



**Modélisation des
déplacements en IDF avec
MODUS 3.1**



**Scénario prospectif et résultats
à l'horizon 2030**

Rédaction

Guillaume TREMBLIN - SCEP/DPAT/CMT
Alexis JAILLET - SCEP/DPAT/CEAT
Thomas FORTIN - SCEP/DPAT/CEAT
Nicolas MICHELOT- SCEP/DPAT
Jean-Pascal LAVIELLE - SCEP/DPAT/CMT
Grégory OOGHE - SCEP/DPAT/CEAT
Gilles VIGNEAU - SCEP/DPAT/CMT

Rellecteurs

Mathieu ECOIFFIER- SCEP/DIR
Linda LEFORESTIER- SCEP/DPAT/COM
Sylvain LOZE- SCEP/DPAT/COM
Lancelot VALVERDE- SCEP/DPAT/COM
Cindie ANDRIEU-DUPIN - SCEP/DE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
1- LE MODELE MODUS	8
1.1 - La modélisation des déplacements	8
1.1.1 - Les principes des modèles à 4 étapes	8
1.1.2 - Les limites des modèles macroscopiques statiques agrégés	9
1.1.3 - Les données et logiciels nécessaires à son exploitation	9
1.2 - Caractéristiques de la nouvelle version du modèle	10
1.2.1 - Architecture globale de MODUS v3.1	10
1.2.2 - Segmentation	11
1.2.3 - Génération linéaire	12
1.2.4 - Distribution gravitaire	12
1.2.5 - Choix modal discret non linéaire	13
1.2.5.1 - Transport collectif	14
1.2.5.2 - Véhicule particulier	14
1.2.5.3 - Modes doux	14
1.2.5.4 - Cycles	14
1.2.5.5 - Non linéarité du modèle	15
1.2.6 - Affectation en période de pointe de 4 heures	16
1.2.6.1 - Modèle d'affectation TC	16
1.2.6.2 - Modèle d'affectation TI	17
2 - DONNEES EN ENTREE DU MODELE MODUS 3.1	18
2.1 - Les données du modèle de demande	18
2.1.1 - Le zonage MODUS, 1339 zones pour 1,8 millions liaisons origines destinations	18
2.1.2 - Données socio-démographiques	19
2.1.3 - Offre de transport	19
2.1.3.1 - Les temps de transports	19
2.1.3.2 - Les coûts des déplacements	19
2.1.3.3 - La contrainte de stationnement	20
2.1.3.4 - L'offre Vélib	20
2.1.3.5 - Le zonage tarifaire des TC	21
2.2 - Le réseau de transports individuels	21
2.2.1 - Composition du réseau TI	21
2.2.2 - La typologie des tronçons	22
2.2.3 - La typologie des nœuds	24
2.2.4 - Les connecteurs de centroïde	24
2.2.5 - Le codage et l'activation des projets	25

2.3 - Le réseau de transports collectifs	25
2.3.1 - Offre basée sur le GTFS	25
2.3.2 - Connecteurs modélisés au bâti	27
2.4 - Les demandes exogènes	30
2.4.1 - Transport routier de marchandises.....	30
2.4.2 - Cordons routiers	30
2.4.3 - Vecteurs gares	31
2.4.4 - Vecteurs aéroports	31
3 - CONSTRUCTION DU SCENARIO PROSPECTIF 2030	32
3.1 - Les scénarios socio-démographiques	32
3.1.1 - Modèle P+E 2025-2035	32
3.1.2 - Scénario 2030 pour MODUS.....	33
3.2 - Les scénarios d'offre de transport	35
3.2.1 - Projets routiers en service à l'horizon 2030.....	35
3.2.2 - Projets TC en service à l'horizon 2030	38
3.3 - Les scénarios de politique transport	40
3.3.1 - Abaissement des vitesses (BP et 80 km/h)	40
3.3.2 - Tarification des TC (GPE, zonage RATP)	40
3.3.3 - Stationnement et offre Vélib	41
3.4 - Les scénarios de demande exogène.....	41
3.4.1 - Transport de marchandises	41
3.4.2 - Cordons routiers	41
3.4.3 - Vecteurs gares.....	42
3.4.4 - Vecteurs aéroports	42
4 - LES RESULTATS DU SCENARIO 2030 AVEC GPE	43
4.1 - Indicateurs régionaux agrégés	43
4.1.1 - Nombre de déplacements totaux et par mode et leur évolution	43
4.1.2 - Parts modales et leur évolution	43
4.2 - Les Matrices	46
4.2.1 - Demande zonale par mode.....	46
4.2.2 - Temps et leurs composantes.....	46
4.3 - Cartes de charges VP	47
4.3.1 - Charge du réseau routier.....	47
4.3.2 - Trafic et saturation	47
4.3.3 - Différences de charge.....	49
4.4 - Cartes de charges TC	50
4.4.1 - Charges TC par mode et par ligne.....	50

4.4.2 - Charges par tronçon	53
4.4.2.1 - Charges sur le Grand Paris Express en 2030	53
4.4.2.2 - Différences de charges sur le réseau historique entre le scénario 2030 avec GPE et le scénario 2030 sans GPE	55
4.5 - Indicateurs d'accessibilité	59
4.5.1 - Isochrones	59
4.5.2 - Accessibilité aux emplois et à la population à la zone MODUS	60
CONCLUSION	61
GLOSSAIRE	63

Introduction

Dans l'optique de modéliser et d'analyser la mobilité des franciliens, la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement d'Île-de-France (DRIEA-IF)¹ développe et utilise depuis les années 1990 un modèle de déplacement macroscopique statique multimodal à 4 étapes, dénommé MODUS (acronyme de MODèle de Déplacements Urbains et Suburbains).

La DRIEA-IF, en tant que service déconcentré ministériel, utilise MODUS pour éclairer les décisions de l'État concernant : les investissements dans les infrastructures de transports en commun franciliens, la gestion et la modernisation du réseau routier national et de manière plus large dans le portage régional des politiques de mobilités durables. Concrètement, les simulations issues de MODUS servent à modéliser des projections en matière de déplacements mais aussi à évaluer des projets à la manière « avant/après ». Enfin, les sorties de MODUS alimentent des modèles plus locaux, par exemple ceux des départements, comme entrées de cadrage général, que les modélisations locales viennent raffiner.

L'État possède ainsi un outil propre, adaptable et utilisable en continu, permettant d'expertiser les projets ou politiques de transports terrestres en Île-de-France. Ce modèle opérationnel de déplacements indépendant et développé en régie, à la DRIEA-IF, permet à l'État d'avoir un positionnement objectif, et d'alimenter ainsi la réflexion et la discussion avec les autres acteurs publics ou privés en mettant à disposition les résultats obtenus.

Les résultats de ces modélisations et analyses sont le fruit de méthodes et d'outils développés en regard de l'état de l'art scientifique en la matière et des hypothèses jugées les plus tangibles et pertinentes à l'heure actuelle. Aussi ce rapport n'a pas vocation à prévoir ce que pourraient être les futurs comportements de la mobilité mais explique, projette et illustre à un horizon futur les demandes de déplacements définies à partir de comportements constants dans le temps, eux-mêmes établis sur des enquêtes réalisées dans un passé plus ou moins proche.

Faisant suite au rapport du Commissariat général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) de mars 2015 relatif à la « modélisation des déplacements de voyageurs en Île-de-France », à l'avis de la Société du Grand Paris (SGP) de décembre 2014 au travers de son conseil scientifique, ainsi qu'aux conseils du CEREMA (Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité, et l'Aménagement), la DRIEA-IF a impulsé et réalisé une refonte de son modèle MODUS et de sa dernière version dite 2.2.

MODUS 3.1 est donc issu des améliorations et de l'actualisation de MODUS 2.2. Les préconisations formulées par les organismes cités précédemment se sont traduites par des travaux entrepris en régie qui ont abouti à une nouvelle chaîne de modélisation complète et fonctionnelle. Ces travaux se sont déroulés sur une période étendue de début 2016 à fin 2019. Outre ce chantier d'envergure, les réflexions pour définir des pistes d'amélioration ainsi que leur réalisation sont continues. Le modèle a donc connu des évolutions substantielles tant sur la modélisation de la demande que de son affectation sur les réseaux, à savoir sans être exhaustif :

- **Refonte du modèle de demande au travers :** d'une définition d'une nouvelle segmentation ; de l'étendue des périodes (à 4 heures) de pointe du matin (6-10h) et du soir (16-20h) et de la création d'une plage creuse (10-16h) de jour (dites désormais respectivement PPM, PPS et PCJ) ; de travaux sur le calibrage du choix modal (fonction d'utilité non linéaire avec la prise en compte de la contrainte de stationnement) ; d'une segmentation des motifs de déplacements affinée ; de l'intégration des matrices relatives aux nouveaux cordons routiers franciliens ; de l'amélioration de la projection de la demande des poids lourds (PL).
- **Projection des demandes exogènes** (c'est-à-dire les cordons pour les véhicules légers (VL) et les PL, la demande interne de PL, les gares et aéroports), qui sont traduites sous la forme de matrices origines-destinations (OD) en entrée de MODUS.

¹ Au travers de son Département Prospective Aménagement Transport (DPAT), au sein du Service de la Connaissance, des Études et de la Prospective (SCEP).

- **Amélioration des modèles d'affectation routière et transports en commun (TC).** Par exemple les véhicules légers (VL) et PL sont désormais distingués dans le choix d'itinéraires, il est introduit des courbes débits-vitesses plus contraignantes afin de mieux représenter les débits des routes prises dans la congestion, ou encore l'affectation TC est calibrée sur les enquêtes OD des opérateurs franciliens et s'appuie sur une description plus exhaustive de l'offre (cf. ci-dessous).
- **Création d'un réseau TC modélisé à partir des données au format GTFS² d'Île-de-France Mobilités (IDFM).**
- **Développement d'une nouvelle méthodologie de génération et d'intégration des connecteurs TC.**
- **Génération d'une nouvelle chaîne globale de codage de MODUS à l'aide du logiciel de programmation SAS®.**

Tout au long de ce rapport, le lecteur retiendra que la modélisation des déplacements, comme toute modélisation d'un phénomène physique, n'est qu'une description schématique et reproductible de certaines composantes limitées des déplacements. Le modèle MODUS en est la mise en œuvre opérationnelle et se base sur la combinaison de paramètres et de lois mathématiques. Les variables d'entrée décrivent un état de la réalité, appelé scénario, que la modélisation permet de caractériser. Ces variables se composent principalement :

- **du volume et de la répartition géographique de la population et des emplois en IDF à horizon futur,** données dites P+E qui caractérisent l'évolution socio-démographique et économique de la région. Elles font partie des données permettant de modéliser la demande de déplacements ;
- **des préférences de mobilité issues des enquêtes globales transport (EGT) successives** qui ont alimenté les différentes versions du modèle au fil du temps (ces préférences observées servent au calibrage des paramètres du modèle de demande). MODUS 3.1 est fondé sur l'EGT 2010 redressée sur l'année 2012 ;
- **des caractéristiques de l'offre routière et en transports collectifs.** Ces caractéristiques permettent de calibrer la demande en situation de calage et de modéliser les trafics routiers et TC en situation future ;
- **et de la demande exogène** (cf. supra).

C'est avec ces données d'entrée que le modèle estime la répartition géographique des déplacements (matrices de déplacement), le choix de mode (routier, TC ou modes actifs) et la fréquentation des réseaux par lignes ou par tronçons (affectation).

Le présent rapport présente les principales caractéristiques de MODUS (1) dans sa dernière version dite 3.1, les données nécessaires pour alimenter le modèle (2), et la construction du scénario prospectif à l'horizon 2030 (3). Cet ensemble d'éléments aboutit à la mise en œuvre de simulations produisant des résultats à partir de ce « scénario 2030 » considérant notamment l'offre du nouveau métro du Grand Paris Express (4).

Ce texte fournit donc un aperçu des travaux de modélisation des déplacements menés par la DRIEA-IF ces dernières années. Le degré de certitude associé aux principaux résultats présentés dans ce document est fonction de l'appréciation des experts internes en modélisation, de comités scientifiques externes, de connaissances sous-jacentes et est analysé sur la base d'indicateurs statistiques. Il est souvent retenu une fourchette de 20 % d'incertitude pour les trafics estimés par les modèles de ce type.

Il s'inscrit dans une démarche de transparence nécessaire à la conduite de l'action.

Avertissement : Les sigles et abréviations utilisés dans ce document sont explicités dans le glossaire.

² GTFS : General Transit Feed Specification. Format de données en open data initialement développé et promu par Google, notamment employé pour les TC (format *csv par type de données par exemple : arrêts, horaires, tracés de lignes, etc.).

