mise en œuvre opérationnelle de la méthode. Ensuite, le niveau de précision de l'EGT fragilise les résultats : l'échantillonnage de l'enquête est hétérogène ; en particulier, il est plus lâche là où certains comportements de mobilité doivent pourtant être bien pris en compte dans la distribution, essentiellement en périphérie francilienne où ont lieu les déplacements à longue portée. Enfin, le pragmatisme a été de mise puisque l'application de la méthode des choix discrets n'a pas été totalement convaincante dans MODUS v2.0 : l'approche globale de MODUS v2.1 offre de bien meilleurs résultats, et une souplesse de choix accrue dans la définition des phénomènes à représenter.

reproduire la caractéristique de longueur des déplacements, puisque non seulement elle impacte directement le réseau mais est aussi un déterminant fort des enjeux liés aujourd'hui à la mobilité.

Plus précisément, la méthode s'appuie sur la définition des classes de portée précisée dans partie 3.2 de ce chapitre. Le calibrage de la distribution dans MODUS v2.1 cherche à reproduire le plus exactement possible les volumes par classe observés dans l'EGT 2001, ce qui correspond concrètement à une optimisation selon 13 spécifications¹.

Mise en œuvre opérationnelle

L'outil statistique directement adapté à la démarche qui vient d'être explicité est le X^2 ; il s'agit d'un indicateur qui permet de tester d'adéquation entre une loi de probabilité (en l'occurrence, la loi décrivant le choix de destination, indirectement définie par le modèle gravitaire) et un échantillon d'observations (en l'occurrence, l'EGT 2001) par le biais de l'analyse de leurs structures dans un ensemble de classes fixé (en l'occurrence, les classes de portée).

Si r_{obs}^k (respectivement r_{sim}^k) est le pourcentage² des flux observés dans l'EGT 2001 (respectivement issus de la distribution de MODUS v2.1) dont la portée appartient à la classe k , on définit le X^2 par :

$$X^2 = \sum_{k=1}^{13} \frac{(r_{sim}^k - r_{obs}^k)^2}{r_{obs}^k}$$

Par construction, le X^2 est une valeur positive qui dépend de la valeur du paramètre de distribution. Remarquons que le X^2 croît avec les imperfections de la simulation et que si le modèle gravitaire couplé avec le Fratar était parfaitement descriptif et le paramètre de distribution parfaitement calibré, le X^2 serait nul : en effet, les volumes par classe observés et simulés seraient identiques.

Le calibrage cherche à tendre vers cette situation limite en déterminant le jeu de paramètres pour lequel le X^2 est minimal. Cette minimisation s'effectue par optimisation numérique et aboutit aux valeurs présentées dans le Tableau 9.

Pour conclure, précisons à nouveau que l'optimisation a lieu sur chaque segment de demande : on obtient ainsi 16 paramètres distincts correspondant chacun à une catégorie et un motif fixés. De plus, on impose aux paramètres de distribution d'être positifs afin de respecter les hypothèses intuitives de construction du modèle gravitaire (croissance avec l'utilité).

Résultats

Le graphique suivant présente la comparaison des volumes par classe de portée observés dans l'EGT 2001 et simulés par MODUS v2.1.

¹ C'est en fait une amélioration de la méthode basique fréquemment rencontrée qui consiste à calibrer la distribution selon la portée moyenne des déplacements.

On notera par ailleurs qu'aucune pondération n'est introduite : si l'on souhaitait disposer d'un modèle meilleur pour une certaine typologie de distance, il serait possible d'introduire une différenciation dans les poids affectés aux différentes spécifications.

² On utilise des ratios et non directement des flux afin de s'affranchir des erreurs de volumes qui ne sont pas du fait de la distribution, mais des approximations de la génération.

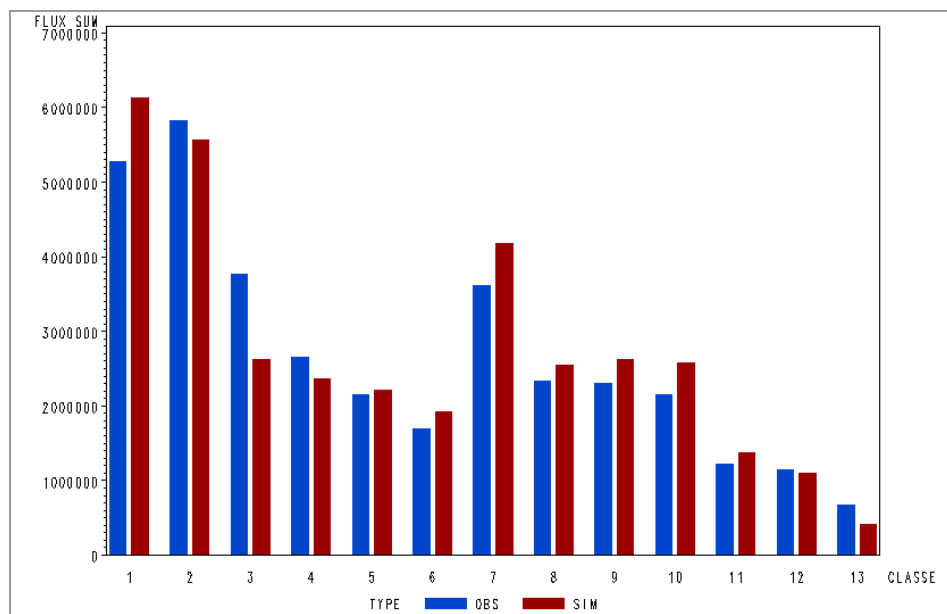


Figure 20 : Volumes totaux de déplacements observés et simulés par classe de portée

On constate que la forme globale de la répartition des portées est bien représentée par le modèle gravitaire, bien que les degrés de liberté sur lesquels le calibrage peut jouer est faible (contrairement à MODUS v2.0, MODUS v2.1 n'utilise pas de segmentation géographique du paramètre de distribution).

6. L'ÉTAPE DE CHOIX MODAL

6.1. DÉTERMINATION DU CHOIX DE MODE

La structure du choix modal de MODUS v2.1 a été explicitée dans le paragraphe sur les utilités (cf ci-dessus, partie 3 de ce chapitre). Fixons une origine i et une destination j . Si le flux tous modes déterminé par la distribution est noté F_{ij} , alors les probabilités p_{ij}^{TC} , p_{ij}^{VP} , p_{ij}^{MD} de choisir chacun des modes sont :

$$p_{ij}^{TC} = \frac{e^{U_{ij}^{TC}}}{e^{U_{ij}^{TC}} + e^{U_{ij}^{VP}} + e^{U_{ij}^{MD}}} \quad p_{ij}^{VP} = \frac{e^{U_{ij}^{VP}}}{e^{U_{ij}^{TC}} + e^{U_{ij}^{VP}} + e^{U_{ij}^{MD}}} \quad p_{ij}^{MD} = \frac{e^{U_{ij}^{MD}}}{e^{U_{ij}^{TC}} + e^{U_{ij}^{VP}} + e^{U_{ij}^{MD}}}$$

Les flux modaux F_{ij}^{TC} , F_{ij}^{VP} , F_{ij}^{MD} sont égaux à :

$$F_{ij}^{TC} = p_{ij}^{TC} \cdot F_{ij} \quad F_{ij}^{VP} = p_{ij}^{VP} \cdot F_{ij} \quad F_{ij}^{MD} = p_{ij}^{MD} \cdot F_{ij}$$

6.2. CALIBRAGE DU CHOIX MODAL

Le calibrage du choix modal de MODUS v2.1 a été effectué lors de celui des utilités, ces dernières étant construites pour reproduire au mieux le choix de mode observé dans l'EGT 2001.

Il est cependant nécessaire de vérifier quels sont les résultats du choix de mode appliqué à la distribution de MODUS v2.1. En effet, l'analyse des résultats du calibrage des utilités a eu lieu sur les flux OD observés dans l'EGT 2001 : il est donc possible qu'en combinant les erreurs de la distribution et celles du choix de mode, les résultats ne soient plus satisfaisants.

Les volumes simulés présentent bien pour chaque mode une structure très proche de celle observée dans l'EGT 2001, comme le montre l'analyse par classes de portée des graphiques suivants :

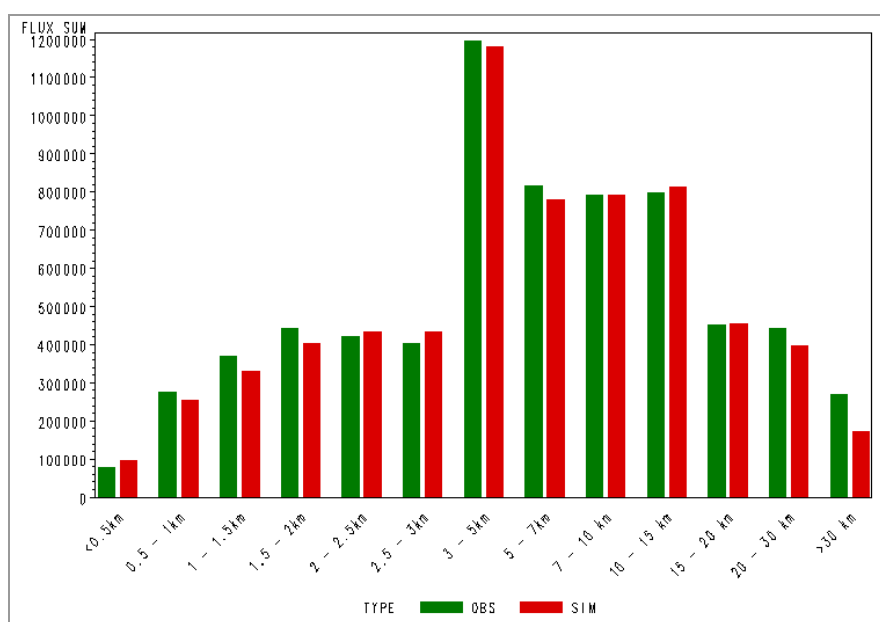


Figure 21 : Volumes TC observés et simulés par classe de portée

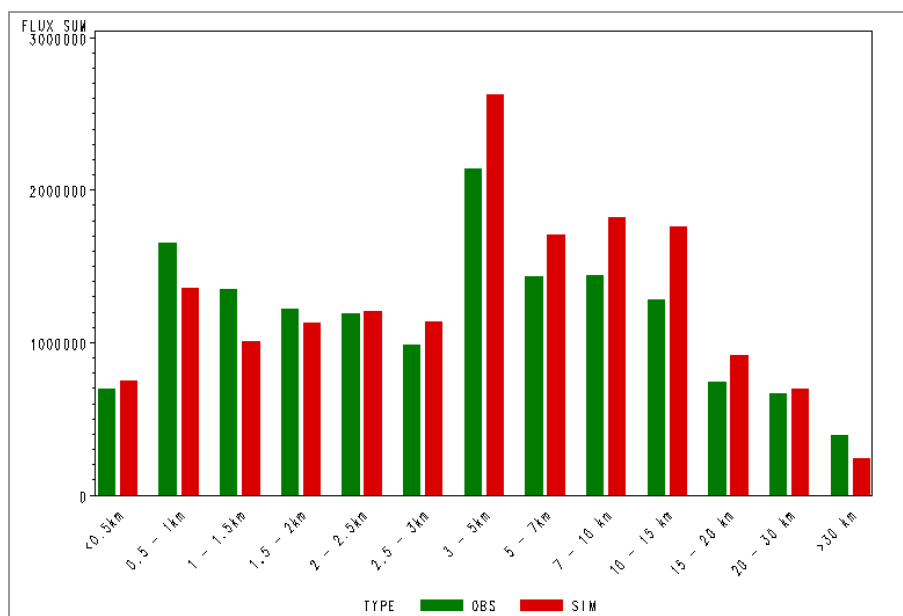


Figure 22 : Volumes VP observés et simulés par classe de portée

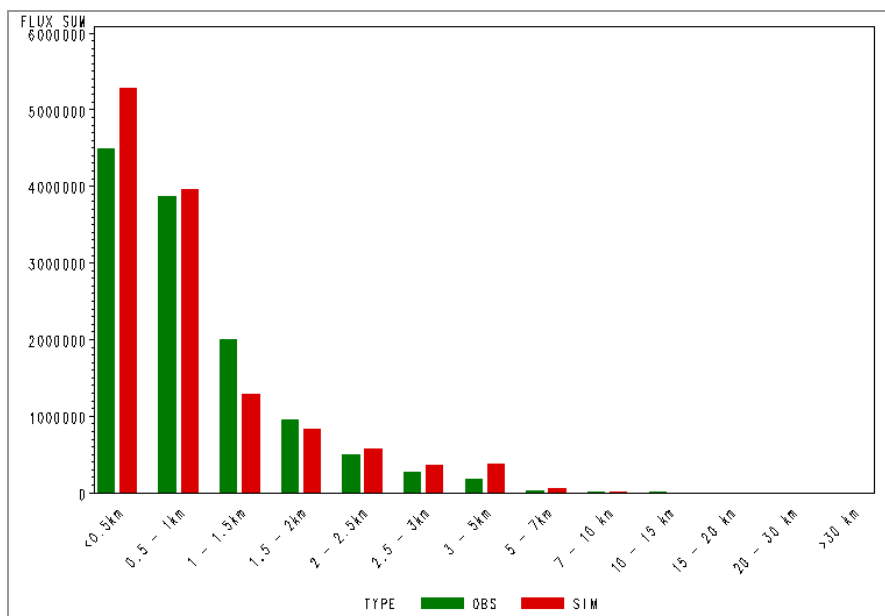


Figure 23 : Volumes MD observés et simulés par classe de portée

Conformément à l'intuition, les résultats issus de la séquence {distribution, choix modal} sont moins bons que ceux de chacune des étapes considérées séparément, comme les montrent les parts modales par classes de portée, à comparer avec celles des Figure 10 et Figure 11 :

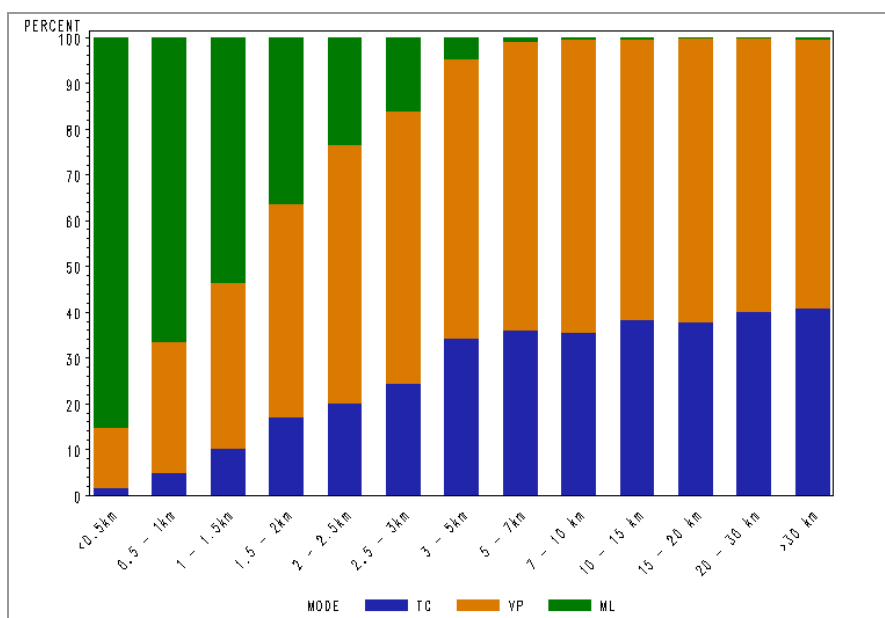


Figure 24 : Parts modales observées sur les OD l'EGT 2001 par classe de portée

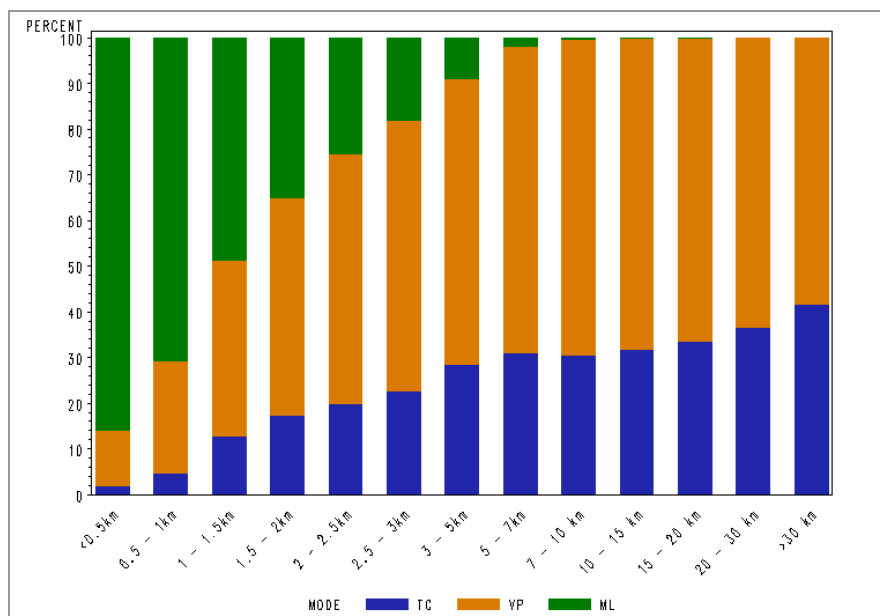


Figure 25 : Parts modales simulées par MODUS v2.1 par classe de portée

Malgré tout, étant donné la simplicité des hypothèses fondatrices de MODUS v2.1 (nombre très limité de paramètres, modèle gravitaire, modèle Logit simple, etc.), il est légitime de considérer ces résultats comme satisfaisants.

7. LA FINALISATION DES MATRICES

L'exécution des étapes de génération, distribution et choix modal de MODUS v2.1 conduit à l'obtention de 48 matrices OD journalières, correspondant aux différentes combinaisons possibles des 3 modes et des 16 groupes de segmentation

Une phase dite de « finalisation » est nécessaire afin d'obtenir des matrices utilisables par l'affectation, dernière des 4 étapes de MODUS v2.1. Elle consiste en les adaptations suivantes :

Adaptation	Matrices VP	Matrices TC
Horaire	Passage en HPM et HPS	Passage en HPM et HPS
Unité	Conversion en Unités de Véhicule Particulier	-
Zonage	Ajout des zones externes 1278 à 1305	Conversion dans le zonage TC 1192 zones
Flux	Ajout des flux de poids lourds Ajout des flux des zones externes (cordon) Ajout des flux des générateurs spécifiques	

Tableau 10 : Caractéristiques des matrices finalisées pour l'affectation

7.1. PASSAGE AUX MATRICES HORAIRES

La première étape est de transformer les matrices journalières en matrices horaires. Pour cela, des taux de passage à l'HPM et l'HPS déterminés à partir de l'EGT 2001 sont appliqués à chacune des matrices OD. On se référera à la partie 3.2.2 du titre « Principes de modélisation utilisés dans MODUS v2.1 » pour la définition précise de l'HPM et l'HPS.

Ces taux dépendent du motif et des couronnes origine et destination des flux considérés (Paris, Petite Couronne et Grande Couronne).

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0.2987	0.3709	0.4138	Paris	0.2920	0.3243	0.3887	Paris	0.2118	0.1585	0	Paris	0.2118	0.1585
	0.0131	0.0022	0		0.0076	0.0075	0		0.0230	0	0		0.0230	0
PC	0.3503	0.3452	0.4196	PC	0.2665	0.2842	0.3395	PC	0.2846	0.2405	0.3396	PC	0.2846	0.2405
	0.0100	0.0131	0		0.0169	0.0100	0.0109		0	0.0127	0		0.0127	0
GC	0.4056	0.4246	0.3641	GC	0.2720	0.3228	0.2933	GC	0.5000	0.4021	0.2214	GC	0.5000	0.4021
	0.0035	0	0.0032		0.0031	0.0073	0.0086		0.2497	0	0.0166		0.2497	0.0166

Motif 1 : Domicile → Travail

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0.0064	0.0054	0.0017	Paris	0.0074	0.0100	0.0070	Paris	0.0069	0.0153	0	Paris	0.0069	0.0153
	0.2440	0.2809	0.3436		0.1299	0.1612	0.2040		0.1143	0.1873	0		0.1143	0.1873
PC	0.0022	0.0031	0	PC	0.0080	0.0022	0.0059	PC	0	0.0065	0	PC	0	0.0065
	0.2676	0.2643	0.3679		0.1378	0.1813	0.2093		0.1339	0.1529	0.4021		0.1339	0.1529
GC	0	0	0.0012	GC	0.0111	0.0132	0.0043	GC	0	0	0.0104	GC	0	0.0104
	0.3223	0.3445	0.3209		0.2099	0.2394	0.2077		0	0.1985	0.1527		0.1985	0.1527

Motif 2 : Travail → Domicile

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0.1514	0.2013	0.2348	Paris	0.1637	0.0785	0.0863	Paris	0.1286	0.1914	0	Paris	0.1286	0.1914
	0.0404	0.0398	0.2652		0.0415	0.0577	0		0.0629	0.0409	0		0.0629	0.0409
PC	0.1521	0.2654	0.3997	PC	0.1112	0.1528	0.0604	PC	0.1176	0.1666	0.0337	PC	0.1176	0.1666
	0.0477	0.0228	0		0.0654	0.0689	0.0771		0.1337	0.0455	0		0.1337	0.0455
GC	0.2183	0.3055	0.3810	GC	0.1370	0.1617	0.1337	GC	0	0.3436	0.1878	GC	0	0.3436
	0.0241	0.0456	0.0088		0.0498	0.0721	0.0773		0	0	0.0319		0	0.0319

Motif 3 : Domicile → Achats / Affaires personnelles

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0.0058	0	0	Paris	0.0199	0.0153	0	Paris	0.0234	0	0	Paris	0.0234	0
	0.1668	0.2306	0.2824		0.1508	0.1583	0.2283		0.1277	0.2464	0		0.1277	0.2464
PC	0	0.0025	0	PC	0.0076	0.0222	0.0164	PC	0	0.0228	0	PC	0	0.0228
	0.2687	0.2138	0.2931		0.1028	0.1426	0.1617		0.1675	0.1173	0.3214		0.1675	0.1173
GC	0	0.0220	0	GC	0	0.0131	0.0201	GC	0	0	0.0295	GC	0	0
	0.2427	0.3743	0.2659		0.2002	0.1336	0.1472		0	0	0.1019		0	0.1019

Motif 4 : Achats / Affaires personnelles → Domicile

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0.0522	0.0448	0.0154	Paris	0.0484	0.0431	0.0864	Paris	0.0085	0	0	Paris	0.0085	0
	0.1460	0.2304	0.3848		0.0705	0.1219	0.1670		0.0348	0.0619	0		0.0348	0
PC	0.1488	0.0838	0.0112	PC	0.1132	0.0901	0.1020	PC	0	0.0210	0	PC	0	0.0210
	0.1294	0.1755	0.3419		0.0912	0.0944	0.1038		0.1018	0.0456	0		0.1018	0.0456
GC	0.2799	0.2779	0.1256	GC	0.1013	0.1003	0.0962	GC	0	0	0.0413	GC	0	0.0413
	0.0953	0.0786	0.1551		0.1118	0.1044	0.1037		0.5000	0	0.0405		0	0.0405

Motif 5 : Basé Travail et non basé Domicile

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0.0162	0.0263	0	Paris	0.0096	0.0198	0.0345	Paris	0.0183	0	0	Paris	0.0183	0
	0.1192	0.1546	0.1646		0.0907	0.0995	0.0744		0.0952	0.1326	0		0.0952	0.1326
PC	0.0368	0.0524	0.1300	PC	0.0399	0.0507	0.0205	PC	0	0.0332	0	PC	0	0.0332
	0.0952	0.0929	0.2438		0.1034	0.1116	0.1398		0	0.1163	0		0	0.1163
GC	0.0340	0.1209	0.0409	GC	0.0194	0.0170	0.0426	GC	0	0	0.0481	GC	0	0.0481
	0.2079	0	0.1307		0.2330	0.2131	0.1307		0	0	0.0834		0	0.0834

Motif 6 : Non basé Travail et non basé Domicile

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0.0328	0.0736	0.1128	Paris	0.0144	0.0168	0.1308	Paris	0.0324	0	0	Paris	0.0324	0
	0.0663	0.1025	0.1084		0.0693	0.1486	0.0774		0.0758	0	0		0.0758	0
PC	0.0339	0.0233	0.0634	PC	0.0112	0.0168	0.0170	PC	0.0422	0.0273	0	PC	0.0422	0.0273
	0.1002	0.1199	0.1995		0.0348	0.1048	0.0960		0.0675	0.1049	0		0.0675	0.1049
GC	0.1228	0.1748	0.1045	GC	0.0910	0.0301	0.0217	GC	0	0	0.0205	GC	0	0.0205
	0.0627	0.0723	0.0765		0.0714	0.0877	0.1124		0	0	0.1005		0	0.1005

Motif 7 : Domicile → Loisirs

TC	HPS	Paris	PC	GC	VP	HPS	Paris	PC	GC	MD	HPS	Paris	PC	GC
	HPM					HPM					HPM			
Paris	0	0.0032	0.0083	Paris	0	0.0039	0	Paris	0.0110	0.0390	0	Paris	0.0110	0.0390
	0.1461	0.2328	0.2372		0.0693	0.0772	0.0339		0.1199	0.1693	0		0.1199	0.1693
PC	0.0217	0	0	PC	0	0.0008	0.0045	PC	0	0.0143	0	PC	0	0.0143
	0.1264	0.2119	0.1879		0.0266	0.1086	0.0761		0	0.1682	0		0	0.1682
GC	0.0483	0.0466	0.0396	GC	0	0	0.0041	GC	0	0	0.0069	GC	0	0.0069
	0.1993	0.1884	0.2193		0.0422	0.1414	0.1249		0	0.3017	0.1602		0.3017	0.1602

Motif 8 : Loisirs → Domicile**Tableau 11 : Taux horaires TC, VP, MD**

7.2. FINALISATION DES MATRICES VP

Passage en UVP

L'affectation de MODUS v2.1 nécessitant d'utiliser des matrices en Unité de Véhicule Particulier (UVP), c'est-à-dire en flux non plus de voyageurs mais de véhicules, une conversion est nécessaire. Pour cela, des taux d'occupation des VP, déterminés à partir de l'EGT 2001 par motif et couronnes d'origine et de destination (Paris, Petite Couronne et Grande Couronne), sont appliqués aux matrices VP.

Par sommation, on dispose de deux matrices UVP HPM et HPS.