1 - Le modèle MODUS

Cette première partie a pour but de présenter succinctement les principes de modélisation qui gouvernent MODUS dans sa version 3.1 et qui rendent possible la mise à disposition de résultats de simulations pour le scénario prospectif décrit dans ce rapport.

1.1 - La modélisation des déplacements

MODUS est un modèle de déplacement multimodal statique agrégé à 4 étapes à l'échelle de la région Île-de-France. Il est conçu pour permettre la simulation et l'analyse *a priori* de l'impact de projets d'infrastructures et de politiques de transports sur la mobilité des franciliens, dans la limite des possibilités offertes par ce type de modèle.

MODUS est développé à la DRIEA-IF depuis le milieu des années 1990. Il a connu plusieurs mises à jour au fil des versions.

1.1.1 - Les principes des modèles à 4 étapes

On nomme « 4 étapes » la séquence des choix individuels et collectifs qui conduisent à la réalisation des déplacements observés des personnes :

- Choix de se déplacer : qui se déplace ? Pour quel motif ?
- Choix de la destination : où peut-il aller ? Jusqu'où a-t-il les moyens d'aller ?
- Choix du mode de transport : à pied ? À vélo ? En voiture ? En transport en commun ?
- Choix de l'itinéraire : par une route secondaire ou une voie rapide ? Via cette correspondance ou celle-ci ?

Cette séquence est retranscrite par les 4 étapes de modélisation suivantes :

Principe et enchaînement du fonctionnement de MODUS

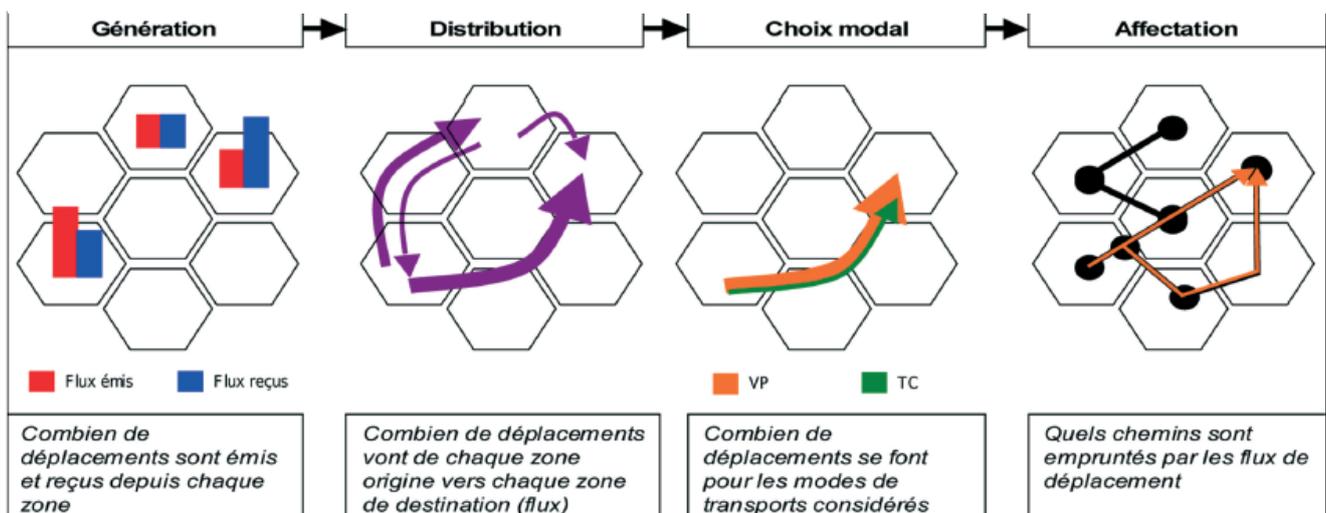


Figure 1: schéma de fonctionnement d'un modèle de déplacement à 4 étapes comme MODUS

Les comportements de mobilité des franciliens sont retranscrits dans les modèles parmi des équations mathématiques visant à reproduire globalement les choix réalisés sur le territoire, compte tenu de l'offre de transport existante.

1.1.2 - Les limites des modèles macroscopiques statiques agrégés

MODUS est un modèle macroscopique statique agrégé :

- « macroscopique » signifie que l'on modélise des flux de déplacements entre zones, sans distinguer chaque voyageur ou véhicule qui les constituent, et dont le comportement ne peut s'analyser qu'à une large échelle géographique ;
- « statique » signifie que le temps ne s'écoule pas dans le modèle, qui ne propose qu'une image moyenne représentative de la période étudiée. Cela peut se comparer à réaliser une photographie avec une exposition longue. Ainsi, les voyageurs apparaissent simultanément en tous les points de leur itinéraire ;
- « agrégé » signifie que les déplacements individuels sont regroupés entre eux au sein de catégories homogènes que l'on nomme segments de demandes. De même, la localisation de la population et de l'activité est synthétisée par le biais de zones homogènes (vis-à-vis de leur densité, leur urbanisation, leur secteur d'activité, leur proximité à l'offre de transport) d'une dimension adaptée à l'échelle régionale.

Ces trois simplifications opérées dans MODUS permettent de réduire les temps de calcul et de faciliter l'analyse des résultats. En contrepartie, l'emploi de MODUS n'est pas adapté pour représenter et analyser les situations suivantes :

- les phénomènes dynamiques tels que les changements de voies ou de rames, les files de congestion routière ou piétonnes sur les quais d'une station, les changements d'itinéraires en cours de déplacement (ces singularités requièrent le développement de modèles dynamiques) ;
- les phénomènes socio-économiques simulant à une échelle inférieure au zonage du territoire retenu, ou faisant évoluer la composition interne d'un segment de demande (ces particularités supposent un zonage plus fin et/ou une désagrégation des segments étudiés).

Néanmoins, MODUS est un modèle dit « à l'équilibre » et intègre une prise en compte de l'effet de la saturation des réseaux sur l'offre de transport perçue par les usagers. Également, MODUS prévoit une rétroaction de cette information sur la distribution, le choix modal ou simplement l'affectation des déplacements sur les réseaux.

1.1.3 - Les données et logiciels nécessaires à son exploitation

Pour fonctionner, MODUS s'appuie sur :

- Une programmation sous le langage SAS® pour l'exécution du modèle de demande, le bouclage du modèle et l'analyse macroscopique des résultats ;
- et le logiciel PTV Visum pour l'exécution des modèles d'affectation de trafic TC et de transport individuel (TI) et l'analyse détaillée des résultats par mode.

En outre, MODUS repose sur un nombre important de données d'entrée reflétant les hypothèses exogènes propres à chaque scénario modélisé, notamment :

- les données de l'enquête globale transport 2010 (redressées à partir des données de recensement de la population de 2012) ;
- les données socio-démographiques et leur répartition spatio-temporelle (population, emploi, chômage, commerces, universités) issues du modèle P+E de la DRIEA-IF et de l'Institut Paris Région (IPR) ;
- les données d'offre de transport (réseaux de transport, contrainte de stationnement, coût d'accès aux réseaux, temps de parcours moyens, capacité des stations Vélib, etc.) développées en régie et intégrant les principaux projets de transport dans la région ;

- les données de demande exogène (poids-lourds, cordons routiers, ferroviaires et aéroportuaires) fondées sur des enquêtes de mobilités spécifiques et des modèles externes à MODUS (FretUrb, modèle de trafic routier d'Aéroports de Paris (ADP), enquêtes cordons routiers, enquêtes dans les grandes gares parisiennes).

Le détail de ces jeux de données est présenté en deuxième partie.

1.2 - Caractéristiques de la nouvelle version du modèle

1.2.1 - Architecture globale de MODUS 3.1

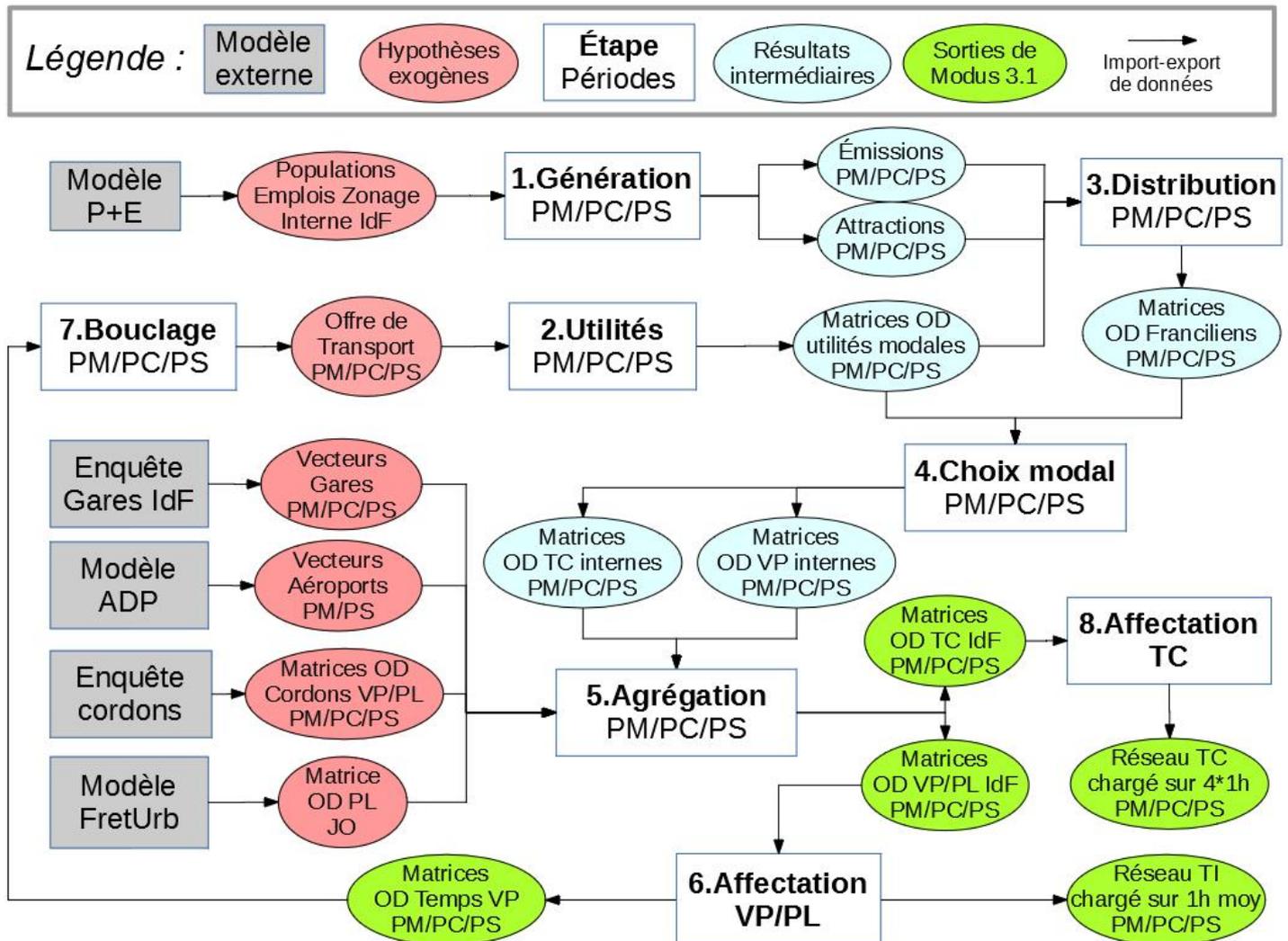


Figure 2 : architecture de MODUS 3.1

L'architecture de MODUS peut être résumée par le schéma ci-dessus (les sigles et abréviations utilisés sont explicités dans le glossaire en fin de document).

Cette architecture est semblable à celle de la précédente version de Modus 2.2 à l'exception notable de l'exécution du modèle de demande par période horaire, plutôt qu'à la journée. Par rapport à un modèle à 4 étapes classiques, MODUS intercale 3 étapes supplémentaires :

- celle du calcul des utilités modales (étape 2 sur le schéma) qui sont utilisées dans les étapes de distribution et de choix modal ;

- celle d'agrégation des matrices de demande (étape 5 sur le schéma) qui convertit les déplacements des usagers de véhicules particuliers en flux de véhicules, applique le report de calage et intègre les demandes échangées avec l'extérieur de la région ;
- celle de bouclage (étape 7 sur le schéma) qui réintègre les temps de parcours issus de l'affectation routière dans l'offre de transport en entrée du modèle de demande jusqu'à atteindre la convergence entre les entrées et sorties du modèle.

1.2.2 - Segmentation

La segmentation de la demande correspond à la manière dont les déplacements sont regroupés en plusieurs catégories « homogènes » au regard des étapes successives de modélisation.