Motif 1 : Domicile → Travail Motif 2 : Travail → Domicile Motif 3 : Domicile → Achats/Perso Motif 4 : Achats/Perso → Domicile Motif 5 : B. travail et N.B. Domicile Motif 6 : N.B. travail et N.B. Domicile Motif 7 : Domicile → Loisirs Motif 8 : Loisirs → Domicile	Paris	PC	GC
Paris	1.1328 1.1725 1.4557 1.4399 1.1183 1.5226 1.7350 1.8723	1.0462 1.1055 1.3564 1.2960 1.0960 1.3828 1.3917 1.6342	1.0580 1.0804 1.8188 1.3832 1.1254 1.7849 1.5035 1.3606
PC	1.0775 1.0447 1.3318 1.4420 1.1092 1.4214 1.5906 1.3719	1.0599 1.0854 1.4601 1.4352 1.1093 1.4565 1.6718 1.7389	1.0557 1.0486 1.3165 1.3939 1.0761 1.4006 1.5992 1.5733
GC	1.0580 1.0720 1.4461 1.6768 1.0930 1.5188 1.4598 1.8785	1.0479 1.0478 1.4182 1.2933 1.0713 1.4828 1.6727 1.5358	1.0881 1.0899 1.4136 1.3912 1.1227 1.4460 1.6648 1.6744

Tableau 12 : Taux d'occupation VP

Ajout des poids lourds

L'EGT 2001 ne considérant que les déplacements de voyageurs, les matrices UVP HPM et HPS ne comportent pas de données relatives au trafic poids-lourds (PL) : il faut donc les ajouter a posteriori. Cette étape est réalisée dans MODUS v2.1 sur la base de deux hypothèses :

- Conformément aux chiffres moyens observés en Île-de-France, le trafic PL en HPM et HPS est uniformément égal à 5% du trafic VP ;
- 1 PL équivaut à 2 UVP, traduisant l'encombrement supérieur d'un camion par rapport à une voiture.

Ces hypothèses équivalent à multiplier les matrices UVP HPM et HPS par un facteur 1,1.

Ajouts du cordon et des vecteurs spécifiques

La finalisation des matrices VP s'achève par l'ajout des flux non pris en compte par la modélisation :

- flux concernant les 28 zones externes* : afin de traduire les échanges routiers entre l'Île-de-France et son extérieur, des matrices HPM et HPS dites « cordons »¹ sont agrégées aux matrices

¹ Les cordons ont été mis à jour en 2004 sur la base d'une enquête OD réalisée par le SETRA entre 1997 et 2000 au niveau des principales routes d'entrée en Île-de-France et des comptages de 2003. Pour plus d'éléments, on se reportera au document « Mise à jour du cordon du modèle de trafic de la DREIF » (DREIF, 2004).

issues de MODUS v2.1. Ci-dessous est présenté le résultat de l'agrégation : en rouge figure la matrice modélisée, en bleu le cordon ; les types de flux sont précisés.

O \ D	1	<i>j</i>	.....	1277	1278		1305
1			⋮					
⋮			⋮					
<i>i</i>	<i>interne</i>	.....	.....	.....	<i>échange sortant</i>	.....
⋮			⋮					
1277			⋮					
1278								
...			<i>échange entrant</i>				<i>transit</i>	
1305			⋮					

Figure 26 : Ajout d'une matrice cordon et types de flux

- flux des « générateurs spécifiques » : les « générateurs spécifiques » sont les pôles générant un trafic particulier non modélisé, tels que celui lié aux gares ou aux aéroports. Leur intégration au cours de l'étape de finalisation consiste en une simple substitution des vecteurs origine et destination des zones concernées dans les matrices OD par des données externes réputées plus complètes et plus fiables (par exemple, données fournies par ADP concernant les aéroports de Paris Charles de Gaulle et d'Orly).

Ci-dessous est représentée l'intégration des flux d'un générateur spécifique située dans la zone k du zonage :

Substitution de la $k^{\text{ème}}$ colonne

O \ D	1	2	k	.....	1305
1				⋮		
2				⋮		
⋮				⋮		
k	F_{kk}	.....	.....
⋮				⋮		
1305				⋮		

Substitution de la $k^{\text{ème}}$ ligne

Figure 27 : Intégration des flux d'un générateur spécifique

NB : actuellement, en l'absence de données à jour, MODUS v2.1 ne tient pas compte des générateurs spécifiques.

7.3. FINALISATION DES MATRICES TC

Passage au zonage TC

La somme des matrices horaires TC par motifs et catégories permet de déterminer deux matrices correspondant aux flux des voyageurs TC en HPM et HPS. Le dernier ajustement de finalisation consiste en une conversion de zonage : en effet, l'affectation TC utilise le zonage TC de 1192 zones (cf partie 2.1 du titre « Principes de modélisation utilisés dans MODUS v2.1 »).

L'inclusion du zonage MODUS dans le zonage TC permet d'effectuer facilement la conversion souhaitée. Si les zones TC i^{TC} et j^{TC} sont les agrégations respectives des zones MODUS $\{i \in i^{TC}\}$ et $\{j \in j^{TC}\}$, alors on a :

$$F_{i^{TC} j^{TC}} = \sum_{i \in i^{TC}} \sum_{j \in j^{TC}} F_{ij}$$

8. L'ÉTAPE D'AFFECTION

8.1. STRUCTURE – CONCEPT DE COÛT GÉNÉRALISÉ

L'étape d'affectation confronte la demande et l'offre en simulant la réalisation des flux des matrices OD calculés par modèle de demande sur le système de transport schématisé par les réseaux. Elle consiste en deux blocs indépendants, l'affectation VP et l'affectation TC¹, reposant tous deux sur l'utilisation du concept de « coût généralisé »².

De manière générique, la fonction de coût généralisé C_G est une fonction des différents coûts du déplacement, notamment sa durée et son prix :

$$C_G = f(\text{durée}, \text{prix})$$

Le plus souvent, f est une fonction linéaire et C_G est alors composé d'une partie dite « monétaire » notée C , représentant le coût direct du déplacement, et d'une partie dite « monétarisable » notée T_G , homogène à une durée et calculée notamment à partir du temps de parcours – appelée souvent pour cette raison « temps généralisé » :

$$C_G = C + \nu \cdot T_G$$

Dans cette formule, ν est appelé « valeur du temps » et concrétise l'hypothèse théorique fondamentale stipulant que le temps est une grandeur monétarisable.

¹ D'où l'utilisation fréquente mais abusives des expressions « modèle VP » et « modèle TC » pour évoquer les étapes d'affectation VP et TC.

² Le coût généralisé d'un itinéraire est ici totalement déconnecté de l'utilité. Certains modèles utilisent le coût généralisé pour calculer l'utilité d'une OD, mais ce n'est pas le cas de MODUS v2.1 : les étapes de modélisation de la demande sont construites autour du concept d'utilité, celle d'affectation autour de celui de coût généralisé, sans qu'aucun lien n'existe. C'est un parti pris de MODUS depuis la version 2.0.

8.2. AFFECTATION DES MATRICES VP

Le processus d'affectation VP de MODUS v2.1 repose sur deux algorithmes mis en œuvre successivement et de manière itérative :

1. un algorithme de *recherche d'itinéraire*, qui identifie les itinéraires de plus court chemin ;
2. un algorithme d'*écoulement du trafic*, qui traduit l'impact de la demande sur l'offre à travers l'évaluation de la qualité de service.

8.2.1. LE COÛT GÉNÉRALISÉ ROUTIER DANS MODUS v2.1

Partie monétaire du coût généralisé routier

La partie monétaire du coût généralisé dans MODUS v2.1 s'identifie au montant des péages dont doit s'acquitter le voyageur.

Partie monétarisable du temps généralisé routier

La partie monétarisable du coût généralisé dans MODUS v2.1 est calculée ainsi :

$$T_G = 1.25 \cdot T_{chg} - 0,25 \cdot T_0 + 0,0252 \cdot L - \beta \cdot L,$$

avec :

- T_0 : « temps à vide » correspondant à un fonctionnement fluide du tronçon, c'est-à-dire en l'absence d'usagers (en secondes) ;
- T_{chg} : temps dit « en charge » lorsque le tronçon est soumis au flux de trafic (en secondes) ;
- L : longueur du tronçon considéré (en mètres).

Les temps utilisés se composent des temps de rabattement sur le réseau, des temps de parcours des tronçons empruntés, et des éventuelles pénalités associées aux mouvements au nœud.

Le terme $0,0252 \cdot L$ correspond au coût d'utilisation de la voiture¹, grandeur estimée monétarisable et non pas monétaire car elle n'est pas appréhendée de manière objective : il faudrait pour cela prendre en compte l'amortissement du véhicule, son entretien etc..

Le paramètre β représente un bonus attribué à certains types de tronçons, pour tenir compte d'éléments qualitatifs de confort ou de sécurité de conduite pouvant influencer le choix d'itinéraire. Il est estimé 0,049 sur le périphérique, à 0,016 pour les types autoroutiers ou voies rapides, et à 0 sinon.

8.2.2. L'ALGORITHME DE RECHERCHE D'ITINÉRAIRE : LE MODÈLE PRIX – TEMPS

Principe de la méthode

La recherche d'itinéraire dans MODUS v2.1 utilise un modèle « prix – temps » qui repose sur l'hypothèse que chaque usager a sa propre valeur du temps, c'est-à-dire sa propre perception du temps et de l'argent consacré au déplacement : les voyageurs à forte valeur du temps

¹ En utilisant la valeur du temps médiane de 14,89€ de MODUS v2.1 (cf ci-dessous, partie 8.2.2 de ce chapitre), le terme $0,0252 \cdot L$ conduit à un coût kilométrique de 0,1€/km, correspondant à l'ordre de grandeur des valeurs identifiées dans la littérature.

préfèrent les itinéraires rapides, même s'ils sont plus chers, tandis que ceux à faible valeur du temps choisissent les itinéraires moins chers, même s'ils sont plus lents¹.

Par conséquent, il n'existe pas de plus court chemin unique pour une relation donnée². L'affectation utilise donc un ensemble de parcours différents grâce à un algorithme de recherche d'itinéraires multiples.

Illustration sur un cas simple à deux itinéraires

Le fonctionnement d'un modèle prix – temps s'illustre aisément dans le cas d'une OD fixée pour laquelle deux itinéraires distincts, notés A et B, sont possibles.

Pour une valeur du temps v quelconque, le coût généralisé vaut :

- $C_A(v) = P_A + v \cdot T_A$ pour l'itinéraire A de temps généralisé T_A élevé et prix P_A bas ;
- $C_B(v) = P_B + v \cdot T_B$ pour l'itinéraire B de temps généralisé T_B bas et prix P_B élevé.

Un voyageur est indifférent aux itinéraires A et B si sa valeur du temps v^* vérifie $C_A(v^*) = C_B(v^*)$, autrement dit :

$$v^* = \left| \frac{P_B - P_A}{T_B - T_A} \right|$$

L'itinéraire A est choisi par les voyageurs dont la valeur du temps est inférieure à v^* , l'itinéraire B par les voyageurs dont la valeur du temps est supérieure à v^* .

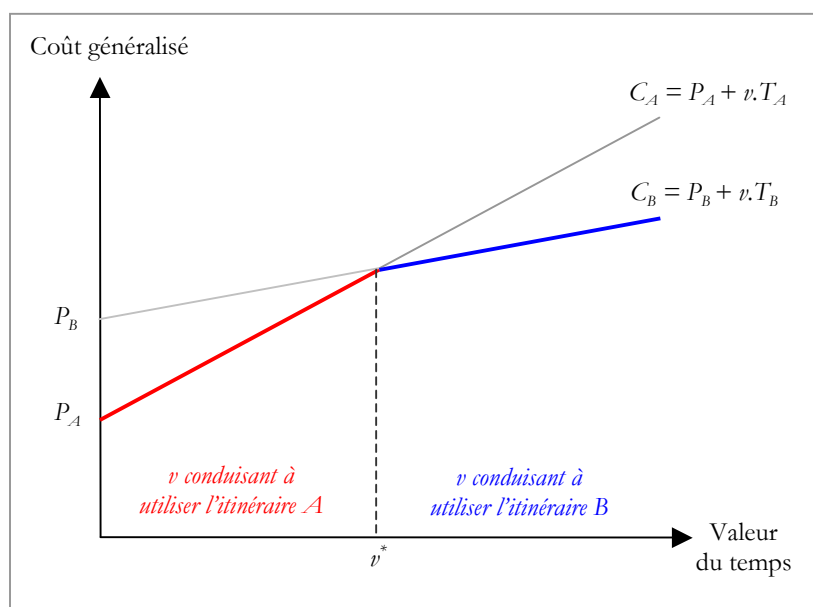


Figure 28 : d'itinéraire selon la valeur du temps dans un modèle prix – temps - Choix

La distribution de la valeur du temps dans la population est supposée déterminée par une fonction de répartition notée F . Elle est scindée en deux classes délimitées par v^* et

¹ Cette arbitrage différencié selon les individus entre le « prix » et le « temps » justifie l'expression « prix – temps ».

² Sauf pour les relations pour lesquelles le coût est nul : il en existe de nombreuses dans MODUS v2.1 car, comme nous le verrons par la suite, le coût s'identifie stricto-sensu au péage.

correspondant au choix d'itinéraire effectué, ce qui permet de déterminer les probabilités ρ_A et ρ_B d'utiliser chacun des itinéraires :

$$\rho_A = \Pr(v < v^*) = F(v^*)$$

$$\rho_B = \Pr(v \geq v^*) = 1 - F(v^*)$$

Le trafic sur chacun des axes est obtenu immédiatement en multipliant le trafic total de l'OD par les probabilités ρ_A et ρ_B .

Cette démarche, immédiatement généralisable à un nombre quelconque d'itinéraires, est mise en œuvre dans MODUS v2.1.

Distribution de la valeur du temps dans MODUS v 2.1 :

La valeur du temps utilisée dans le coût généralisé routier de MODUS v2.1 est distribuée selon une loi log-normale¹ (représentée ci-dessous par la Figure 29) :

- de médiane 12,44€ déterminée à partir des valeurs du rapport Boiteux 2 actualisées à l'horizon 2003, auxquelles ont été appliquées des coefficients HPM et HPS par motifs évalués à partir de l'EGT 2001 ;
- d'écart-type 0,6€ conforme aux résultats de l'évaluation de l'opération Prado-Carénage².

Avec une telle loi, la valeur du temps moyenne est de 14,89€.

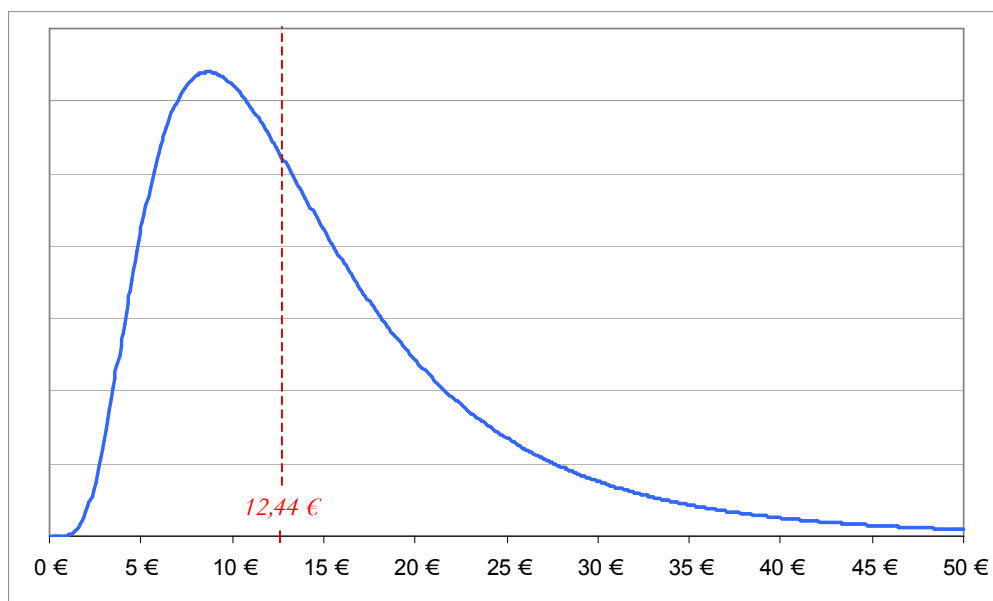


Figure 29 : Distribution log-normale de la valeur du temps dans l'affectation de MODUS v2.1

8.2.3. L'ALGORITHME D'ÉCOULEMENT DU TRAFIC

L'algorithme d'écoulement du trafic dans MODUS v2.1 se base sur :

- la modélisation de la congestion ;
- la modélisation des impacts des files d'attente qui en découlent.

¹ Le choix d'une loi log-normale se justifie par son utilisation usuelle pour représenter la répartition des revenus dans la population, corrélée en théorie à celle de la valeur du temps.

² Qui met en évidence une fourchette de 0,6 € à 1,1 € pour l'écart-type de la distribution de la valeur du temps.

La fonction temps – débit

La congestion est prise en compte grâce au terme T_{chg} apparaissant dans le coût généralisé. Suite à la recherche d'itinéraire, T_{chg} est calculé à l'aide d'une fonction « temps – débit », monotone croissante avec le trafic conformément à l'expérience.

MODUS v2.1 utilise la fonction temps – débit de l'INRETS, dite « fonction DAVIS » qui s'applique à chaque tronçon du réseau sous la forme suivante :

$$T_{chg} = T_0 \cdot \left(\frac{1,1 - a \cdot Sat}{1,1 - Sat} \right) \quad \text{pour } Sat < 1$$

$$T_{chg} = T_0 \cdot \left(\frac{(1,1 - a) \cdot Sat^2}{0,1} \right) \quad \text{pour } Sat \geq 1$$

La variable Sat représente la saturation du tronçon et vaut : $Sat = \frac{q}{c \cdot Cap}$ avec :

- q : la charge du tronçon de l'itération courante ;
- Cap : capacité en UVP/h, correspondant au débit maximal observé en sortie du tronçon ;
- a et c : paramètres positifs définis par l'utilisateur : $a \in [0;1]$ et $c \in [0;+\infty[$. Dans MODUS v2.1, c vaut 1 et a dépend du type de route (cf tableau ci-dessous).

Le réseau routier compte 14 types de route :

Type de voie	Code	Capacité par défaut UVP/h/voie	Vitesse à vide par défaut km/h	Coeff "a"
Autoroutes	07	2100	110	0.9
Périphérique	14	2100	90	0.9
Bd circulaire de la Défense	13	2100	110	0.88
Voies rapides	26	2100	70	0.8
GC : routes à grande circulation	06	1800 à 2000	70	0.65
Bretelles d'accès	27	1500	70	0.6
GC : voies intermédiaires	05	1300*	70	0.6
PC : voies intermédiaires	12	2000*	60	0.55
GC : voies de desserte	03	1400*	60	0.5
Bd des Maréchaux	19	2500*	40	0.5
Paris	20	1900*	40	0.4
PC : voies de desserte	21	1300*	40	0.4
Limites du réseau modélisé	18	200*	50	0
Voies de distribution	25	700*	30	0.4

* valeur par défaut peu significative - dépend surtout du tronçon

Tableau 13 : Types de tronçons dans MODUS v2.1 et coefficient « a » associé

Dans ce cadre, les courbes temps – débit de MODUS v2.1 ont la forme suivante :

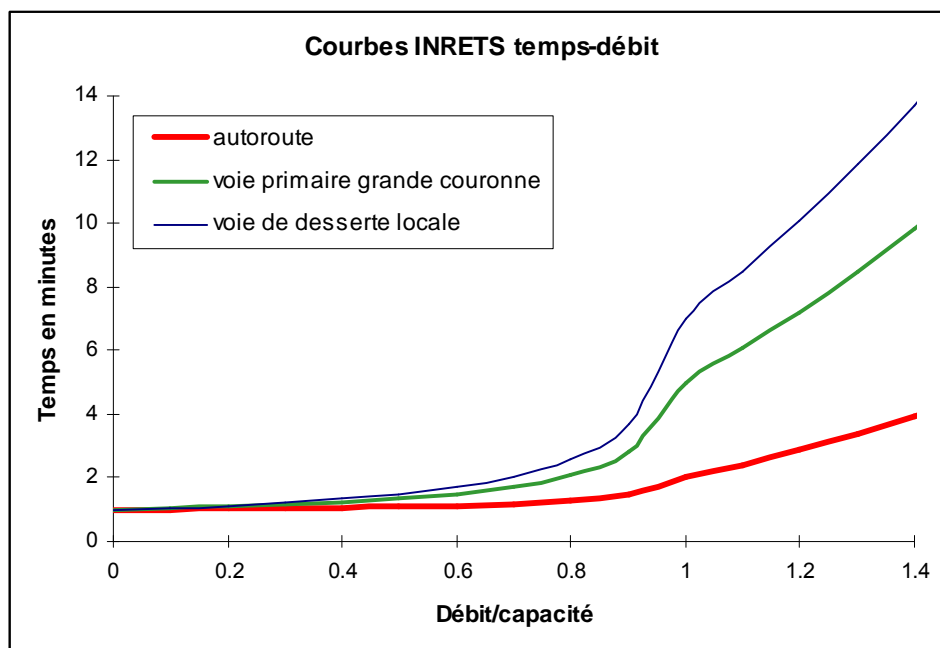


Figure 30 : Courbes temps – débit de MODUS v2.1

La demande écrêtée¹

En plus de l'application des courbes temps – débit, MODUS v2.1 met en œuvre un second processus pour traduire les impacts de la congestion : la « demande écrêtée ».

Les principes de modélisation décrits jusqu'à présent n'interdisent pas que le nombre de véhicules demandant à utiliser une infrastructure soit supérieur à sa capacité. Ainsi, les flux affectés peuvent excéder la capacité des tronçons, ce qui est physiquement impossible : dans la réalité, il y a création d'une file d'attente en amont, phénomène qui n'est pas appréhendé par la modélisation statique².

Pour résoudre ce problème, MODUS v2.1 utilise un algorithme spécifique appelé « demande écrêtée » qui prend en compte le nombre maximal d'utilisateurs pouvant entrer de manière effective sur un tronçon pendant l'heure de pointe. Il fonctionne en identifiant tout d'abord les tronçons sur lesquels la demande dépasse la capacité et y détermine le surplus en question ; puis il s'intègre à l'affectation suivant deux grands principes :

- le surplus est mis dans un potentiel d'écrêtement qui est propagé sur les tronçons en aval par réduction de la demande concernée : le blocage des flux et la non réalisation de la totalité de la demande est ainsi pris en compte ;

¹ Pour plus de détails sur la demande écrêtée, on se référera au manuel du logiciel AEL 3.0 de B. Saint-Hilaire

² C'est un biais naturel de la modélisation statique : en procédant par moyenne horaire, elle n'appréhende pas les phénomènes d'écoulement, et notamment les files d'attente. Ainsi, lorsque flux affecté dépasse la capacité du tronçon, il faut comprendre qu'une partie du flux est directement « réalisé » tandis que l'autre est en fait « en attente ». L'écrêtement de la demande essaie de corriger ce biais sans entrer dans une mécanique complexe comme celle des modèles macroscopiques dynamiques.

- le surplus est transformé en une file d'attente concrétisée par l'ajout d'un temps de parcours sur le tronçon en amont de l'écrêtage.

8.2.4. LA PROCÉDURE D'AFFECTATION, UN ALGORITHME ITÉRATIF À L'ÉQUILIBRE

La mise en œuvre de l'algorithme d'écoulement du trafic conduit à une modification de la qualité de service et donc du coût généralisé. Afin de représenter une situation stable, ne dépendant pas uniquement d'un état initial correspondant à la simple description physique du réseau, l'étape d'affectation découle d'un processus itératif : chaque itération est composée d'une recherche d'itinéraires et d'un écoulement du trafic dont l'impact sur le coût généralisé est réutilisé par le pas suivant.

Dans ces calculs, la prise en compte de la congestion a des conséquences concrètes puisqu'elle peut conduire à des reports sur les itinéraires les moins chargés d'une itération à l'autre.

La pratique montre que cet algorithme itératif est convergent : l'étape d'affectation décrit donc une situation d'équilibre entre offre et demande.

8.3. AFFECTATION DES MATRICES TC

8.3.1. LE COÛT GÉNÉRALISÉ TC DANS MODUS v2.1

L'affectation TC de MODUS v2.1 utilise successivement différentes formes du coût généralisé. Elles ont en commun d'être des combinaisons linéaires des variables suivantes :

- *composantes temporelles du déplacement* qui en décrivent les différentes étapes :
 - temps de rabattement T_{rab} , correspondant au temps de marche à pied depuis l'origine du déplacement jusqu'à l'arrêt de première montée ;
 - temps d'attente au départ T_{att} , correspondant au temps d'attente à l'arrêt de départ ; en faisant l'hypothèse d'une arrivée homogène des passagers à l'arrêt, MODUS v2.1 l'identifie à la demi-fréquence de la liaison utilisée ; il est par ailleurs plafonné à 5 minutes : les usagers sont supposés connaître les horaires sur les lignes dont la fréquence excède les 10 minutes ;
 - temps en véhicule T_{veh} , correspondant au temps passé dans les véhicules de TC, durée des arrêts incluse ;
 - temps de marche T_{mar} , correspondant au temps de marche pour les ruptures avec liaison piétonne entre les arrêts ;
 - temps de correspondance T_{cor} , correspondant à l'attente aux arrêts de correspondances ; MODUS v2.1 le plafonne à 20 minutes.
 - temps d'accès à destination T_{acc} , correspondant au temps de marche à pied depuis l'arrêt de dernière descente jusqu'à la destination du déplacement ;
- *nombre de « ruptures » du déplacement N_r* , pour changement de véhicule : le concept de rupture précise et complète celui de correspondance ; par exemple, l'utilisation d'un lien piétonnier entre deux trajets en véhicules TC est considérée comme une unique rupture, même s'il n'y a pas à proprement parler de correspondance ;
- *pénalité d'avance ou de retard du service ΔT* : un déplacement TC qui utilise une ligne est tributaire non seulement de sa fréquence mais également de ses horaires de fonctionnement. Les attributs du réseau TC dans MODUS v2.1 (cf Tableau 2) permettent

d'en tenir compte par le calcul d'un indicateur ΔT ; il mesure le décalage entre l'horaire souhaité $H_{souhait}$ pour réaliser le déplacement et l'horaire effectif de la ligne H_{eff} :

$$\Delta T = |H_{souhait} - H_{eff}|$$

Considérons à titre d'exemple le cas de l'HPM, dont l'horaire d'affectation est fixé à la période 7h45 – 8h45 dans MODUS v2.1. Un service assurant une desserte entre 7h45 et 8h45 n'est pas pénalisé et a donc un ΔT nul. En revanche, si son heure de départ est antérieure à 7h45 ou postérieure à 8h45, il est pénalisé : ainsi, ΔT est de 20 min pour un départ à 7h25, 5 min pour un départ à 7h40, 10 min pour un départ à 8h55, 25 min pour un départ à 9h10, etc.

8.3.2. LA PROCÉDURE D'AFFECTATION TC DE MODUS v2.1

Comme dans le cas routier, la procédure d'affectation utilisée dans MODUS v2.1 est multi-chemin¹ : elle permet d'affecter la demande sur différents itinéraires alternatifs, en utilisant une loi de répartition dépendant des coûts généralisés. En revanche, elle n'intègre pas de contrainte de capacité, ce qui est une limite certaine².