MODUS 3.1 catégorise les déplacements au travers de 4 critères :

- les motifs de déplacement à l'origine et à la destination ;
- l'activité principale de l'utilisateur qui réalise le déplacement ;
- la captivité de l'utilisateur aux transports collectifs ;
- la période du déplacement au cours de la journée.

La captivité des usagers vis-à-vis des transports collectifs traduit leur accès aux véhicules particuliers en distinguant soit des usagers appartenant à des ménages non motorisés, soit des usagers majeurs sans permis de conduire (au sein de ménages motorisés ou non). Évaluée à l'échelle départementale, on observe que la captivité est étroitement corrélée avec la densité démographique et la proximité à une offre de transport collectif structurante.

Chaque déplacement est rattaché à une période de la journée à laquelle correspond une offre de transport moyenne modélisée : période de pointe du matin (PPM : 6h-10h), période creuse de jour (PCJ : 10h-16h), période de pointe du soir (PPS : 16h-20h). La répartition des déplacements entre ces 3 périodes est distincte pour chaque motif comme l'illustre le graphique ci-après.

Répartition des déplacements interzonaux en journée selon le segment

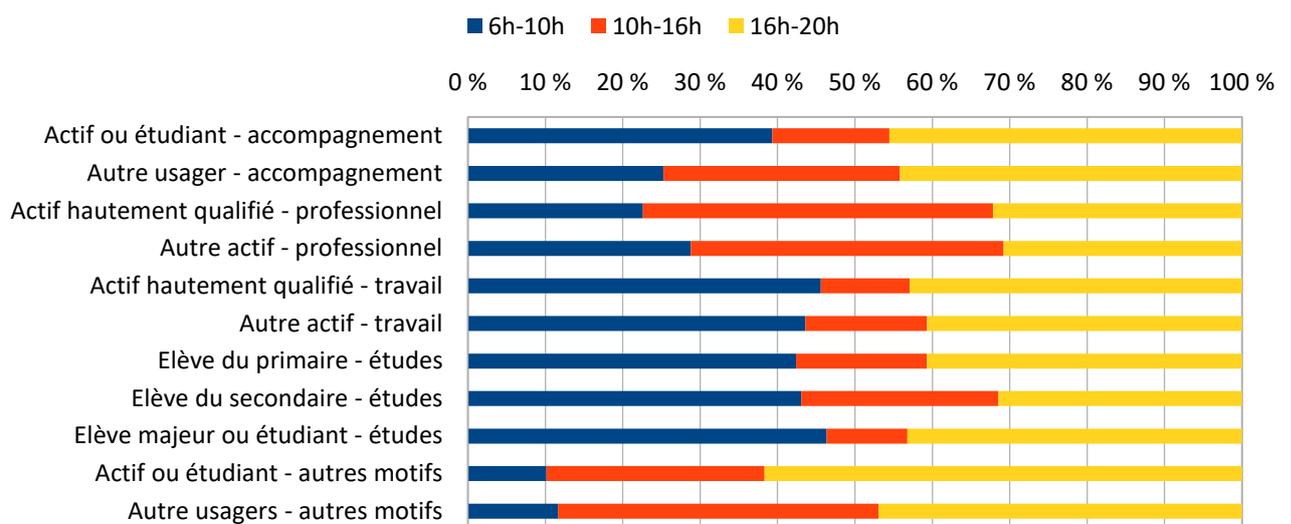


Figure 3 : répartition en période horaire selon les motifs de déplacements de MODUS

1.2.3 - Génération linéaire

L'étape de génération des déplacements de MODUS 3.1 s'appuie sur 22 modèles de régressions linéaires par période sur les données socio-démographiques localisées. Ces modèles permettent de calculer le nombre de déplacements émis et attirés par chaque zone MODUS pour chacun des segments de demande.

Par exemple en période de pointe du matin, le nombre de déplacements émis à destination du travail est proportionnel au nombre d'actifs occupés résidant dans chaque zone. De même, le nombre de déplacements attirés à destination du travail est proportionnel au nombre d'emplois dans chaque zone.

La carte ci-dessous illustre la répartition population active – emploi à la zone MODUS à Paris et en proche banlieue. Le centre de Paris et le quartier de la Défense concentrent beaucoup d'emplois et sont donc principalement attracteurs de déplacements à destination du travail le matin, tandis que les communes de la périphérie sont majoritairement émettrices de ces déplacements.

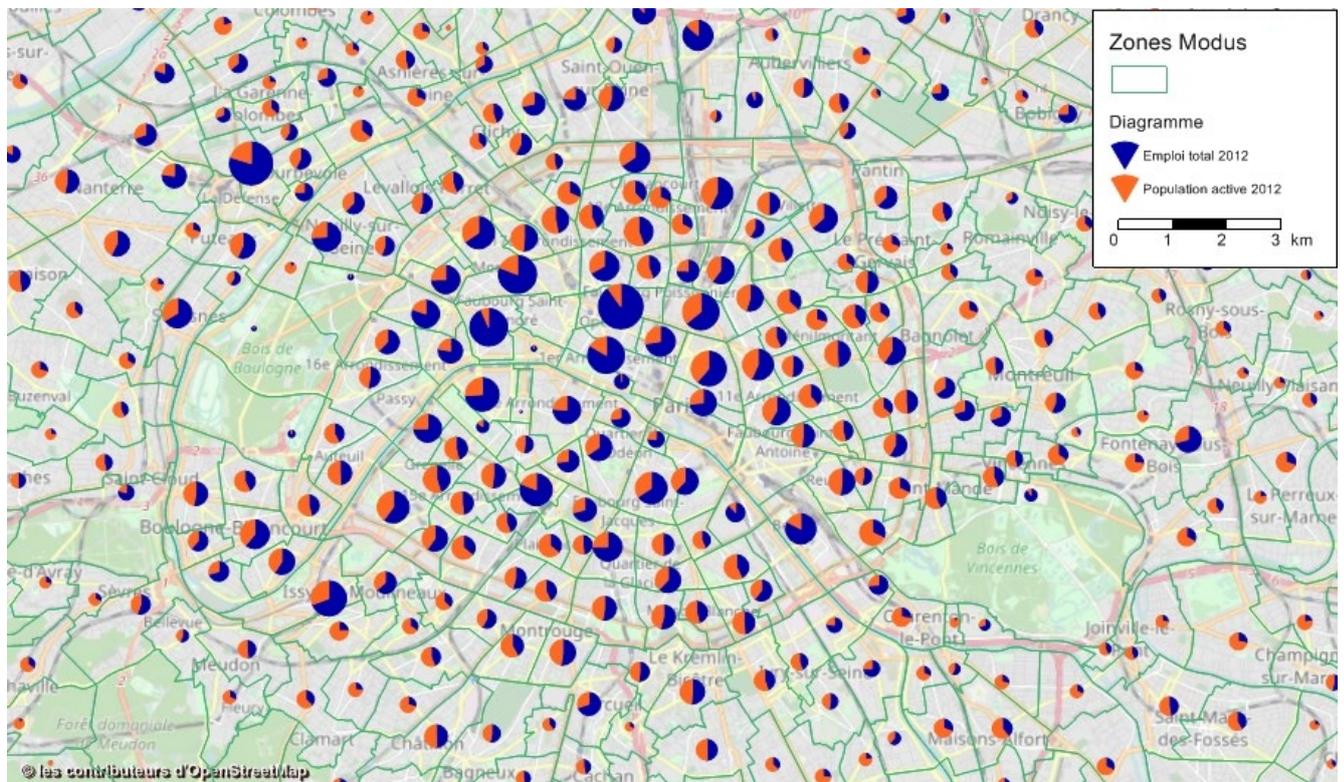


Figure 4 : illustration des disparités territoriales dans l'émission et l'attraction des flux domicile-travail

Les 22 segments de demande de déplacements sont ensuite scindés en 2 catégories : « captifs » (déplacements d'individus sans véhicule motorisé au sein du ménage ou d'individus majeurs sans permis de conduire) et « non captifs » (déplacements d'individus avec au moins un véhicule motorisé au sein du ménage et un permis de conduire si l'individu est majeur) par le biais de taux de captivité départementaux propres à chaque segment et à chaque période modélisée.

Chacun des 44 segments est ensuite équilibré en émission et en attraction à l'échelle de la région. Cela permet de garantir l'égalité entre le nombre de déplacements émis et attirés pour un segment donné. MODUS agrège alors ces demandes en 28 segments homogènes en vue de l'étape de distribution.

1.2.4 - Distribution gravitaire

L'étape de distribution repose sur 28 modèles gravitaires calibrés par période sur les données de l'EGT : cela signifie que le choix de destination du déplacement dépend de l'accessibilité par l'ensemble des modes de transport des zones attractrices pour chaque motif de déplacement et de la propension des usagers concernés à se déplacer loin.

Par exemple, les élèves de primaire sont fortement attirés par les écoles primaires accessibles à pied ou rapidement en voiture, car l'offre est abondante sur toute la région, et les enfants sont peu enclins à supporter de longs trajets. Les étudiants à l'inverse ont accès à une offre limitée (universités et écoles supérieures) et sont disposés à réaliser de plus longs trajets.

La carte suivante illustre la distribution modélisée des déplacements originaires du centre de Meaux en période de pointe du matin en 2012. Au-delà des nombreux déplacements internes à la commune, on identifie clairement Paris, l'aéroport de Roissy et la zone d'activité de Chessy comme principaux pôles attracteurs pour les habitants de Meaux.



Figure 5 : illustration de la distribution des flux émis par une zone dans MODUS

Pour caractériser la facilité à se déplacer entre chaque couple origine-destination, ces modèles gravitaires utilisent l'utilité multimodale propre à chaque segment de demande définie à l'étape suivante. L'offre de transport interne à chaque zone est reconstituée à l'aide d'une distance caractéristique des déplacements internes dépendante de la surface totale et bâtie de la zone concernée et de l'offre modélisée vers les zones adjacentes.

Un algorithme (dit de Fratar³) est employé sur les matrices OD ainsi obtenue pour retrouver les nombres de déplacements émis et attirés par chaque zone et pour chaque segment de demande calculés à l'étape précédente de génération. MODUS agrège ensuite ces 28 segments pour retrouver la segmentation présentée précédemment en 11 motifs de déplacements combinés hiérarchisés et non orientés croisés avec les 2 catégories de captivité aux transports collectifs en vue de l'application de l'étape de choix modal.

³ Cf. glossaire.

1.2.5 - Choix modal discret non linéaire

L'étape de choix modal repose sur 11 modèles de choix discret (de type logit⁴) calibrés simultanément sur les 3 périodes avec les 4 alternatives modales suivantes :

- TC : transport collectif (avec rabatement éventuel en véhicule) 
- VP : véhicule particulier (VL, VUL, 2RM, Taxi) 
- MD : modes doux (marche, fauteuil, trottinettes et rollers) 
- CY : cycles (vélos, Vélib Métropole, vélos en libre-service) 

L'étape du choix modal permet d'attribuer pour chaque couple OD une proportion d'usagers pour les 4 modes proposés dans MODUS. Cette répartition est fonction du calcul de l'utilité de chaque mode disponible pour réaliser l'OD concernée, qui repose sur une combinaison non linéaire des caractéristiques de l'offre de transport (coût, temps, etc.) perçue par les voyageurs du segment étudié. La part modale découle du rapport entre l'utilité du mode et l'utilité de l'ensemble des modes (ou « multimodale ») par le biais de la fonction exponentielle.

1.2.5.1 - Transport collectif

L'offre associée aux transports collectifs (métro, bus, tram, train ou RER quel que soit le mode de rabatement employé) est modélisée à travers :

- la somme des temps actifs (temps moyen de rabatement sur le premier arrêt de transport utilisé depuis la zone d'origine, temps moyen d'accès à destination depuis le dernier arrêt emprunté, temps de marche dans les correspondances éventuelles) ;
- la somme des temps moyens d'attente au départ et en correspondance ;
- la somme des temps passés en véhicule de transport ;
- le coût kilométrique représentatif de la tarification des zones traversées.

1.2.5.2 - Véhicule particulier

L'offre associée aux véhicules particuliers (voiture ou deux-roues motorisé, conducteur ou passager) est modélisée à travers :

- le temps de parcours en charge représentatif de chaque période de la journée ;
- le coût kilométrique lié à la dépense énergétique et à l'usure du véhicule ;
- la contrainte de stationnement représentée par le pourcentage moyen de risque de devoir payer le stationnement à l'origine et à destination.

1.2.5.3 - Modes doux

L'offre associée aux modes doux (marche, fauteuil roulant, roller, trottinette) est modélisée de manière simplifiée par le calcul de la distance à vol d'oiseau entre les centroïdes de zones, l'application d'un coefficient de détour de 1,3 et la prise en compte d'une vitesse moyenne de déplacement de 4 km/h.