L'algorithme est construit en trois temps :

Recherche des liaisons « physiquement » possibles

Cette étape est une simple recherche de chemin qui utilise la description du réseau TC. A noter que MODUS v2.1 :

- interdit que le déplacement s'effectue exclusivement à pied : T_{veh} doit être non nul ;
- interdit que le rabattement sur le réseau soit suivi d'un déplacement à pied : tout déplacement commence par un rabattement puis un voyage en TC.

Sélection des liaisons pertinentes

La sélection des liaisons pertinentes s'effectue sur la base de trois indicateurs évalués pour chaque itinéraire :

- le nombre de rupture N_r
- le « temps de déplacement » T_{depl} qui est la somme non pondérée de l'ensemble des composantes temporelles du déplacement :

$$T_{depl} = T_{rab} + T_{att} + T_{veh} + T_{mar} + T_{cor} + T_{acc}$$

- le « coût généralisé de recherche » C_{rch} calculé sur la base du temps de déplacement et du nombre de ruptures :

$$C_{rch} = T_{depl} + 5 \cdot N_r$$

¹ Il s'agit de la procédure « affectation selon les horaires 3 » du logiciel DAVISUM.

² La qualité de service d'une ligne de TC dépend en effet de sa charge, non seulement en termes de places disponibles et de confort, mais aussi en termes de temps de parcours (les arrêts pouvant être rallongés pour faire monter et descendre les passagers).

Pour une OD donnée, la recherche des itinéraires physiquement possibles permet de déterminer les valeurs minimales N_r^{\min} , T_{depl}^{\min} , C_{rch}^{\min} de ces 3 indicateurs. Sont alors considérés comme pertinents les itinéraires vérifiant¹ :

- $N_r \leq N_r^{\min} + 2$ et $N_r \leq 4$
- $T_{depl} \leq 1,20 \cdot T_{depl}^{\min} + 5$
- $C_{rch} \leq 1,20 \cdot C_{rch}^{\min} + 5$

Répartition des flux sur les liaisons pertinentes

La répartition des flux sur les liaisons pertinentes utilise le « véritable » coût généralisé de la liaison, différent du coût généralisé de recherche, et qui pondère les différentes composantes temporelles du déplacement :

$$C_g = T_{veh} + 1,5 \cdot (T_{rab} + T_{att} + T_{mar} + T_{cor} + T_{acc}) + \Delta T$$

Ainsi, MODUS v2.1 attribue un poids de 1,5 aux temps passés hors du véhicule : la pénibilité ressentie des temps de marche et d'attente est prise en compte.

Pour une OD donnée, les liaisons pertinentes ayant le coût généralisé le plus faible doivent naturellement supporter le trafic le plus élevé. MODUS v2.1 applique pour cela une loi de Kirchoff² de paramètre $\beta = 4$, dont la forme est la suivante : sur chaque segment correspondant à un ensemble I d'itinéraires possibles, la proportion p_i du flux de l'OD affecté à l'itinéraire i est :

$$p_i = \frac{C_g^{-\beta}(i)}{\sum_{j \in I} C_g^{-\beta}(j)}$$

¹ Pour être tout à fait exact, l'élimination des liaisons s'effectue en deux temps car les valeurs planchers servant de critères dépendent des liaisons que l'on considère : la comparaison se fait donc tout d'abord sur l'ensemble des liaisons possibles, puis sur le sous-groupe des liaisons qui ont passé ce premier filtre.

² On pourra faire le rapprochement entre cette forme et celle du modèle Logit : elles sont équivalentes dès lors que l'utilité de la liaison est identifiée à $-\beta \cdot \ln(C_g)$

UTILISATION DE MODUS V2.1

1. UTILISATION OPÉRATIONNELLE DE MODUS v2.1

1.1. UTILISATION EN SITUATION ACTUELLE : LA NÉCESSITÉ DU CALAGE

En injectant en entrée les variables décrivant l'état de la situation actuelle, les matrices obtenues en sortie de MODUS v2.1 simulent la demande de mobilité observée dans la réalité ; leur affectation permet de confronter les résultats de la modélisation à l'épreuve des faits.

Des écarts plus ou moins importants apparaissent alors inévitablement. Ils sont dus :

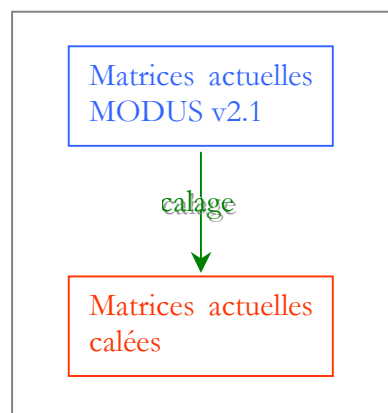
- à la non prise en compte de certains déplacements : flux touristiques, flux spécifiques liés à certaines pôles générateurs de trafics non considérés... ;
- aux défauts intrinsèques de modélisation.

Afin d'améliorer les résultats de l'affectation, une opération appelée « calage »¹ est alors réalisée en deux temps :

- ajustement préalable des paramètres du réseau - temps de parcours à vide, capacité pour les arcs routiers – là où cette intervention est justifiée² ;
- déformation ponctuelle et progressive des matrices : on obtient ainsi des matrices affectables dites « calées », dont l'utilisation est meilleure et dont les matrices en output de MODUS v2.1 constituent les « graines ».

Le calage est un exercice d'optimisation sous la contrainte de conserver autant que possible la structure matricielle issue du modèle : si les matrices calées et les matrices MODUS v2.1 sont très différentes, des problèmes se poseront dans le cadre du report de calage en fonctionnement scénario (cf ci-dessous).

A noter qu'actuellement, seule les matrices VP font l'objet d'un calage dans MODUS v2.1.



¹ Il ne faut pas confondre les opérations de « calibrage » et de « calage » : la première a lieu a priori pour déterminer la valeur des paramètres à partir de formulations mathématiques, la seconde a posteriori et de manière plus artisanale pour améliorer les résultats du modèle..

² Il est important d'insister sur le terme « justifiée » : il est en effet possible de modifier artificiellement les caractéristiques d'un arc routier pour que s'y écoule exactement le trafic observé. Mais dans ce cas, la valeur prédictive du modèle s'effondre.

1.2. UTILISATION EN MODE SCENARIO : LE REPORT DE CALAGE ET LE BOUCLAGE DU MODÈLE

1.2.1. ÉTAPE PRÉLIMINAIRE : LA CONSTRUCTION DE SCENARI

MODUS v2.1 est conçu pour être un outil d'aide à la décision dans le cadre de la définition et de la mise en œuvre de projets et de politiques publiques affectant le système transport francilien : sa finalité première est la simulation d'états fictifs de la mobilité, essentiellement dans des exercices de prospective.

Donnons quelques exemples : évaluation des impacts du SDRIF à l'horizon 2030 pour déterminer si les infrastructures prévues répondent bien à la demande de mobilité ; estimation de l'impact de la mise en place d'un péage urbain avec évaluation des recettes potentielles ; étude d'opportunité sur l'ouverture d'échangeurs sur A86 ; étude de dimensionnement du bouclage de la Francilienne à l'ouest pour déterminer le parti pris d'aménagement (2 ou 3 voies) etc.

Pour ce faire, les étapes préliminaires sont :

- déterminer complètement le scénario à évaluer par le biais des variables du modèle : description des occupations de sols et des offres de transports routier et collectifs ;
- décrire les éléments figés du modèle tels qu'envisagés dans le scénario : paramètres ayant évolué (taux d'occupation, taux horaires etc.), matrices cordons, vecteurs spécifiques...

L'injection de ces données dans le modèle permet d'obtenir les matrices de scénario.

1.2.2. LE REPORT DE CALAGE

Méthodologie utilisée dans MODUS v2.1

L'utilisation de MODUS v2.1 en situation actuelle met en évidence l'insuffisance des matrices obtenues directement en sortie et la nécessité du calage.

En mode scénario, il est impossible de procéder à une opération de calage car la situation simulée est fictive. On procède donc de manière indirecte en reportant sur les matrices du scénario les corrections effectuées sur les matrices au cours du calage de la situation actuelle : cette opération, appelée « report de calage », a pour but de corriger les erreurs de la modélisation en postulant leur régularité.

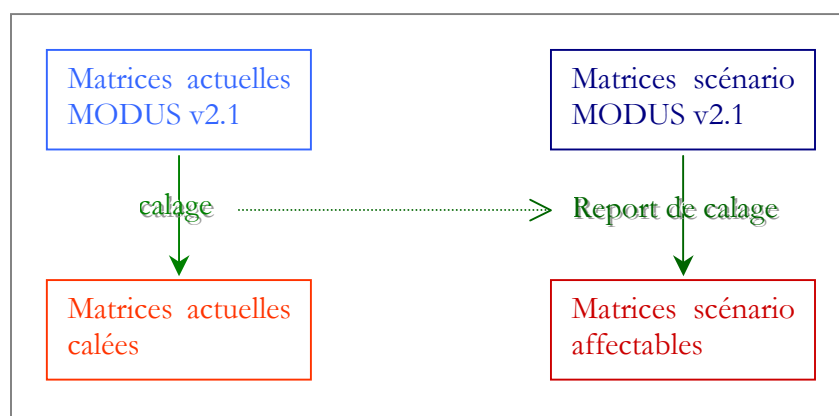


Figure 31 : Calage et report de calage

La formulation mathématique de l'opération de report de calage telle qu'effectuée dans MODUS v2.1 est la suivante. Désignons par M_c^{act} une des matrices calées actuelles, par M_m^{act} la matrice graine MODUS v2.1 associée, et par c_{seuil} une constante supérieure ou égale à 1. On décompose alors M_c^{act} sous la forme affine :

$$M_c^{act} = K \cdot M_m^{act} + D \quad \text{où } K = \min \left(c_{seuil}; \frac{M_c^{act}}{M_m^{act}} \right)$$

de telle sorte que toutes les cases de la matrice K sont inférieures à c_{seuil} et toutes les cases de la matrice D sont positives.

L'interprétation de cette formule est la suivante :

- la matrice K est conçue comme un facteur correctif des erreurs du modèle – supposées proportionnelles au volume des matrices ce qui explique la formule multiplicative ; en faisant l'hypothèse que les erreurs du modèle n'excède pas 25%, on utilise actuellement une valeur pour c_{seuil} de 1,25 pour borner K en conséquence ;
- la matrice D représente l'ajout des déplacements potentiellement oubliés dans la modélisation.

Cette décomposition est réutilisée en mode scénario. Si M_m^{scen} est la matrice MODUS v2.1 du scénario, la matrice M_c^{scen} intégrant le calage de la situation actuelle et utilisée pour l'affectation du scénario est construite par le biais de la formule suivante :

$$M_c^{scen} = K \cdot M_m^{scen} + D$$

Cette formule constitue la méthode de report de calage de MODUS v2.1.

Remarque sur les méthodes de report de calage utilisées à la DREIF

Le report de calage est une opération dont les conséquences sont importantes, mais pour laquelle il n'existe pas de méthodologie arrêtée. Celle proposée ci-dessus est l'aboutissement de différentes tentatives, caractérisées par deux typologies de forme :

- Forme additive : $M_c = M_m + D$
- Forme multiplicative : $M_c = K \cdot M_m$

La forme additive est intuitivement simple à comprendre et à contrôler. Cependant, elle présente l'inconvénient de reposer sur une unique matrice d'ajustement D , non seulement indépendante du volume des matrices modélisées en mode scénario, mais aussi dont les cases peuvent être négatives. Dans les faits, le report de calage conduit alors généralement à l'obtention de flux négatifs incohérents : des manipulations secondaires et problématiques doivent alors être effectuées (par exemple, répartition des flux négatifs sur des blocs de matrice capables de les absorber).

La forme multiplicative ne présente pas cet inconvénient et est donc facile à mettre en œuvre. En revanche, elle amplifie potentiellement les erreurs en se basant sur un ajustement directement proportionnel avec les volumes modélisés : si l'un des flux issus du modèle est très différent du flux calé, la valeur de la case associée dans la matrice K sera très élevée ; c'est notamment le cas si les données socio-démographiques sont mal localisées en raison des effets

de seuil du zonage. En mode scénario, il est alors possible que le flux de la matrice issu du modèle ait beaucoup évolué : les données socio-démographiques ont par exemple été ajustées par une description fine des projets ; cette modification sera alors amplifiée par la matrice K sans que rien ne le justifie. Pour limiter ces erreurs, la pratique amène à borner supérieurement la matrice K par un facteur dont la valeur reste à la discrétion du modélisateur.

Afin d'échapper à ces travers, la méthodologie adoptée ici essaie d'allier les avantages des deux grands types de report de calage : simplicité de mise en œuvre – aucun flux négatif – et contrôle de la déformation de la matrice – paramètre de seuil fixé par la valeur de c_{seuil} .

1.2.3. LE BOUCLAGE, SIMULATION D'UN ÉTAT D'ÉQUILIBRE ENTRE OFFRE ET DEMANDE

Principe de la démarche

L'utilisation de MODUS v2.1 en mode scénario diffère de celle en situation actuelle par la nature des données d'entrée utilisées. Celles-ci sont estimées grâce à un travail de prospective décrivant l'état futur des occupations des sols et des réseaux suite à la mise en œuvre des projets et politiques publiques.

Toutefois, cette description reste insuffisante pour décrire exhaustivement les inputs exacts du modèle : en effet, la donnée de temps de parcours, essentielle dans la description des déplacements – choix de mode et d'itinéraire, n'est pas connue a priori. Tout simplement, le travail d'observation du réseau réel, possible en situation actuelle et qui permet de disposer des temps effectifs, n'est pas possible en situation future.

Estimer les temps de parcours futurs est un exercice périlleux en raison de la difficile prise en compte des phénomènes de congestion. Ce constat conduit à introduire la notion de « bouclage », essentielle dans la modélisation mise en œuvre dans MODUS v2.1. Elle consiste à définir les temps de parcours de manière non pas exogène mais endogène en utilisant le modèle lui-même : l'introduction de temps fictifs dans la chaîne (par exemple issus de l'affectation de la matrices actuelles sur le réseau futur) permet d'exécuter les 4 étapes du modèle et de disposer des résultats de l'affectation, notamment les temps, réinjectables en input. Le processus repose donc sur la réutilisation en input d'output de la chaîne : le modèle est dit « bouclé ». On se référera à la Figure 7 pour visualiser plus précisément l'insertion du bouclage dans l'architecture de la chaîne.

L'intuition laisse espérer la convergence de ce processus itératif¹ :

- *itération 1* : les temps sont par exemple ceux issus des matrices actuelles sur le réseau futur. La qualité de service VP est donc bonne a priori : le réseau routier offrant une qualité de service accrue (mise en service de projets) pour une demande qui n'a pas évolué, la congestion routière a diminué. L'exécution du modèle sur la base de ces temps se traduit ainsi par une part modale VP accrue.
- *itération 2* : les temps sont ceux issus de l'affectation réalisée dans l'itération 1. La qualité de service VP en input s'est dégradée² : la forte part modale VP s'est traduite par une

¹ Une démonstration mathématique existe mais n'a pas sa place ici en raison de sa complexité.

² A noter que le bouclage n'impacte que les données de qualité de service VP : en effet, la demande n'agit pas sur la qualité de service TC puisque l'affectation TC n'intègre pas de contrainte de capacité.

augmentation de la congestion routière. L'exécution du modèle sur la base de ces temps conduit à présent à un basculement du choix de mode vers les TC.

- *Itération 3 et suivantes* : en prolongeant le mouvement observé dans les itérations 1 et 2, une oscillation entre modes a lieu. Dans un contexte favorable, il est loisible d'en espérer la convergence vers une situation d'équilibre.

En conclusion, le bouclage consiste en l'obtention d'un état d'équilibre naturel entre offre et la demande.

Mise en œuvre

Une mise en œuvre directe et naïve du bouclage n'est pas fonctionnelle dans la plupart des cas : en effet, le phénomène de basculement entre les parts modales s'amplifie au lieu de se stabiliser. Afin d'amortir les oscillations, les calculs utilisent un « principe de retard » à 2 niveaux qui intègre les données de l'itération $n-1$ dans l'itération n , selon une pondération défini par un paramètre λ compris entre 0 et 1 (actuellement, $\lambda = 0,5$) :

- *En amont* : en notant $T_{in}^{VP}(k)$ et $T_{out}^{VP}(k)$ les temps de parcours VP respectivement en input et output du modèle d'une itération k , on définit :

$$T_{in}^{VP}(n) = \lambda \cdot T_{out}^{VP}(n-1) + (1-\lambda) \cdot T_{in}^{VP}(n-1)$$

L'introduction d'une moyenne permet en fait de contrôler en amont de l'itération n l'impact de l'itération $n-1$ sur la qualité de service, traduit par la différence entre $T_{in}^{VP}(n-1)$ et $T_{out}^{VP}(n-1)$.

- *En aval* : l'exécution de la modélisation de la demande – y compris finalisation et report de calage – permet de déterminer les matrices OD, et notamment VP. Cependant, elles ne sont pas utilisées directement : pour déterminer $T_{out}^{VP}(n)$, une nouvelle moyenne est effectuée. En notant, pour une itération k , $F^{VP}(k)$ la matrice VP issues directement de la chaîne et $F^{affVP}(k)$ la matrice OD utilisée dans l'affectation pour déterminer $T_{out}^{VP}(k)$, on définit :

$$F^{affVP}(n) = \lambda \cdot F^{VP}(n) + (1-\lambda) \cdot F^{affVP}(n-1)$$

On dispose ainsi d'un second contrôle par moyenne en aval de l'itération n .

Résultats

Ce processus de bouclage de MODUS v2.1 conduit à une convergence rapide des matrices. Pour le vérifier, un test est effectué à chaque itération par le calcul de l'indicateur Δ suivant¹ :

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i,j} \left(F_{ij}^{VP}(n) \right)^2 - \left(F_{ij}^{VP}(n-1) \right)^2}$$

Δ mesure la différence entre les matrices VP de MODUS v2.1 de deux itérations successives. En faisant l'hypothèse que l'impact des itérations est quasi-nul sur la part de marché des MD – ce qui est légitime car les changements importants concernent principalement les distances pour lesquelles les MD ne sont pas compétitifs –, la convergence de Δ vers 0 équivaut à la convergence du processus de bouclage.

On remarquera que l'indicateur Δ :

¹ L'indicateur Δ est parfois appelé RMSE (Root Mean Square Error)

- est calculé case par case : il prend donc en compte la différence entre deux itérations de la part de marché (évolution du choix modal) et du choix d'itinéraire (évolution de la distribution) ;
- est homogène à un flux de déplacements : il correspond intuitivement à l'écart de déplacements entre les matrices $F^{VP}(n)$ et $F^{VP}(n-1)$.

Voici graphiquement les évolutions des volumes des matrices et de l'indicateur Δ au cours du bouclage lors de l'utilisation des hypothèses de référence à l'horizon 2020 dans MODUS v2.1:

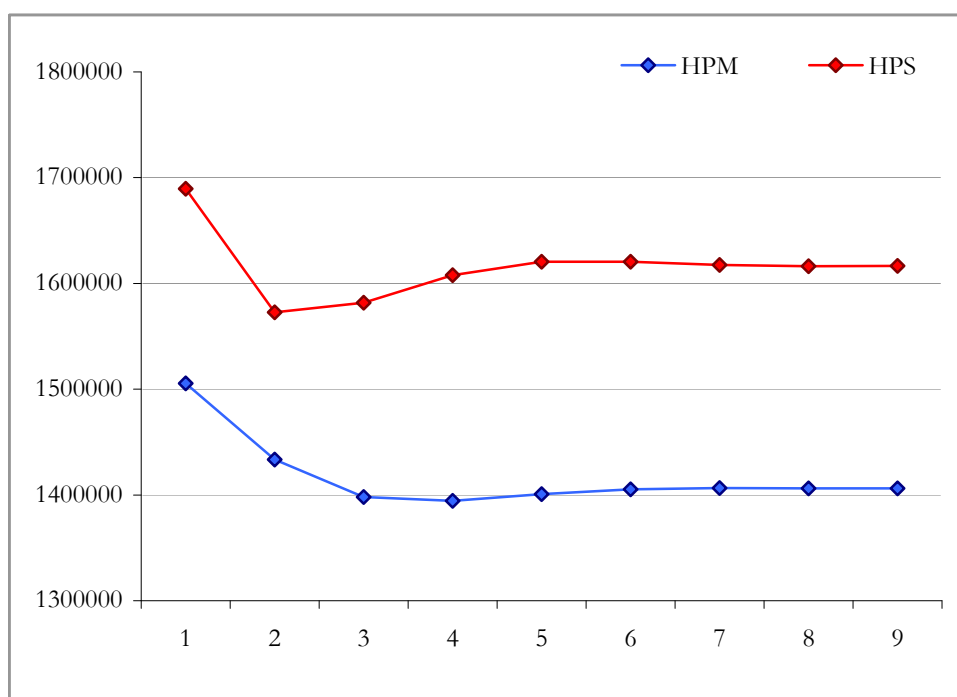


Figure 32 : Évolution des volumes des matrices VP au cours du bouclage de MODUS v2.1

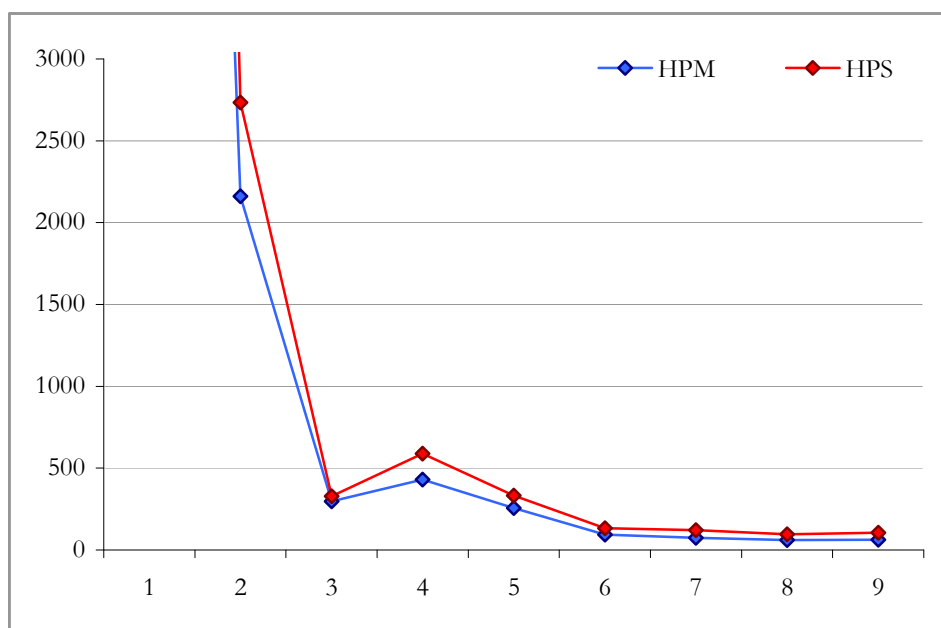


Figure 33 : Évolution de l'indicateur de convergence du bouclage de MODUS v2.1

On constate donc qu'il y a convergence rapide de l'indicateur Δ – en environ 7 itérations, autant en HPM qu'en HPS. Les matrices évoluent alors de moins de 100 déplacements par itération, ce qui est tout à fait négligeable par rapport aux volumes totaux concernés.

Par ailleurs, l'impact du bouclage est très fort sur les résultats obtenus puisqu'il induit un report vers les TC d'environ 100 000 déplacements à l'HPM et l'HPS, soit environ 7% de part de marché à l'échelle de la région.

Enfin, des tests montrent que le résultat de convergence ne dépend pas du point de départ des itérations. Dans ces conditions, le bouclage de MODUS v2.1 permet bien d'obtenir une situation d'équilibre.

2. RÉSULTATS DE MODUS v2.1

2.1. ANALYSE DU COMPORTEMENT DE MODUS v2.1

Les résultats présentés précédemment ont permis de comparer les résultats de MODUS v2.1 à la référence qu'est l'EGT 2001. Toutefois, la qualité du modèle repose essentiellement sur sa capacité prédictive, autrement dit la façon dont il réagit à la modification de ses inputs.

Deux analyses sont nécessaires : la première est de confronter le comportement du modèle à l'intuition, et de s'assurer qu'il ne procède pas par basculements brutaux ; la seconde est de vérifier que les outputs issus de scénarii prolongeant les tendances d'urbanisation et d'offre observées s'inscrivent dans une continuité logique.

2.1.1. RÉSULTATS ISSUS DE LA MODÉLISATION DE LA DEMANDE

Les résultats du tableau ci-dessous présentent l'évolution journalière des déplacements, de la mobilité et des parts modales dans le cadre d'un scénario à l'horizon 2020. Le scénario est construit :

- pour les OS : sur la base d'évolutions intégrant les dernières observations, les prévisions de l'INSEE et les documents de planification franciliens ; la population augmente notamment d'environ 11% ;
- pour l'offre : un scénario volontariste TC conforme aux choix des politiques actuelles.

	Déplacements journaliers	Mobilité depl/jour/pers	Part TC	Part VP	Part MS
Horizon actuel	35 605 172	3,54	18,6 %	45,5 %	35,9 %
Horizon 2020	39 945 914	3,58	19,8 %	44,8 %	35,4 %

Tableau 14 : Indicateurs journaliers actuels et 2020 dans MODUS v2.1

Les résultats confirment la robustesse de MODUS v2.1 :

- les déplacements augmentent à une vitesse comparable à la croissance démographique (12% environ) ;

- la mobilité prédite est relativement stable¹ et proche des 3,5 déplacements par jour et par personne ressortant de la série des EGT 2001 ;
- la part modale TC augmente significativement (+1,2%) – mais sans rupture non plus –, la majeure partie de cette augmentation provenant d'un report depuis la VP. C'est un résultat fort de MODUS v2.1 : le report modal espéré dans le cadre de la mise en œuvre d'une politique volontariste TC s'observe bien² et de manière réaliste.

2.1.2. RÉSULTATS SPÉCIFIQUES AU TRAFIC ROUTIER

Le tableau ci-dessous présente des indicateurs synthétiques du trafic routier en HPS issu de l'exécution de MODUS v2.1³ :

	Nombre de déplacements	Véhicules*km	Véhicules*km sur VRU	Véhicules*km hors VRU
Horizon actuel HPS – Modus v2.1	1 179 876	13 541 076	5 271 303	8 269 773
Horizon 2020 HPS – Modus v2.1	1 307 620	15 884 111	6 746 522	9 137 589
Évolution annuelle	+ 0,6 %	+ 1,0 %	+ 1,6 %	+ 0,6 %

Tableau 15 : Trafic routier HPS actuel et 2020 en sortie de MODUS v2.1

Les taux de croissance obtenus varient entre 0,6% et 1,6% suivant le type de réseau.