⁴ Cf. glossaire.

1.2.5.4 - Cycles

L'offre associée aux cycles (vélo, Vélib, vélos en libre-service) est modélisée de la même manière que les modes doux mais avec une vitesse moyenne de déplacement de 15 km/h.

L'offre Vélib entre la zone d'origine et de destination intervient dans l'utilité (basée sur les capacités d'accueil cumulées des stations Vélib situées dans chaque zone).

La taille des zones MODUS associée à la portée relativement faible des déplacements réalisés à vélo rendent l'affectation de cette demande cycliste sur le réseau routier peu pertinente à l'échelle régionale. C'est la raison pour laquelle l'offre de transport est modélisée de manière simplifiée, ce qui limite aussi l'intérêt de l'analyse des résultats relatifs à ce mode de déplacement. Des développements ultérieurs du modèle permettront d'améliorer les possibilités de prise en compte d'hypothèse dédiée au développement de la demande cyclable.

1.2.5.5 - Non linéarité du modèle

Pour capter la non linéarité de la sensibilité au coût et au temps dans les choix de mode, des transformations Box-Cox⁵ sont appliquées sur les composantes suivantes :

- les temps en véhicules (pénibilité marginale croissante avec l'augmentation du temps) ;
- les coûts financiers (pénibilité marginale décroissante avec l'augmentation du coût) ;
- le stationnement (pénibilité marginale décroissante avec l'augmentation de la contrainte) ;
- le temps d'attente (pénibilité marginale décroissante avec l'augmentation de l'attente).

Pour représenter l'usage préférentiel de certains modes selon le segment de demande, les utilités VP et TC sont équilibrées par période et par catégorie de captivité via des constantes d'alternatives.

Le graphique ci-dessous illustre la sensibilité de la part modale des transports collectifs (TC) à l'écart entre le temps de parcours TC (fixé à 45 minutes) et celui par la route pour chaque segment de demande (sous l'hypothèse d'absence de contrainte de stationnement et de coût de déplacement relativement faibles).

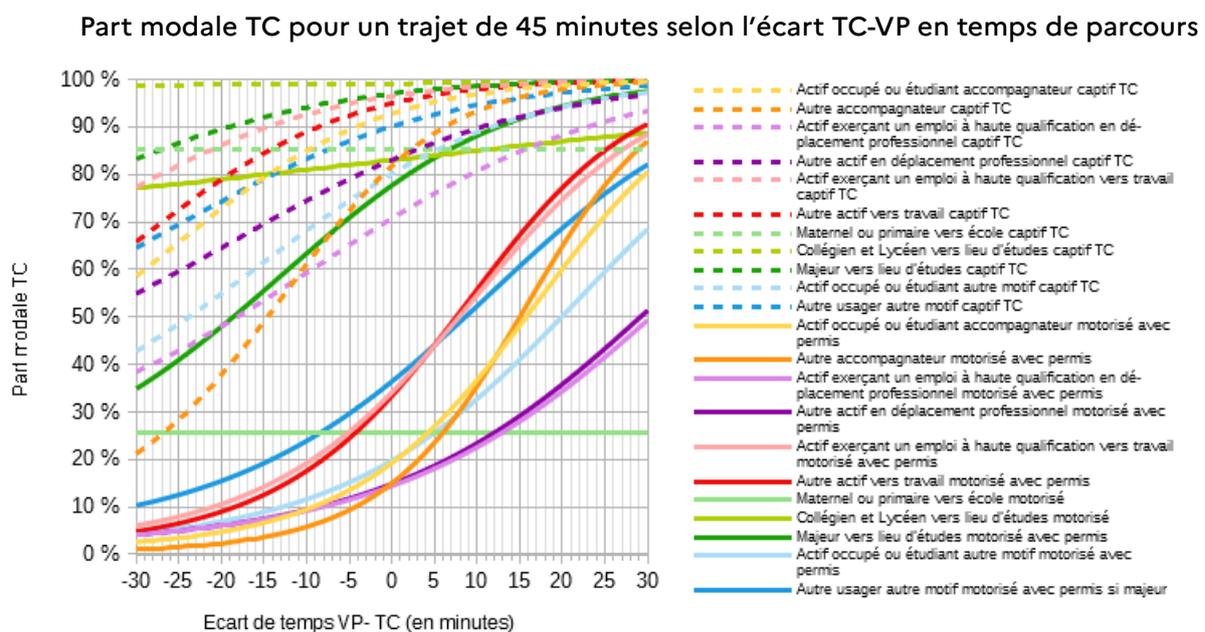


Figure 6 : illustration du choix modal selon le motif dans MODUS

⁵ Cf. glossaire.

Lorsque les temps de parcours sont égaux (écart nul), on observe que seuls 15 à 35 % des usagers motorisés ont recours aux transports collectifs dans cette situation. La part des TC diminue si le temps de trajet VP est plus court, et augmente lorsque ce temps de trajet se détériore sous l'effet de la congestion par exemple. En revanche, 70 à 100 % des usagers ne disposant pas d'une voiture ou du permis de conduire ont recours aux transports collectifs. Les autres usagers captifs des TC ayant recours à un véhicule particulier sont, soit des personnes se faisant déposer par un conducteur, soit des personnes ayant accès à un véhicule partagé hors du ménage (véhicule professionnel, taxi, Autolib, etc.).

1.2.6 - Affectation en période de pointe de 4 heures

L'affectation de la demande sur les réseaux est un processus spécifique pour chaque mode de transport qui s'applique à chaque couple de zones d'origine et de destination. Elle permet de déterminer le choix des itinéraires des voyageurs (respectivement des véhicules) sur le réseau TC (sur le réseau routier), parmi l'ensemble des itinéraires possibles. À l'issue de l'affectation, le réseau est chargé et permet une vue globale de l'utilisation des lignes (respectivement des voies) par l'ensemble des voyageurs (respectivement des véhicules).

1.2.6.1 - Modèle d'affectation TC

L'affectation TC commence par la recherche et la sélection des itinéraires : à la lecture du réseau, les éléments d'offre de transport sont transformés en temps généralisé, afin de réaliser la première étape de recherche de tous les itinéraires (ou liaisons) possibles, pour ensuite ne garder que les plus efficaces. On parle d'affectation TC à l'horaire dans la mesure où l'offre sur le réseau est codée sous la forme d'horaires entre les différents points d'arrêt, ce qui permet d'avoir des temps d'attente théoriques exacts entre les différents moments de la journée.

La deuxième étape est le calcul du temps généralisé de chaque liaison sélectionnée, c'est-à-dire la somme pondérée des différentes composantes ci-dessous :

- le temps de rabattement sur le premier arrêt de transport depuis la zone d'origine ;
- le temps d'attente au départ pour monter dans le premier véhicule ;
- le temps de transport à bord d'un véhicule ;
- le temps de marche pour faire les correspondances ;
- le temps d'attente en correspondance ;
- le temps d'accès à la zone de destination ;
- une pénalité à chaque embarquement selon le type de transport en commun utilisé.

Chacune des sous-composantes est pondérée. Les coefficients à appliquer permettent de prendre en compte le fait que l'on ne ressent pas de la même manière le temps suivant son utilisation : une minute passée à bord d'un véhicule est généralement moins pesante (semble moins longue) qu'une minute à attendre la correspondance.

En plus de ces coefficients il faut noter que la prise en compte des temps de rabattement et d'accès depuis et vers les zones d'origine et de destination n'est pas linéaire : plus le temps à y consacrer est grand, moins il est pénible d'en passer davantage.

Les coefficients de pondération et de non-linéarité ont été estimés avec un modèle Logit⁶ à partir des enquêtes origines et destinations (choix d'itinéraires) de la RATP et de Transilien.

⁶ Cf. glossaire.

En outre, le temps en véhicule est aussi modulé par la pénibilité due à la saturation de la portion de ligne empruntée. Plus la portion de ligne est chargée au-dessus de la capacité théorique de la ligne, plus le temps semblera long. Il ne s'agit pas exactement d'une prise en compte de la congestion dans les TC avec un bouclage sur l'affectation mais une manière simplifiée de défavoriser les itinéraires surchargés.

La tarification n'est pas prise en compte : les voyageurs ont déjà choisi de prendre les transports en commun pour se déplacer. On considère que tous les trajets sont accessibles monétairement de la même manière. L'hypothèse peut être forte mais possible par la large utilisation du pass Navigo adapté aux déplacements quotidiens (même si l'impact du dézonage du pass Navigo à partir de 2015 n'est pas pris en compte dans les simulations réalisées avec MODUS 3.1, puisque le modèle est calé sur l'année de référence 2012).

1.2.6.2 - Modèle d'affectation TI

L'affectation de transport individuel (TI) est une affectation multiclasse « Tribut⁷ » à l'équilibre. Elle réalise de manière itérative les 4 étapes suivantes jusqu'à l'atteinte d'un état d'équilibre :

- recherche du plus court chemin selon le temps généralisé des PL ;
- recherche du plus court chemin selon le temps généralisé des VP ;
- affectation des PL sur le réseau ;
- affectation des VP sur le réseau.

Du fait de l'emploi du module « Tribut » pour la prise en compte des péages avec une distribution de la valeur du temps, la recherche du plus court chemin se fait en un ou deux temps pour chaque couple OD : calcul du temps généralisé de chaque chemin possible et recherche du minimum, s'il contient un péage, application d'une pénalité pour chaque tranche de valeur du temps et comparaison aux itinéraires moins rapides, conservation le cas échéant de plusieurs chemins compétitifs.

Le temps généralisé sur la route se compose :

- du temps de rabattement sur le premier nœud routier depuis la zone d'origine ;
- du temps d'attente au carrefour ;
- du temps passé à manœuvrer dans les carrefours ;
- du temps de parcours des tronçons à vide ;
- du temps perdu sur les tronçons du fait de la densité du trafic ;
- de l'équivalent en temps du coup d'usage du véhicule (carburant, assurance) ;
- du temps d'accès à la zone de destination depuis le dernier nœud routier.

Le temps perdu sur les tronçons du fait de la densité du trafic est déduit de l'application des courbes « débit-vitesse ».

⁷ Cf. glossaire.

2 - Données en entrée du modèle MODUS 3.1

2.1 - Les données du modèle de demande

2.1.1 - Le zonage MODUS, 1 339 zones pour 1,8 millions liaisons origines destinations

Pour représenter le territoire régional de manière synthétique, MODUS dispose d'un zonage.

Le zonage de MODUS 3.1 est le même que celui de MODUS 2.2, c'est-à-dire :

- 1 289 zones internes à la région, correspondant à l'agrégation des 5 259 IRIS de l'INSEE en respectant les frontières communales et départementales.
- 4 zones aéroports correspondant respectivement aux employés et aux passagers aériens de la plateforme Roissy-CDG (1 290 et 1 291) et d'Orly (1 292 et 1 293).
- 34 zones cordons routières (1 294 à 1 327) correspondant aux principaux axes routiers d'échange avec l'extérieur de la région.
- 12 zones gares ferroviaires (1 328 à 1 339) correspondant aux gares SNCF existantes ou projetées.

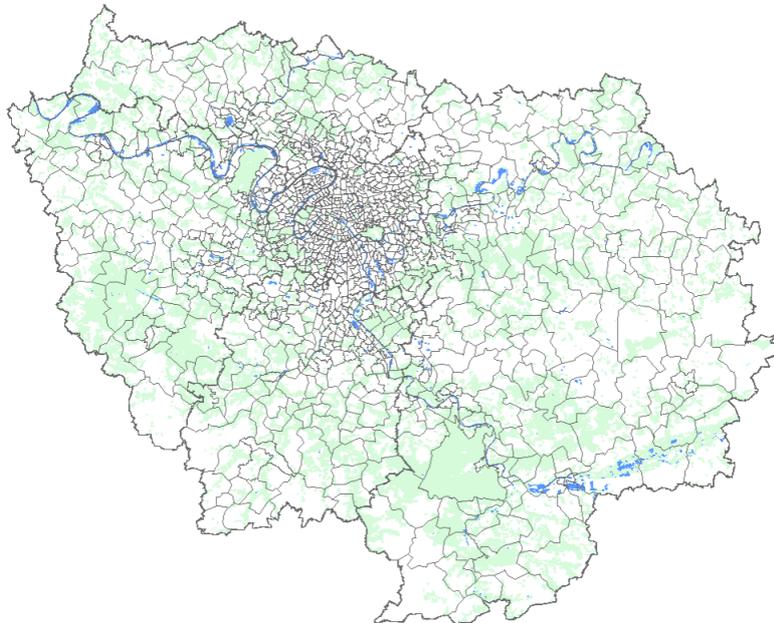


Figure 7 : zonage de la région Île-de-France dans MODUS

Chaque zone est résumée par son périmètre et son centroïde dont la localisation tient compte de la répartition de la population résidente et de l'emploi dans la zone. Le zonage est constant entre l'horizon de calage du modèle et l'horizon de projection.

Le résultat de la demande de déplacement calculée par MODUS est produit sous la forme de matrices origines destinations (OD) basées sur son zonage. Pour estimer cette demande sur chaque relation OD, les données d'offre de transport, notamment les temps et les coûts associés, sont elles aussi présentées sous forme de matrice. Puisque le modèle gère 1 339 zones, MODUS travaille avec $1\,339 \times 1\,339$ relations OD, soit près de 1,8 millions d'OD.

2.1.2 - Données socio-démographiques

L'étape de génération des déplacements s'appuie sur des données socio-démographiques localisées, c'est-à-dire l'estimation des volumes d'habitants et d'activités présents dans chaque zone interne à la région. Élaborées à partir des recensements de la population conduits par l'INSEE et projetées à l'aide du modèle P+E (population et emploi)⁸ développé en partenariat entre la DRIEA et l'IPR (Institut Paris Région), ces données sont des hypothèses particulièrement dimensionnantes pour les simulations.

La liste des indicateurs est la suivante :

Indicateurs de population résidente	Indicateurs d'activité
Cadres et professions intellectuelles supérieures occupés	Emplois des cadres et professions intellectuelles supérieures
Actifs exerçant une autre occupation	Emplois d'un autre type
Élèves scolarisés âgés de 2 à 10 ans	Élèves scolarisés âgés de 2 à 10 ans au lieu d'études
Élèves scolarisés âgés de 11 à 17 ans	Élèves scolarisés âgés de 11 à 17 ans au lieu d'études
Élèves scolarisés ou étudiants âgés de 18 à 29 ans	Élèves/étudiants âgés de 18 à 29 ans au lieu d'études
Retraités	Emploi de loisirs
Actifs inoccupés et autres inactifs de 15 ans ou plus	Emploi commercial

2.1.3 - Offre de transport

2.1.3.1 - Les temps de transports

Les temps de transport interzonaux sont calculés par Visum à partir d'une affectation des réseaux, pour chaque horizon d'étude.

Pour les VP et les PL, le temps de parcours total pour chaque OD est enregistré. Il comprend les temps sur connecteurs, soit le temps d'aller chercher sa voiture à pied plus celui pour se rabattre sur le réseau plus le temps d'atteindre sa destination à pied et le temps en véhicule, qui est la somme de chacun des temps de parcours de chaque tronçon du réseau emprunté et le temps de franchissement des carrefours.

Pour les TC, la matrice de temps stocke le temps de déplacement total, mais aussi des informations sur ses différentes composantes, chacune étant la moyenne sur les différents itinéraires possibles retenus par Visum, pondérée par leur charge. Plus un itinéraire va être attractif et donc chargé de voyageurs plus il sera significatif dans la représentation interzonale du réseau. Les différentes composantes sont :

- le temps de rabattement et de diffusion (temps sur connecteurs) ;
- le temps d'attente (au départ pour monter dans le premier véhicule plus celui en correspondance) ;
- le temps de transport à bord d'un véhicule ;
- le temps de marche pour faire les correspondances.

2.1.3.2 - Les coûts des déplacements

Les coûts des déplacements interzonaux sont utilisés dans l'étape de choix modal des déplacements, pour arbitrer entre les VP et les TC.

⁸ Cf. Glossaire

Pour les VP

Le coût d'utilisation VP entre chaque zone représente le coût global perçu d'une voiture, ramené au kilomètre parcouru. Il prend en compte les frais moyens d'essence, d'entretien et de péages, pour une voiture de taille et d'utilisation moyenne de l'année 2010. La valeur de référence de MODUS est 0,242 €²⁰¹⁰ par kilomètre, d'après les données publiées par l'Automobile Club en 2013. La distance parcourue est considérée par simplification comme la distance à vol d'oiseau (portée) entre les centroïdes de zone, avec un coefficient de détours de 1,3.

Au final : $C_{vp} = \text{Portée} * 1,3 * 0,242$

Pour les TC

Les coûts d'utilisation des TC distinguent 2 coûts :

- le coût moyen d'un déplacement pour les usagers abonnés aux TC ;
- le coût d'utilisation des TC par les usagers non abonnés qui recourent à la billettique.

Dans un cas comme dans l'autre, les zones tarifaires d'origine, de destination et traversées (zone 1 à 5) sont déterminées à partir du chemin TC le plus efficace entre chaque paire de zones MODUS. L'enjeu est de déterminer, le plus correctement possible, le passage par Paris pour un déplacement au sein de la petite ou grande couronne.

Pour les abonnés, le coût moyen correspond au rapport entre le coût annuel de l'abonnement nécessaire au déplacement et le nombre moyen de déplacements réalisés par ces usagers (source OMNIL-RATP) dont est soustrait le taux moyen de prise en charge par l'employeur ou la collectivité selon le segment de demande étudié (source EGT).

Pour les non abonnés, le coût des billets OD est estimé à partir des différentes catégories de TC empruntés sur le chemin le plus efficace :

- bus et tramway : un ticket t+ avec correspondances possibles que pour ces modes ;
- métro : un ticket t+ avec correspondances possibles que pour ce mode ;
- RER et transilien : la distance parcourue multipliée par un prix kilométrique estimé à partir de relevés sur le site web Vianavigo (le site Internet de référence pour le choix d'itinéraire d'IDFM).

Comme MODUS ne distingue pas explicitement les abonnés des non abonnés, un coût composite entre ces 2 types de tarif a été recalculé en pondérant la part des abonnés dans chaque segment de demande. Au final, la sensibilité à ce paramètre était souvent trop faible pour être retenue comme pertinente sur le plan statistique, si bien que seul le coût kilométrique associé à la billettique est maintenue pour certains segments du modèle de demande.

2.1.3.3 - La contrainte de stationnement

La contrainte de stationnement est un indicateur estimé sur la base des données de déplacements de l'EGT 2010. Il s'agit du rapport entre le nombre de déplacements réalisés en véhicule particulier (VP) dont le stationnement à destination est déclaré payant ou interdit, rapporté au nombre total de déplacements en véhicule particulier. Ce calcul est réalisé à la journée, selon un macrozonage agrégeant les zones MODUS jusqu'à disposer d'un minimum de 30 observations par macrozone.

Ainsi, l'indicateur évolue entre 0 et 1, et plus il est élevé, plus la contrainte de stationnement est forte, moins le mode VP est intéressant car coûteux en temps et en argent.

2.1.3.4 - L'offre Vélib

L'offre Vélib n'est traduite qu'au travers de la capacité cumulée en nombre de vélos des stations présentes dans chaque zone MODUS. Cette donnée est extraite de l'open data (données ouvertes) de la ville de Paris.

2.1.3.5 - Le zonage tarifaire des TC

Le zonage tarifaire des TC est celui en vigueur à l'horizon de référence du modèle, c'est-à-dire 2012. À ce titre, MODUS 3.1 ne considère pas le dézonage du pass Navigo, car l'horizon de référence est 2012, époque où la région était découpée en 5 zones tarifaires.

2.2 - Le réseau de transports individuels

Le réseau VP (ou TI) est bâti sur le réseau de MODUS 2.2 enrichi manuellement et structuré en connecteurs, tronçons, nœuds et mouvements aux nœuds et péages. De façon simplifiée, le réseau comprend environ 22 000 km de voies, 37 000 arcs et 16 500 nœuds.

2.2.1 - Composition du réseau TI

Les arcs représentent les tronçons de route homogène (sens de circulation autorisé, nombre de voies, vitesse maximale autorisée, capacité et courbe débit-vitesse associées).

Les péages sont affectés aux tronçons de route concernés et codés de manière ponctuelle (au droit de la barrière de péage) quand la tarification est forfaitaire ou linéaire (sur l'ensemble des tronçons d'autoroute conduisant aux barrières de péages) lorsque la tarification dépend de l'itinéraire emprunté au prorata de la longueur d'autoroute parcourue en Île-de-France.

Les nœuds représentent les intersections (carrefours à feux, ronds-points, voies d'insertion, priorité gérée par des panneaux ou du marquage), mais également les points de changement des conditions de circulation (panneau de limitation de la vitesse, réduction ou augmentation du nombre de voies).

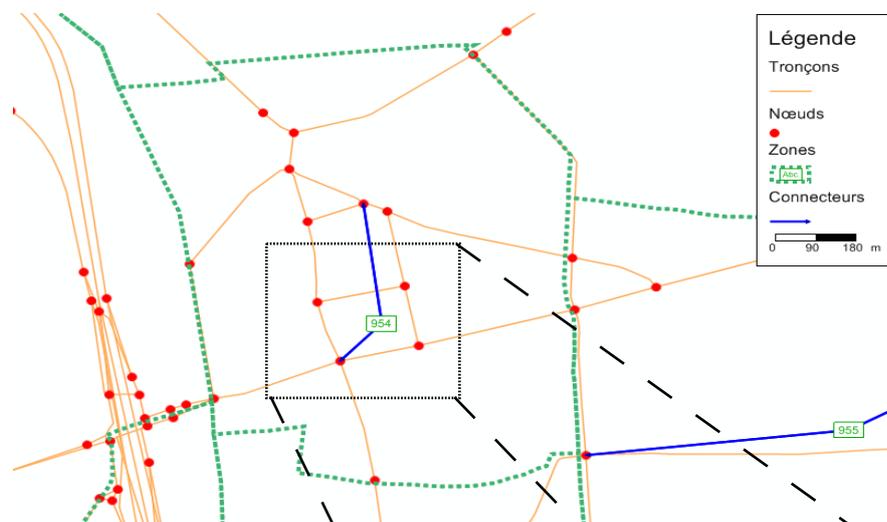
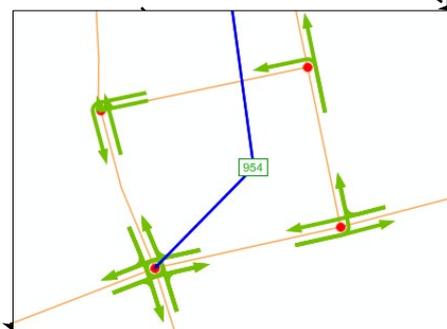


Figure 8 : éléments constitutifs du réseau TI de MODUS

Les mouvements autorisés sur ces nœuds sont pénalisés forfaitairement selon le type de nœud et le statut de la voie d'origine et de destination et le type de mouvement : tout droit, tourne-à-droite, tourne-à-gauche ou demi-tour.



2.2.2 - La typologie des tronçons

Le type de tronçon détermine les principales caractéristiques de la voie routière qui ont une incidence directe sur la circulation : le nombre de voies, la vitesse à vide, la capacité, les paramètres de sa courbe débit-vitesse. La carte ci-dessous illustre les 12 macrotypes de tronçons agrégeant les 95 types de tronçons retenus.