L'exécution de MODUS v2.0 conduisait quant à elle à des taux de croissance plus élevés, entre 1,3% et 1,9% : la conséquence en termes de volume sur une période d'une quinzaine d'année est considérable, comme le montre le tableau ci-dessous :

	Nombre de déplacements	Véhicules*km	Véh*km sur VRU	Véh*km hors VRU
Horizon actuel HPS – Modus v2.0	1 179 876	13 541 076	5 271 303	8 269 773
Horizon 2020 HPS – Modus v2.0	1 386 003	17 174 050	7 136 334	10 037 716
Évolution annuelle	+ 1,0%	+ 1,5%	+ 1,9%	+ 1,3%

Tableau 16 : Trafic routier HPS actuel et 2020 en sortie de MODUS v2.0

Or, l'évolution annuelle du trafic ces dix dernières années (cf Figure 34 ci-dessous) avoisine +1,2% sur les autoroutes et +1% sur l'ensemble du réseau routier national (tel qu'il était défini avant la décentralisation de 2007). Les résultats de MODUS v2.1 apportent donc une cohérence accrue avec les tendances observées récemment.

¹ La légère augmentation observée devra être analysée plus finement dans une future amélioration de MODUS

² On fera le lien avec l'impact du bouclage (cf ci-dessus, partie 1.2.3 de ce chapitre).

³ Les hypothèses d'offre et de demande retenues pour définir le scénario 2020 sont décrites dans le document de présentation des scénarios de référence (DREIF, 2008).

Les versions exploitées dans cette analyse sont les suivantes :

- V203 minimaliste (réseau horizon 2007) + matrice de la version 2003HPS_v9 pour l'horizon actuel
- 2020_HPS_20071102 et 2020_HPM_20071102 pour l'horizon 2020

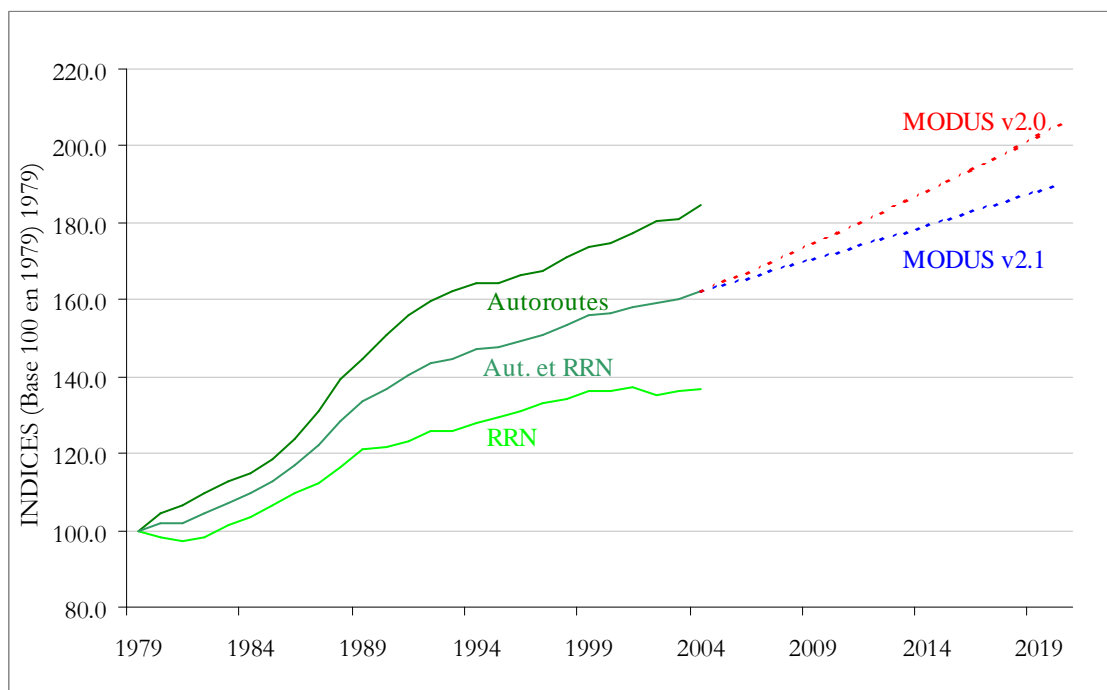


Figure 34 : Évolution du trafic routier en Île de France depuis 25 ans

La Figure 35 ci-dessous illustre géographiquement l'évolution du trafic au travers des différences de charges aux horizons futurs et actuels à l'HPS : en rouge figurent les augmentations et en vert les diminutions, l'épaisseur des arcs étant proportionnelle aux volumes des évolutions.

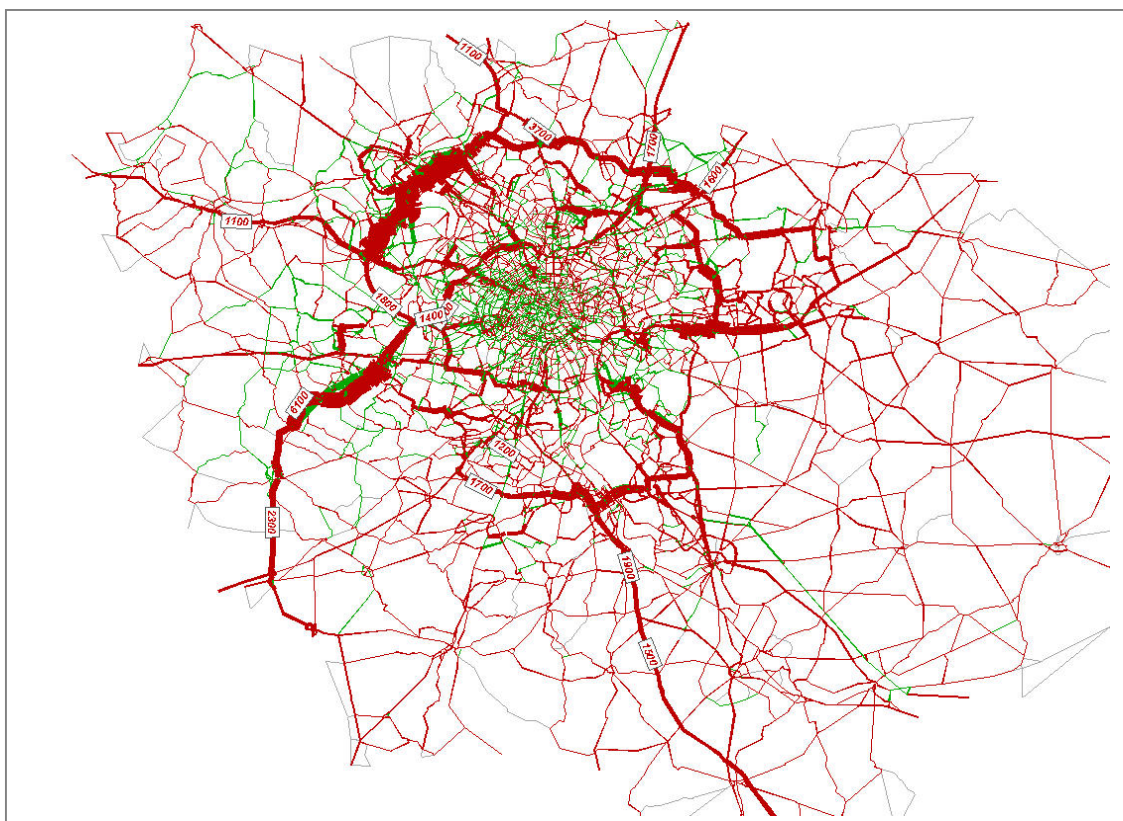


Figure 35 : Différence de charges HPS entre les horizons actuels et 2020 dans MODUS v2.1

Conformément aux principales tendances issues des observations les plus récentes, EGT et comptages routiers, MODUS v2.1 met en évidence une évolution des trafics forte en périphérie, notamment pour les déplacements de rocade, alors que la tendance est à la baisse sur Paris et en proche banlieue.

S'il faut relativiser ces résultats au regard des hypothèses d'offre routière retenues pour cette analyse (prolongement de la Francilienne à l'Ouest et contournement de Roissy notamment), MODUS v2.1 traduit cependant de manière cohérente les dynamiques de la mobilité francilienne envisagées actuellement.

2.2. ATOUTS DE MODUS v2.1

2.2.1. QUALITÉ DES RÉSULTATS

Robustesse des versions 2.x de MODUS

Les versions 2.x de MODUS sont construites autour de principes simples de modélisation, dont la précision ne prétend pas être optimale, mais dont la robustesse est avérée : le modèle est stable, une modification des données d'entrée n'induisant pas de basculement brutal.

Par ailleurs, aucune donnée parasite n'est utilisée¹ : MODUS v2.1 fonctionne exclusivement sur la base d'un paramétrage calibré à partir de l'EGT 2001.

Avancées de la version 2.1

Les avancées propres à MODUS v2.1 sont essentiellement de deux ordres :

- *Qualité du calibrage* : la version v2.1 de MODUS repose sur un recalibrage global qui améliore nettement les sorties du modèle. Les paramètres utilisés sont régionaux quand rien ne justifie une segmentation géographique, ce qui augmente la robustesse de la modélisation ;
- *Bouclage* : c'est un apport essentiel de la version v2.1 de MODUS. On en constate l'importance sur les matrices obtenues en projection (cf partie 1.2.3).

2.2.2. UTILISATION OPÉRATIONNELLE

Le caractère opérationnel de MODUS v2.1 est une avancée d'une importance comparable à celle de l'amélioration des résultats. Il repose sur l'utilisation d'un outil de calcul efficace et intégré² qui a permis une rupture technique par rapport aux versions précédentes (pour plus de détails : cf Annexe 1 : « Spécifications techniques »)

- *Gestion et exécution de la chaîne* : diminution d'un facteur 10 des temps de calcul et de stockage³ ;
- *Adaptabilité de la chaîne du modèle* : la structure de MODUS v2.1 est conçue sur la base de paramètres pouvant être directement modifiés (nombre de zones, de modes, de motifs, de catégories, choix des variables des OS etc.) ;

¹ Telles que des « dentelles » de redressement appliquées en fin de chaîne, ce qui était le cas de précédentes versions de MODUS.

² SAS v8.02

³ Initialement 7h et 7Go pour MODUS v2

- *Automatisation des calculs :*
 - *processus de calibrage :* MODUS v2.1 dispose d'un module de calibrage automatique. Il offre la possibilité de changer sans difficulté la définition des variables d'entrée et de recalibrer immédiatement les paramètres ;
 - *report de calage :* cette étape fait désormais partie intégrante de la chaîne de modélisation ;
 - *interface avec l'étape d'affectation* réalisée sur un autre logiciel (DAVISUM) : la chaîne de MODUS v2.1 est totalement intégrée, ce qui autorise notamment le bouclage de la chaîne sans aucune intervention de l'utilisateur¹ ;
- *Automatisation du processus qualité :*
 - *contrôle des résultats* par calcul automatique d'indicateurs : comparaison des sorties avec l'EGT 2001 pour le calibrage, résultats agrégés et mis en forme pour les simulations, calcul de la convergence pour le bouclage.
 - *sauvegarde des données :* toute opération effectuée dans MODUS v2.1, calibrage ou simulation, est archivée de manière automatique ; la chaîne de modélisation, les paramètres, les variables d'entrée, les indicateurs sont ainsi conservés et l'opération peut être reproduite si besoin est.

2.3. LIMITES DE MODUS v2.1

Malgré tout, comme tout modèle de transport, MODUS v2.1 affiche des limites certaines :

- *Limites de l'exercice de modélisation :* MODUS v2.1 n'est qu'une schématisation simple de certains phénomènes régissant la mobilité quotidienne des franciliens. En découlent de nombreuses limites concernant l'ensemble des étapes de calcul, depuis la génération jusqu'à l'affectation². Un exemple important est celui d'absence de contrainte de capacité des TC.
- *Limites des données utilisées :* le périmètre géographique de MODUS v2.1 étant la région Île-de-France dans son intégralité, on comprend aisément la difficulté de d'assurer la qualité des inputs du modèle, et celle-ci détermine directement celle des outputs.
- *Limites liées à l'utilisation de EGT :* MODUS v2.1 est fondamentalement une exploitation de l'EGT 2001 qui est désormais datée. Par ailleurs, son échantillonnage ne permet pas la désagrégation souhaitable pour certaines analyses, d'où l'application de taux géographiques (occupation VP, horaires HPM et HPS etc.). Enfin, il serait possible d'exploiter non la seule enquête de 2001, mais la série des enquêtes depuis 1976.

Face à ces limitations, on se référera à l'Annexe 2 : « Quel futur pour MODUS ? » qui présente les pistes d'améliorations aujourd'hui envisagées.

¹ Des tentatives manuelles avec les précédentes versions de MODUS avaient pris plusieurs semaines, sans converger complètement ; MODUS v2.1 réalise l'opération automatiquement en moins de 2 jours sans intervention extérieure autre que l'exécution d'un programme de lancement.

² Notons que le dire d'expert permet de contrôler certains biais : une connaissance complète du fonctionnement des algorithmes permet une analyse et une interprétation critique des outputs.

ANNEXE 1 : SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

1. Configuration matérielle : Pentium D 2 x 2,8 GHz – 1 Go de RAM
2. Logiciels utilisés
 - Module de calibrage automatique : SAS v8.02 ;
 - Modélisation de la demande : SAS v8.02 ;
 - Affectation : DAVISUM v8.1
3. Temps de calcul :
 - Calibrage de la génération, de la distribution et du choix modal : 3h ;
 - Modélisation de la demande - avec calcul des indicateurs : 20 min
 - Affectation VP (HPM ou HPS) : 2h30
 - Affectation TC (HPM ou HPS) : 30 min
 - Bouclage : 48 h pour la réalisation de 15 itérations
4. Stockage :
 - Données d'entrée : 100 Mo par scénario ; 50 Mo pour l'EGT 2001 ; 75 Mo pour le zonage
 - Outil de calibrage et chaîne de MODUS v2.1 : < 1 Mo
 - Stockage de l'ensemble des sorties d'une exécution du bouclage (avec sauvegarde des données utilisées, de la chaîne et des affectations de l'ensemble des itérations) : 5 Go

ANNEXE 2 : QUEL FUTUR POUR MODUS ?