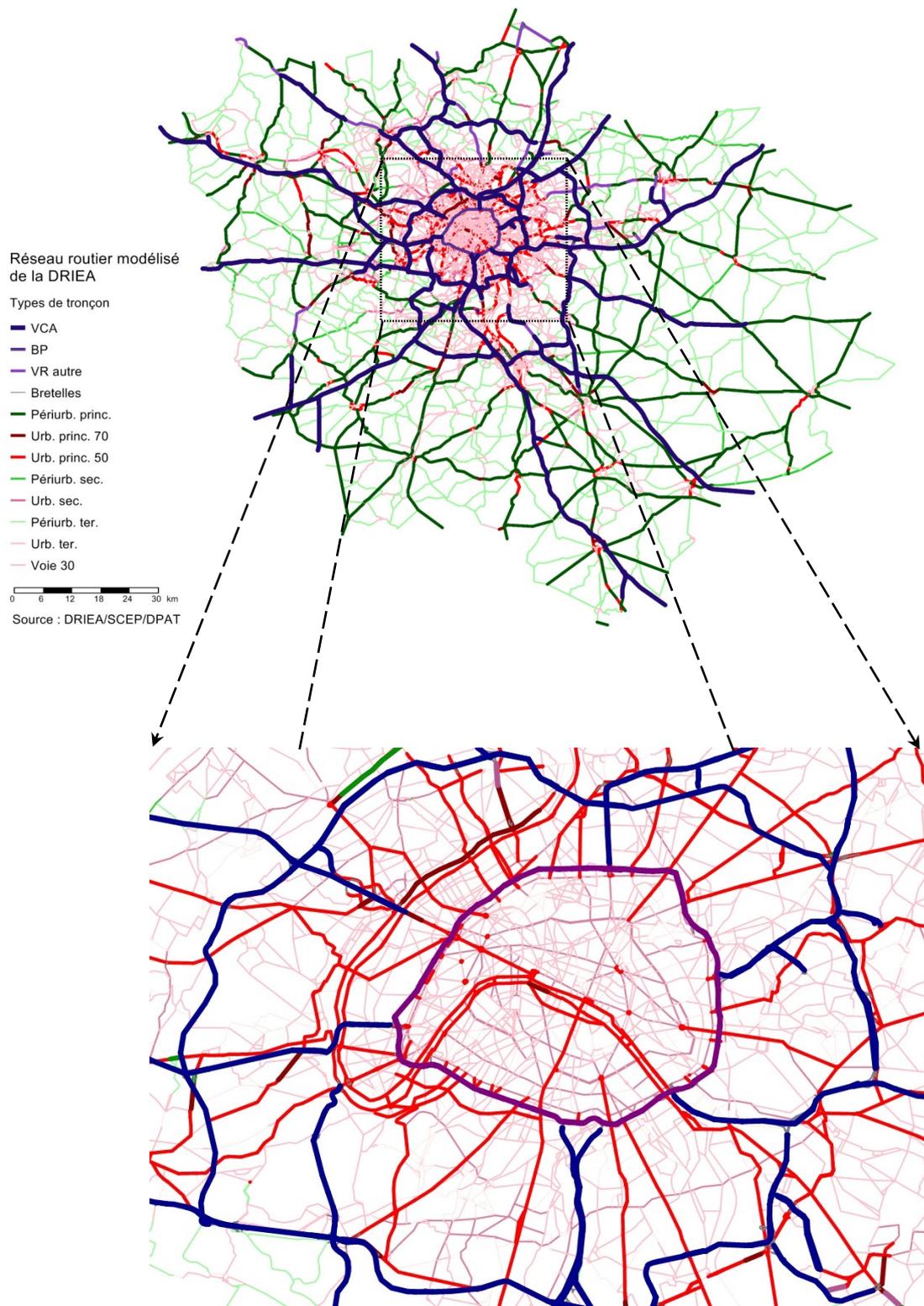


Figure 9 : types de tronçons routiers dans le réseau TI de MODUS

La capacité correspond au nombre maximum d'unité de véhicules particuliers (UVP) pouvant passer en une heure. En considérant que les véhicules laissent entre eux un laps de temps de 2 secondes, la capacité théorique d'une voie est de 1 800 véh/h. En conséquence, la capacité d'une route découle de son nombre de voies, mais elle peut être réduite par son régime de priorité au carrefour selon les voies qu'elle croise. Le graphique ci-dessous illustre la vitesse sur une autoroute limitée à 110 km/h en fonction du volume de demande qui cherche à la parcourir et selon un nombre de voies croissant (et donc d'une capacité croissante).

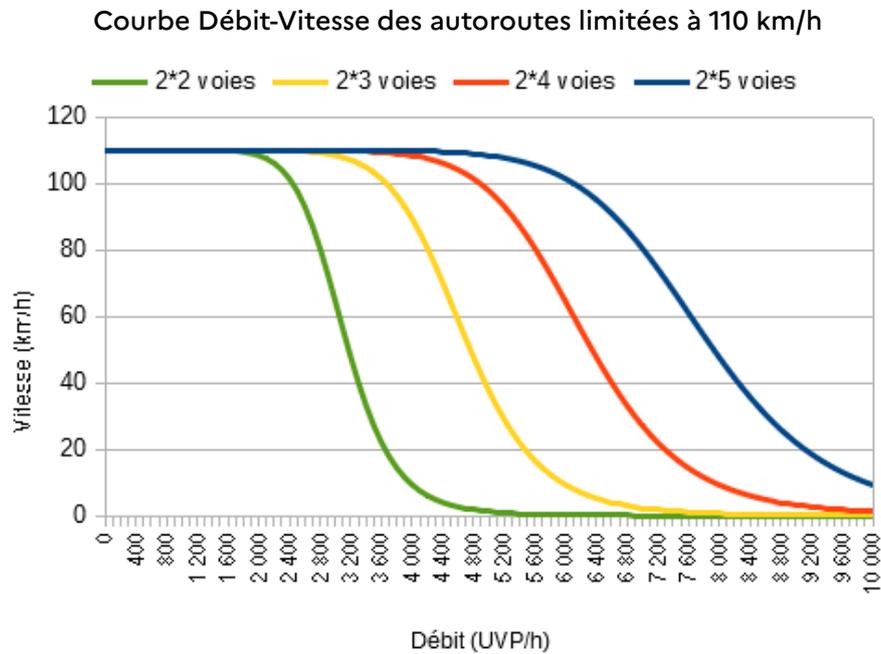


Figure 10 : effet du nombre de voies sur les courbes débit-vitesse du réseau TI

Le régime de priorité de la voie et la mixité de ses usagers sont synthétisés au travers du macrotypage de tronçon : autoroute et voies rapides autoroutières, périphérique, autres voies rapides, bretelle d'entrée ou de sortie du réseau structurant, voie périurbaine principale, secondaire et tertiaire, voie urbaine principale, secondaire et tertiaire, rond-point à 5 voies. Le graphique ci-dessous illustre la vitesse sur différents types de route à 2 voies limitée à 110 km/h en fonction du volume de demande qui cherche à la parcourir.

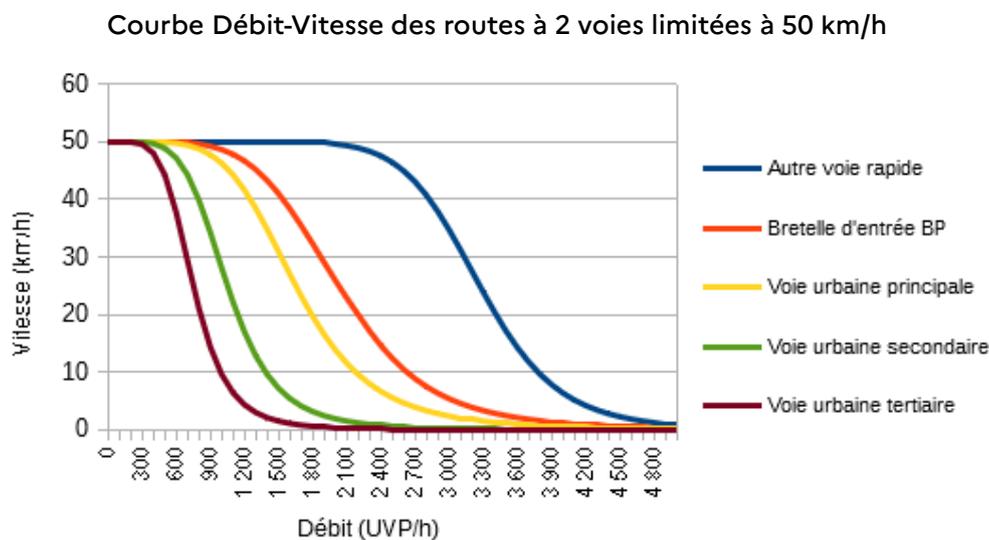


Figure 11 : effet des régimes de priorité sur les courbes débit-vitesse du réseau TI

2.2.3 - La typologie des nœuds

On distingue les 9 types de nœuds suivants : pas de carrefour, entrée/sortie d'autoroute, entrée/sortie de voie rapide, voie de présélection, voies d'insertion, ronds-points, carrefour à feux, stop/cédez-le-passage et priorité à droite.

Le type des nœuds est déduit du type et du nombre de routes qui s'y croisent. En effet, le modèle routier comporte plus de 16 500 nœuds, il serait donc fastidieux d'en faire la déclaration sur la base de constatation terrain et d'en suivre l'évolution à l'échelle régionale.

Les pénalités forfaitaires appliquées aux mouvements aux nœuds découlent du type du nœud, du mouvement réalisé et de la catégorie des voies empruntées. Les demi-tours sont systématiquement interdits, sauf dans les ronds-points où la pénalité appliquée est égale à celle du tourne-à-gauche.

Le graphique ci-dessous illustre les pénalités appliquées aux véhicules particuliers. Ces pénalités sont multipliées par 1,5 pour les poids lourds lors de la recherche d'itinéraire pour privilégier les itinéraires les plus simples du fait de leur moindre manœuvrabilité.

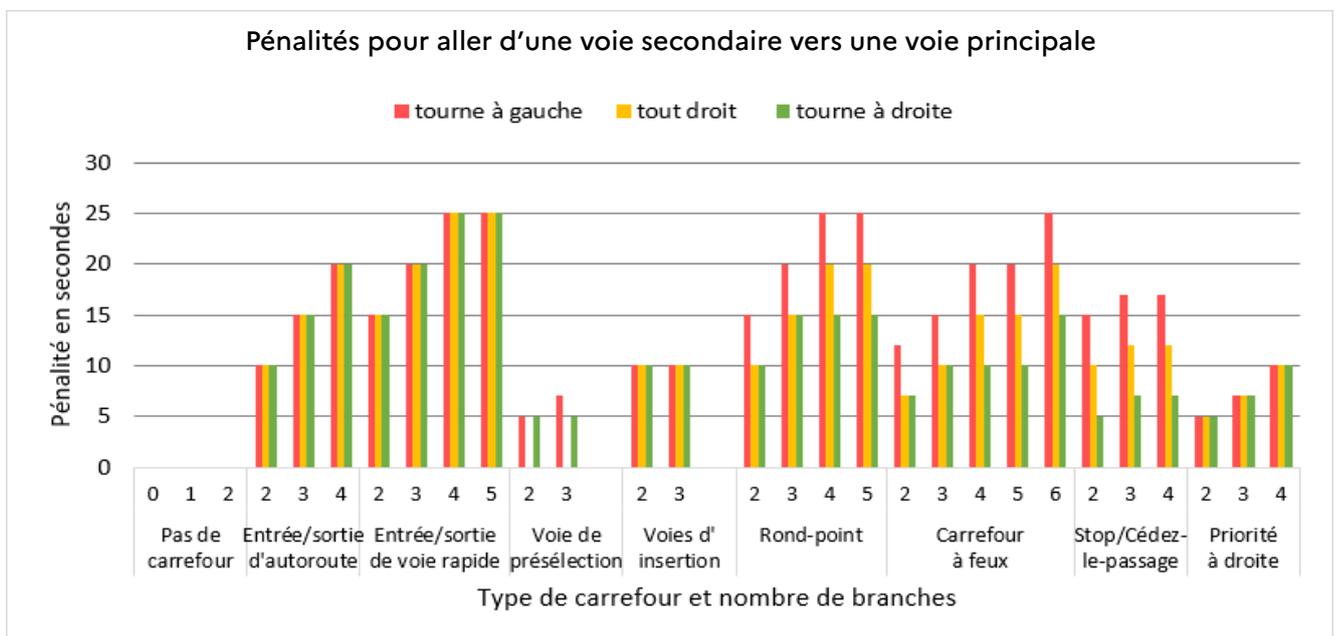


Figure 12 : pénalités aux nœuds appliquées dans le réseau TI de MODUS

2.2.4 - Les connecteurs de centroïde

Les connecteurs représentent les temps nécessaires aux échanges entre le centroïde d'une zone et les nœuds secondaires les plus proches du réseau routier modélisé selon une vitesse dépendante de la densité de la zone et croissante en fonction de la longueur du connecteur.

Vitesse de déplacement sur connecteurs VP

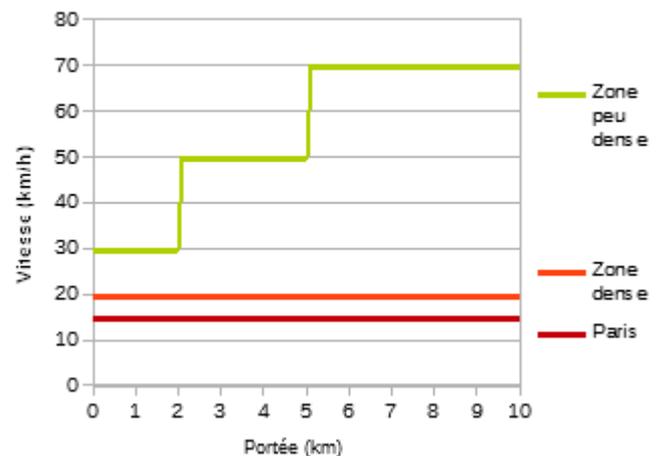


Figure 13 : temps de parcours des connecteurs routiers du réseau TI

2.2.5 - Le codage et l'activation des projets

Le réseau intègre les projets routiers portés à la connaissance de la DRIEA dans un niveau de détails suffisant à leur intégration. Ils sont activés selon l'horizon et le scénario étudié. Il peut s'agir d'une modification de la typologie des tronçons et nœuds existants (lorsque le projet modifie la voirie existante) ou bien d'un ajout de tronçons et nœuds supplémentaires (lorsque le projet consiste à créer une nouvelle infrastructure, ou modifie substantiellement l'aménagement du réseau existant).

Par exemple, les voies sur berges étaient encore ouvertes à la circulation routière en 2010, mais sont depuis fermées aux véhicules motorisés. À l'inverse, la mise en service du prolongement de l'A16 a eu lieu fin 2019, le tronçon correspondant est donc actif en 2020. En conséquence, le réseau contient des attributs permettant de désactiver les tronçons correspondants aux voies sur berges et d'activer ceux correspondant à ce prolongement autoroutier pour simuler l'offre routière actuelle. Selon le même principe, les projets aujourd'hui en chantier ou simplement à l'étude sont désactivables selon l'horizon à simuler.

La carte ci-dessous fait figurer les projets mis en service entre l'horizon de calage (2012) et aujourd'hui (2020).

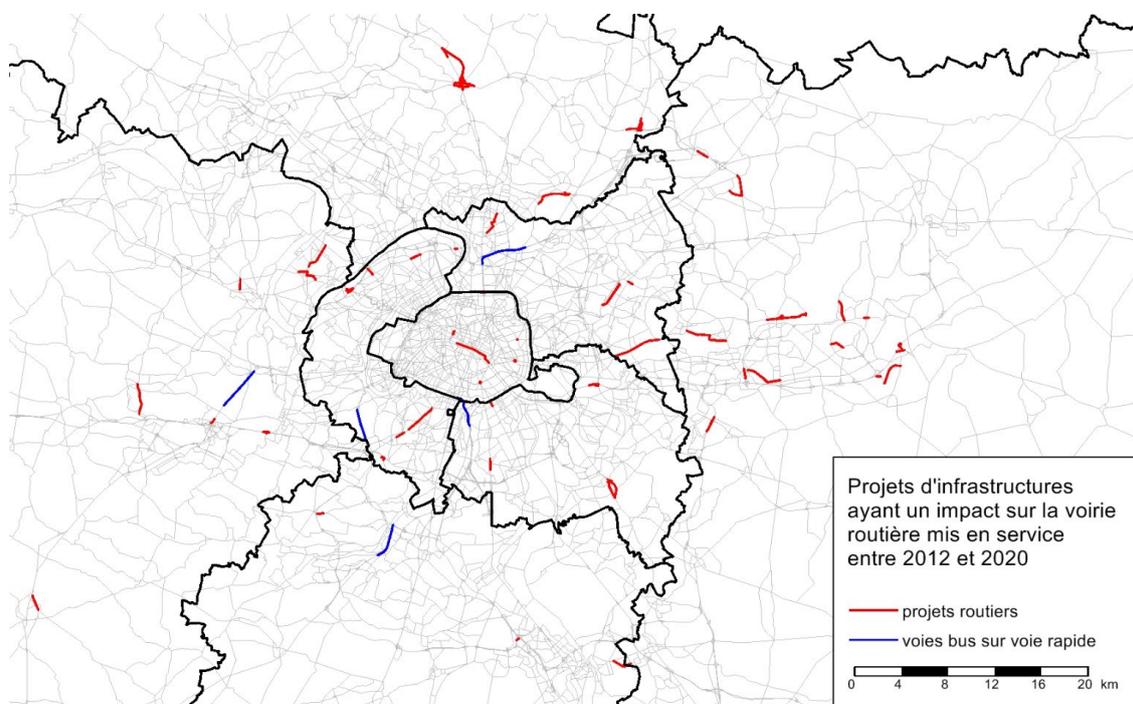


Figure 14 : carte des projets routiers mis en service entre 2012 et 2020

2.3 - Le réseau de transports collectifs

2.3.1 - Offre basée sur le GTFS

Un GTFS est un format de partage de données qui rassemble les informations d'offre de transport en commun d'un réseau. Il décrit les itinéraires des lignes accessibles aux voyageurs avec les horaires de passage à leurs arrêts, qui sont aussi géolocalisés. GTFS est un acronyme pour « *General Transit Feed Specification* ». Cette spécification a été développée à l'origine en partenariat entre un opérateur de transport public à Portland (USA, OR) et Google. Le format GTFS est généralement utilisé pour fournir des données sur le transport en commun pour les applications de calcul d'itinéraires multimodaux.

La structure des fichiers GTFS «Île-de-France Mobilités»

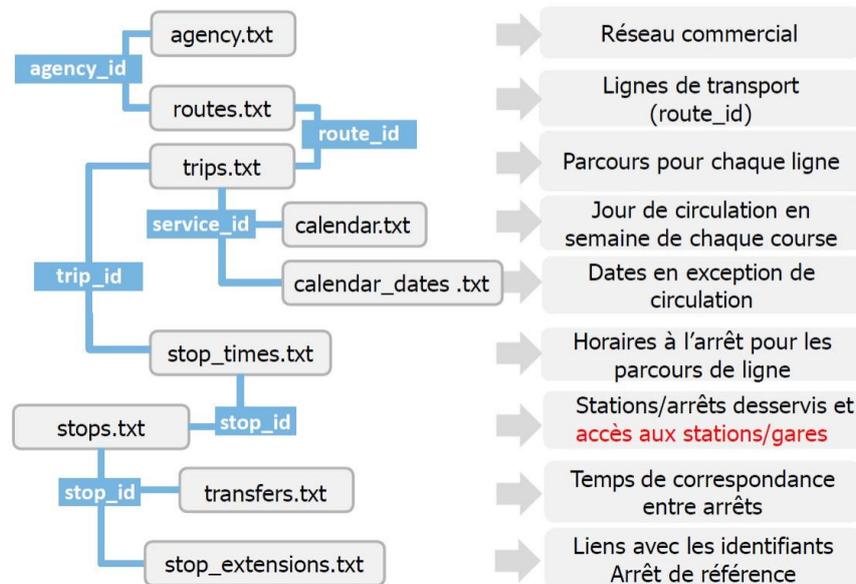


Figure 15 : GTFS d'IDFM (source : open data IDFM)

L'autorité organisatrice de la mobilité, Île-de-France Mobilités (IDFM), met en libre disposition ses données d'offre TC sous format GTFS sur son site dédié à l'open data⁹ (données ouvertes).

À l'occasion de la mise à jour vers MODUS 3.1, le réseau des transports en commun francilien pour le modèle a été complètement recréé à partir du GTFS d'IDFM, qui a été transformé en réseau Visum.

Outre certaines caractéristiques propres pour 2030, le réseau TC comporte deux mises à jour de l'offre de transports francilien :

- un nouveau réseau présentant une offre codée sur un jour ouvrable hors vacances dont les horaires sont décrits sur la plage 5h-21h au lieu de 6h-10h ;
- un réseau de bus actualisé et enrichi par rapport à la situation de 2012.

Un réseau Visum est un ensemble de nœuds (environ 30 000 points géolocalisés) interconnectés par des tronçons (environ 145 000). Une offre de transport est associée à ce réseau. Cela revient à décrire une ligne qui correspond à un ensemble d'itinéraires de ligne. Cet ensemble est une succession de tronçons, associés chacun à un temps de parcours. Il est possible de déterminer la possibilité de monter ou descendre dans un itinéraire de ligne via un nœud en y définissant un point d'arrêt. Au sein d'un arrêt qui regroupe plusieurs points d'arrêt, il est possible de définir des correspondances.

La transformation du GTFS en réseau Visum a été l'objet de simplifications et corrections, par exemple sur les correspondances, la finesse de description des différents points d'arrêt ou le tri des lignes qui ne sont pas prises en compte dans MODUS (Noctiliens, scolaires, à tarification particulière). Des corrections ont été nécessaires pour garantir une homogénéité des données GTFS. Les simplifications permettent d'alléger le réseau modélisé et simplifier l'analyse de résultats.

Plusieurs horizons d'offre de réseaux sont disponibles :

- 2012 pour la situation de calage du modèle : issu du GTFS de 2017, sur lequel une rétroaction à la main des projets mis en service entre 2012 et 2017 a été effectuée ;
- 2019, base pour les scénarios, directement issu du GTFS transformé ;
- 2030 pour les scénarios de projets, dans lequel les projets ont été codés à la main.

⁹ <https://data.iledefrance-mobilites.fr>

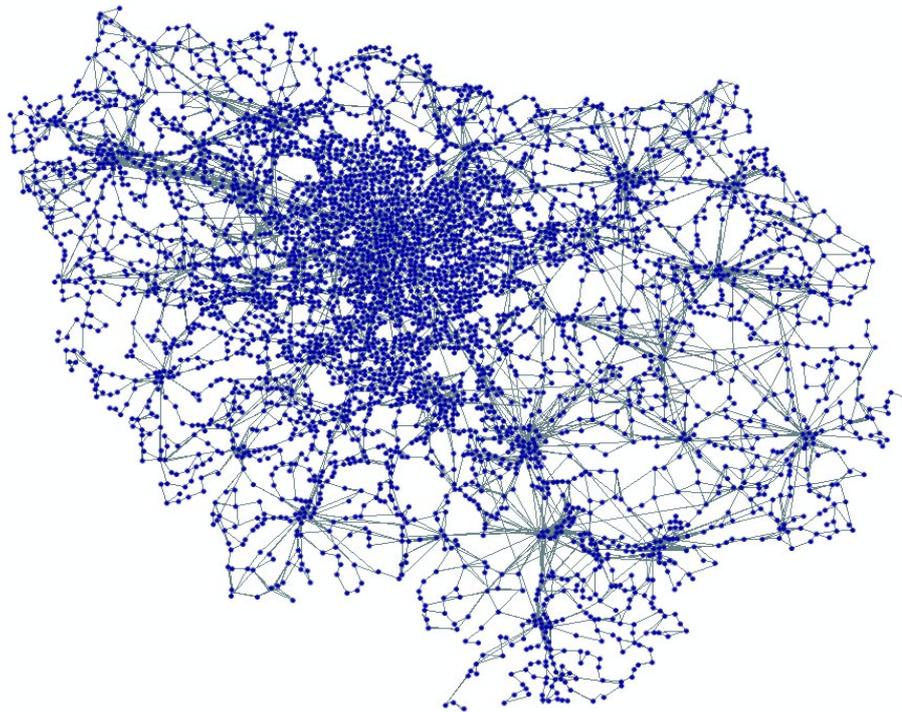


Figure 16 : aperçu du réseau GTFS sous Visum – Noeuds et tronçons

2.3.2 - Connecteurs modélisés au bâti

Comme pour le réseau VP, les connecteurs TC représentent les temps de parcours nécessaires entre le réseau de TC et le centroïde d'une zone. Afin de comprendre l'évolution de méthode entre les deux versions de MODUS, il faut brièvement rappeler l'ancienne méthode.

Pour MODUS 2.2 un nombre limité de connecteurs par zone et par système de transport était créé. Le temps sur connecteur était alors fonction de la distance à vol d'oiseau entre l'arrêt TC et le centroïde de zone connectée. Plus le connecteur est long, plus on considère que la vitesse de rabattement est élevée pour prendre en compte d'autres modes de déplacement, plus rapides que la marche.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle générerait des temps sur connecteurs sans autre lien avec le tissu urbain, les bassins de vie et/ou d'emploi de la zone, que la position du centroïde et des arrêts TC. De plus, l'exhaustivité de la connexion à toutes les lignes de TC accessibles depuis la zone n'était pas garantie.

Pour MODUS 3.1, une nouvelle méthodologie de création des connecteurs, se basant sur les travaux de Manout¹⁰ (2014, 2019), a été mise en œuvre.

¹⁰ Manout O. (2014). *Codification des connecteurs de zones pour les transports en commun*. Mémoire de Master Recherche Transports Espace Réseaux. Université Lyon 2, ENTPE. 122 p. ; Manout O. (2019). *Spatial aggregation issues in traffic assignment models*. Thèse de Doctorat, Université Lyon 2, LAET - Laboratoire Aménagement Économie Transports. 227 p.

La méthodologie développée s'appuie sur les données « bâtis » afin d'avoir une représentation fine du tissu urbain et sur l'Enquête Globale Transport 2010 (EGT) afin d'estimer l'attractivité d'un arrêt selon le type de transport qui y passe, sa distance par rapport à chaque bâtiment accessible et le nombre de population et d'emplois concerné. Pour cela, à partir de la base BDTopo 2017, des Fichiers Fonciers 2016, de la base carroyée de l'INSEE et du fichier SIRENE 2014, une table géolocalisée des bâtiments d'Île-de-France a été créée avec une estimation du nombre de population et d'emploi pour chaque bâtiment.