Les pistes d'amélioration de MODUS sont nombreuses ; elles sont liées aux imperfections de MODUS v2.1, aux perspectives ouvertes par les travaux de recherche et aux nouvelles possibilités permises par l'accroissement de la vitesse de calcul.

Amélioration des données utilisées

L'amélioration des données utilisées par MODUS a pour but de renforcer la robustesse du modèle, notamment grâce au calibrage automatique : meilleurs sont les inputs, meilleurs sont les outputs à condition de disposer du paramétrage adéquat. Pour cela, il est possible de :

- moderniser le zonage qui n'est plus adapté à l'organisation urbaine régionale ;
- affiner la description de l'offre TC ;
- retravailler les descriptions figées de MODUS : définition de la captivité, passage horaire, taux de PL, vecteurs spécifiques, cordon...

Amélioration des processus utilisés

Le travail réalisé au cours du développement de MODUS v2.1 a limité les actions de ce type. Demeure cependant le besoin d'améliorer la phase de calage, afin d'en faire un processus mieux maîtrisé et reproductible aisément.

Développement de nouveaux partis de modélisation

La modélisation utilisée dans MODUS v2.1 n'a pas vocation à demeurer inchangée. Au contraire, un certain nombre de pistes méritent d'être explorées :

- segmentation de la demande : âge, revenu etc.
- report de calage appliqué aux marges de la matrice et non par OD ;
- boucles de déplacements au lieu de motifs indépendants en HPM et HPS ;
- affectation des MD ;
- paramétrage en général : évolution temporelle des paramètres sur la base de la comparaison des différentes EGT, non linéarité des utilités, Logit hiérarchique pour le choix modal...

Articulation avec d'autres outils de modélisation

L'avenir de MODUS passe très certainement par son interfaçage avec d'autres outils de modélisation. Les trois grandes idées actuelles sont les suivantes :

- articulation avec le modèle PL de la DREIF ;
- Articulation avec un modèle de choix horaire ;
- Articulation avec un outil de microsimulation dynamique, afin de compléter les analyses macroscopiques statiques lors d'études précises ;

- Articulation avec un modèle d'urbanisme : la projection de la localisation de la population et des activités ne serait plus une donnée d'entrée figée de MODUS v2.1 en mode scénario, mais le produit d'une modélisation à part entière.

Ce dernier point est le plus prometteur, mais le plus complexe. Il ouvre en fait la perspective d'ajout de nouvelles étapes en amont de MODUS, voire celle d'un bouclage entre modèle d'urbanisation et modèle de déplacements.

ANNEXE 3 : UTILITÉS ET CHOIX DISCRETS

1. LA NOTION D'UTILITÉ

1.1. DANS LA THÉORIE ÉCONOMIQUE CLASSIQUE

Dans la théorie économique classique, l'utilité est définie comme une grandeur mesurable, et additive, qui traduit la satisfaction des agents économiques par l'obtention sous contrainte budgétaire (par exemple de revenu) d'un bien ou d'un service. L'utilité totale d'une collectivité peut être obtenue par sommation des utilités individuelles ; la maximisation de l'utilité est considérée comme un critère moral de l'organisation de la société (John Stuart Mill, 1781). Cette définition de l'utilité est apparue normative (comment pondérer l'utilité de chaque groupe social ?) et restrictive.

1.2. DANS LA THÉORIE ÉCONOMIQUE NÉO-CLASSIQUE

Dans la théorie économique néo-classique, l'utilité économique traduit une relation de pré-ordre de préférence dans les choix qui sont effectués par les agents économiques. Elle n'est connue qu'à une fonction croissante près. On a ainsi :

- si le bien x est préféré au bien y alors $U(x) > U(y)$;
- si le consommateur est indifférent entre les biens x et y alors $U(x) = U(y)$.

En théorie donc, ces propriétés ont deux conséquences majeures :

- l'utilité est une grandeur relative, sa valeur numérique ne peut pas s'interpréter seule ;
- la différence d'utilité entre deux biens ne permet de donner que l'ordre de préférence entre ces deux biens, mais pas de savoir dans quelle mesure l'un est préférable à l'autre.

En pratique, on spécifie une forme analytique de la fonction d'utilité qui permet de la calculer et donc d'évaluer précisément dans quelle mesure un bien est préférable à l'autre.

1.3. L'UTILITÉ ALÉATOIRE

Enfin, en matière d'économie appliquée aux transports, on fait l'hypothèse que l'utilité se décompose en deux termes (Marschak 1960) :

- une partie connue (déterministe) dépendant des caractéristiques observées des individus ;
- une partie inconnue (stochastique) représentant la variabilité des choix des individus face à un ensemble de choix identiques pour l'observateur.

Ainsi, face à des occurrences identiques pour l'observateur, des agents distincts effectueront des choix distincts (se déplacer à pied ou prendre les transports collectifs) alors que la partie connue de l'utilité est la même.

La spécification de la loi suivie par la partie aléatoire a donné naissance aux modèles de choix discrets (McFadden, 1968, 1973). Ces modèles font le lien entre l'utilité considérée désormais

comme inobservable du fait de sa partie aléatoire et une grandeur observable, à savoir une probabilité de choix. MODUS v2.1 se fonde sur ce modèle théorique.

2. LES MODÈLES DE CHOIX DISCRETS : EXEMPLE DU MODÈLE LOGIT

2.1. DÉFINITION DU MODÈLE LOGIT

On considère un individu, décrit par un ensemble de caractéristiques, faisant face à un ou plusieurs choix possibles, décrits eux aussi par des caractéristiques qui leur sont spécifiques.

Dans le cas des transports, les individus arbitrent entre plusieurs destinations et modes de transport possibles selon leurs caractéristiques propres et celles des possibilités envisagées (coût, temps de trajet etc). Dans ce cadre, il s'agit d'un arbitrage non entre des quantités de biens mais entre des options possibles : les choix sont dits « discrets ».

Appliquons la théorie des modèles de maximisation de l'utilité aléatoire à cette situation. D'après la partie précédente, l'utilité aléatoire U se décompose en deux termes¹ :

$$U = \bar{U}(x) + \varepsilon$$

où

- $\bar{U}(x)$ est la partie déterministe, donc connue, de l'utilité, dépendant des caractéristiques observées x des choix ou des individus ;
- ε est la partie inconnue de l'utilité – le résidu, considérée comme aléatoire et représentant la variabilité des choix des individus face à un ensemble de choix identiques.

Dans le contexte des choix discrets, supposons alors qu'un individu fasse le choix j parmi un ensemble de n choix possibles. Pour cela, l'individu a maximisé son utilité $U_h, h \in \{1, \dots, n\}$; on a donc :

$$\forall h \neq j, U_j > U_h$$

ce qui équivaut à :

$$\forall h \neq j, \varepsilon_h < \varepsilon_j + \bar{U}_j(x) - \bar{U}_h(x)$$

Pour rendre le modèle opératoire, il faut spécifier une distribution des termes aléatoires ainsi qu'une forme fonctionnelle de la partie déterministe de l'utilité. Le modèle « Logit » (McFadden, 1968, 1973) suppose ainsi que les ε_j sont :

- indépendants entre eux ;
- indépendants des caractéristiques x ;
- identiquement distribués ;
- suivent la loi de distribution de Gumbel¹ dont la fonction de répartition est $F(a) = \exp(-e^{-a})$.

¹ Afssa Essafi C. (2003), Les modèles Logit polytomiques non ordonnés : théorie et applications, INSEE, série des documents de travail Méthodologie Statistique, N°0301

Il est alors possible de déterminer la probabilité $P(j|x)$ qu'un individu fasse le choix j pour des caractéristiques observées x ; on démontre que les hypothèses du modèle Logit conduisent à la formule suivante :

$$P(j|x) = \frac{e^{\bar{U}_j(x)}}{\sum_{h=1}^J e^{\bar{U}_h(x)}}$$

Tout l'intérêt du modèle Logit réside dans la forme analytique de l'expression précédente, forme qui permet d'effectuer des calculs opérationnels ; c'est pour cette raison qu'il est utilisé de manière privilégiée dans les modèles de transport, et en particulier dans MODUS v2.1.

Remarque : on rencontre fréquemment les expressions de « Logit multinomial » et de « Logit conditionnel ». Originellement, la distinction repose sur la nature des caractéristiques x : quand il s'agit des caractéristiques de l'individu, le Logit est dit « multinomial » ; quand il s'agit des caractéristiques des choix, il est dit « conditionnel ». A noter que le Logit peut-être tout à la fois conditionnel et multinomial : dans ce cas, on conserve l'appellation « multinomial ».

2.2. SÉQUENCE DE CHOIX ET COMBINAISON D'UTILITÉS

La question se pose de la combinaison des utilités dans le cadre d'une séquence successive de choix. L'exemple canonique issu du monde des transports est le suivant : quelle utilité un individu retire-t-il d'un déplacement tous modes confondus sachant l'utilité qu'il retire de chaque mode séparément ? Autrement dit, comment « sommer » les utilités ?

Une schématisation possible repose sur une structure d'arbre de choix : l'individu choisit une option à partir du niveau de choix le plus élevé et progresse de façon séquentielle jusqu'au niveau de choix le plus bas. La réalisation de l'objet des choix n'arrive qu'à la fin du parcours de l'arbre. L'exemple des transports est à nouveau illustratif : l'individu doit choisir sa destination et son mode pour pouvoir effectuer son déplacement.

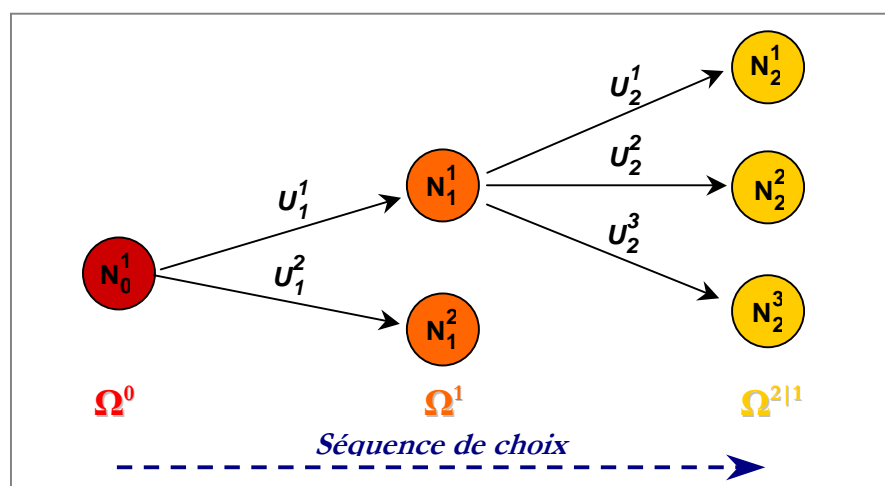


Figure 36 : Arbre figurant une séquence de choix

¹ La spécification d'autres lois de distribution donne lieu à d'autres modèles : ainsi, une distribution suivant une loi normale conduit au modèle dit « probit ».

L'analyse de ce schéma en terme d'utilité est la suivante. Au cours de la séquence de décisions, l'étape k définit un ensemble de choix noté Ω^k , représentés par un groupe de nœud de l'arbre. Chaque nœud N_i^k de Ω^k définit par ailleurs un sous-ensemble $\Omega^{k+1|i}$ de Ω^{k+1} et correspondant aux choix possibles pour l'étape $k+1$ sachant que le choix i a été effectué à l'étape k .

À tout choix matérialisé par un nœud N_i^k de Ω^k est associée une utilité aléatoire U_i^k :

$$U_i^k = \bar{U}_i^k + \varepsilon_i^k$$

où :

- \bar{U}_i^k est la partie déterministe de l'utilité U_i^k , correspondant à sa moyenne ; par construction de l'arbre de choix, c'est une fonction des utilités $U_j^{k+1|i}$ des choix $\Omega^{k+1|i}$ de l'étape suivante ;
- ε_i^k est une variable aléatoire qui suit une loi de Gumbel (pour se placer dans le cadre d'un modèle Logit), de moyenne nulle et d'écart-type σ_i^k ; on fait en outre l'hypothèse que les termes σ_i^k sont égaux pour tous i de Ω^k : leur valeur est donc notée σ^k .

Dans le cadre du modèle Logit, on peut alors démontrer¹ que :

- σ^k est égal à l'écart-type commun des utilités de l'étapes suivantes $\sigma^{k+1|i}$;
- $\bar{U}_i^k = \frac{1}{\theta} \cdot \ln \left(\sum_{j \in \Omega^{k+1|i}} e^{-\theta \cdot \bar{U}_j^{k+1|i}} \right)$ avec $\theta = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \sigma^{k+1|i}}$;

Cette formulation est appelée « logsum ». En lui appliquant la fonction exponentielle, elle s'interprète de la manière suivante en faisant abstraction du terme θ : l'exponentielle de l'utilité d'un choix conçu comme la combinaison de choix élémentaires est égale à la somme des exponentielles des utilités élémentaires.

L'intérêt de ce résultat s'illustre parfaitement dans le domaine des transports. Il permet en effet de déterminer l'utilité « multimodale » qui décrit l'arbitrage du choix de destination tous modes confondus : celle-ci s'interprète comme la combinaison des options de déplacements offerts par les différents modes. Par « logsum », l'utilité multimodale est donc connue dès que les utilités par mode le sont.

¹ Bonnel P. (2004). *Prévoir la demande de transports*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées
 Laurent F. (1997), *Intégrer les choix de destination et d'itinéraire*, INRETS.