L'EGT fournit des éléments sur la distance d'attractivité (appelée zone de chalandise) des différents types de transport discrétisés sur trois macrozones : Paris, la petite couronne et la grande couronne. Elle permet de connaître ainsi la liste des lignes de TC accessibles par bâtiment. Les calculs se font ensuite sur chaque zone MODUS.

Au final, chaque arrêt du système de transport structurant se trouve ainsi pourvu d'un connecteur par zone MODUS accessibles, avec des temps sur connecteur identiques pour chaque arrêt d'une même ligne accessible d'une même zone. Pour les lignes de bus, les connecteurs sont reliés sur un seul arrêt par zone MODUS accessible.

Ensuite, il convient d'ajouter à ces connecteurs TC de proximité, représentant une accessibilité par la marche, des connecteurs de rabattements en véhicules pour la petite et grande couronne et des connecteurs spécifiques aux gares et aéroports pour les échanges avec l'extérieur à l'Île-de-France.

Une pénalité ad hoc due à la difficulté d'accès des gares en profondeur est ensuite rajoutée, le programme ne prenant en compte que des distances planes.

Les connecteurs étant exhaustifs pour chaque ligne accessible, on force les voyageurs à ne pouvoir prendre que les lignes TC disponibles à l'extrémité du connecteur, c'est-à-dire que faire une correspondance dès le début du voyage est impossible. Il s'agit d'une option dans la procédure d'affectation qui règle les effets de bords entre les différentes zones de chalandise des différents types de transport.

La prise en compte du tissu urbain pour un temps plus juste et l'exhaustivité de connectivité des lignes accessibles sont les deux principaux avantages de cette méthode.

Elle présente toutefois plusieurs limites, à savoir :

- la dépendance à la précision des bases « bâtiments », « emplois » et « arrêts TC » ;
- l'important volume de données à traiter ;
- le traitement distinct des rabattements longue distance.

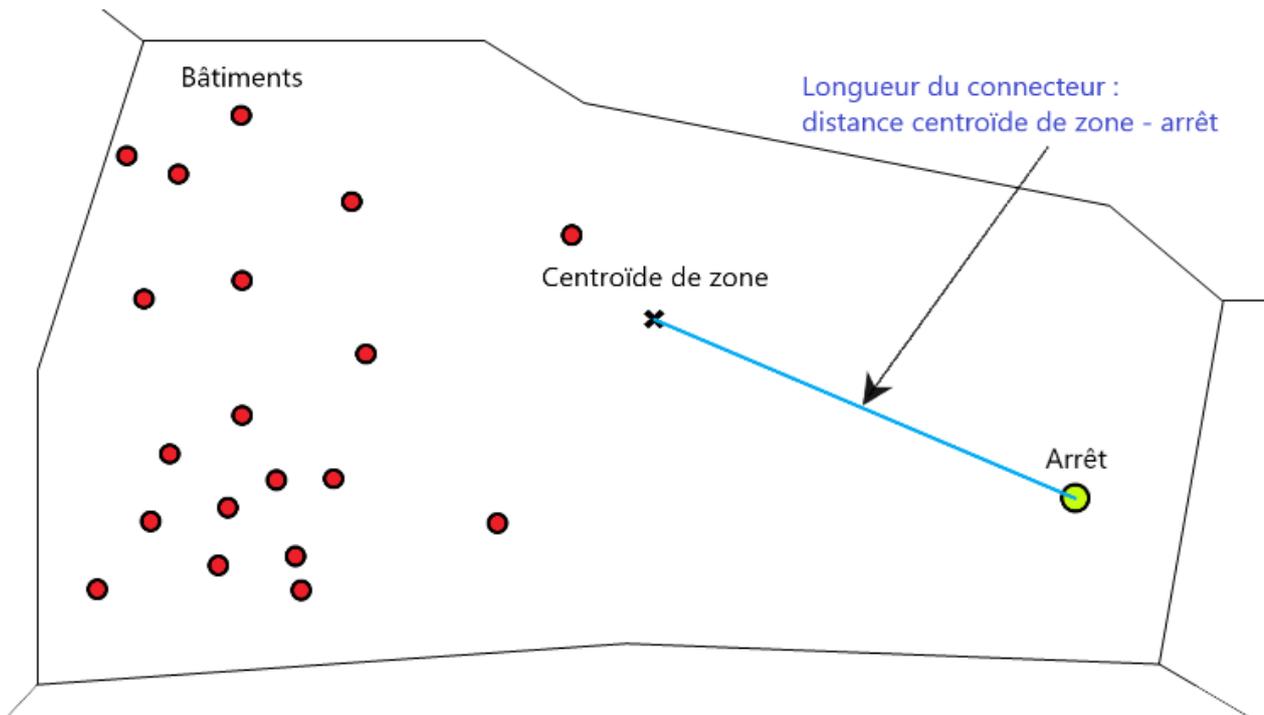


Figure 17 : ancienne méthode des connecteurs (MODUS 2)

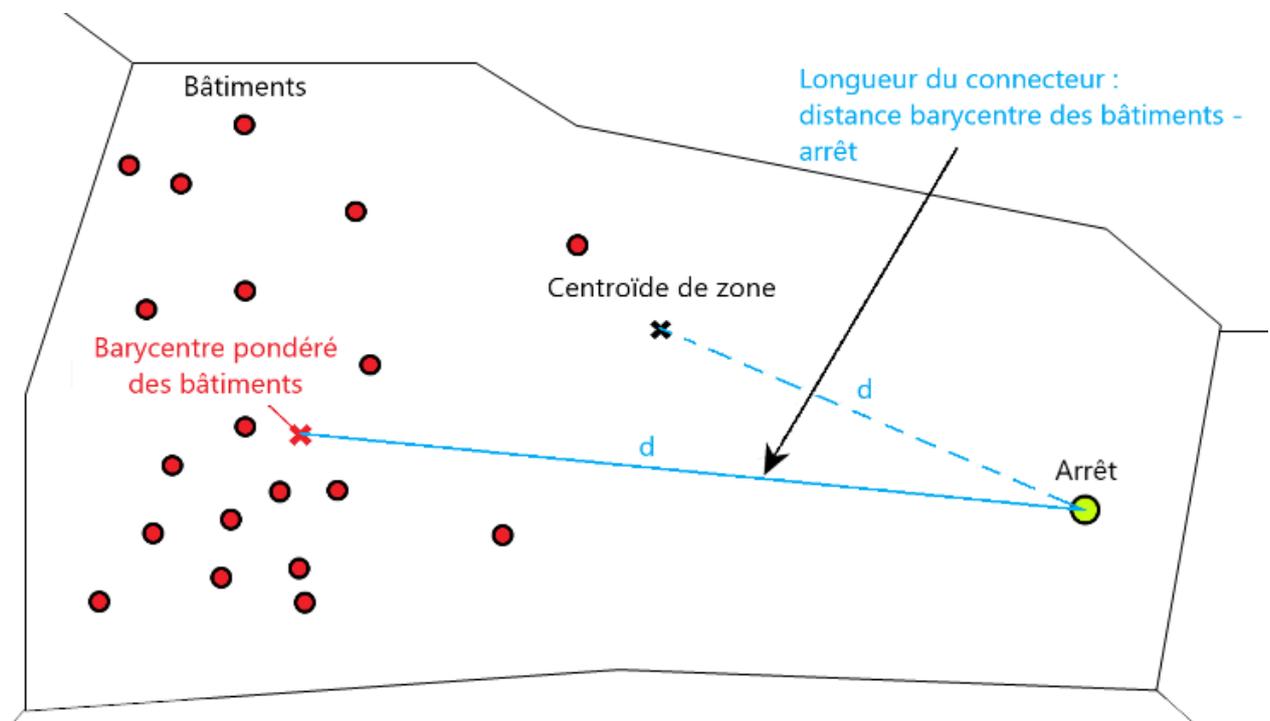


Figure 18 : nouvelle méthode des connecteurs (MODUS 3)

2.4 - Les demandes exogènes

La demande modélisée par MODUS 3.1 concerne la mobilité des franciliens. Néanmoins, de nombreux flux de déplacements provenant d'une demande extérieure à la région viennent occuper les réseaux de transport de manière simultanée aux flux générés par les résidents d'Île-de-France. Pour tenir compte de leur impact, tant sur la charge des réseaux, que sur ses répercussions en termes de choix modal, MODUS intègre des données de demandes complémentaires émanant d'autres enquêtes de mobilité.

Il s'agit des déplacements :

- de poids-lourds liés au transport routier de marchandises ;
- de véhicules entrant et sortant de la région par les principaux axes routiers ;
- d'usagers entrant et sortant de la région via les gares ferroviaires ;
- d'usagers en échange avec les plateformes aéroportuaires.

2.4.1 - Transport routier de marchandises

La méthode de modélisation du transport de marchandises a évolué : dans la version précédente, la demande était issue de la base SITRAM du SDeS. Cette base nationale découle d'enquêtes auprès des transporteurs routiers, redressées pour être pertinente à l'échelle des départements, une finesse insuffisante au regard du zonage de MODUS. Les tests effectués semblaient indiquer une sous-estimation des flux de PL.

Dans MODUS 3.1, le transport de marchandises a été modélisé à la journée avec le modèle de tournée FretUrb. Le principe de FretUrb¹¹ est de modéliser le transport de marchandises à partir des caractéristiques des entreprises. Des enquêtes réalisées sur de grandes agglomérations ont montré que certains ratios de mobilité restaient constants. Ainsi, il est possible de prévoir l'émission et l'attraction de l'entreprise en termes de flux de marchandises selon ses principales caractéristiques (type d'activité, secteur d'activité, effectif salarié...).

Pour la région Île-de-France, FretUrb a été appliqué à la base SIRENE 2009, redressée par la DRIEA-IF. La matrice journalière ainsi obtenue a été ramenée à la période de pointe grâce à des ratios moyens issus de comptages de la DIRIF. Seuls les déplacements de poids lourds ont été modélisés, la DRIEA-IF ne disposant pas de comptages routiers permettant de distinguer les VUL des autres véhicules légers. La demande PL a fait l'objet d'un calage en PPM et PPS sur base des comptages disponibles sur le réseau structurant.

2.4.2 - Cordons routiers

La modélisation du trafic d'échange et de transit pour la région Île-de-France est issue des enquêtes cordons conduites par la DRIEA-IF. Elles se sont déroulées entre 2013 et 2016 sur 20 postes situés sur le réseau routier structurant. Ces postes couvrent la quasi-totalité du trafic entrant et sortant d'Île-de-France.

Après redressement, ces enquêtes ont permis de constituer les matrices cordons routier en PPM et PPS pour les VL et les PL. Le calage de l'affectation routière sur les comptages internes à l'Île-de-France a permis de contrôler la qualité de ces matrices.

¹¹<http://freturb.laet.science/>

2.4.3 - Vecteurs gares

La demande voyageurs entrant et sortant au niveau des gares ferroviaires est estimée sur la base de l'enquête grandes gares parisiennes¹². On différencie la demande se rabattant et se diffusant dans la région en transports collectifs de celle empruntant des véhicules particuliers ou des taxis.

2.4.4 - Vecteurs aéroports

La demande routière échangée avec les plateformes autoroutières de Roissy et Orly est basée sur les résultats des modèles routiers de la société ADP.

La demande voyageurs TC pour les employés de la plateforme est déduite de la demande totale motorisée calculée par MODUS en échange avec les zones internes contenant les plateformes après soustraction de la demande routière issue du modèle d'ADP.

La demande voyageurs TC pour les passagers aériens est issue d'une estimation de la RATP dans le cadre de l'évaluation du Grand-Paris-Express réalisée en 2012.

¹² SNCF Gares & Connexions et le STIF, dans le cadre de l'OMNIL, 2015.

3 - Construction du scénario prospectif 2030

Pour élaborer un scénario prospectif, il convient de définir les hypothèses d'évolutions majeures qui gouvernent l'ensemble des données d'entrées du modèle. C'est l'objet de cette 3^e partie du rapport qui détaille les hypothèses propres au scénario 2030 dont les résultats sont présentés en partie 4. Il est à noter que ces hypothèses ont été définies fin 2019 début 2020 et n'intègrent donc pas les éventuels effets des crises sanitaires et économique faisant suite à la pandémie de Covid-19.

3.1 - Les scénarios socio-démographiques

3.1.1 - Modèle P+E 2025-2035

La DRIEA-IF s'associe à l'IPR pour produire annuellement des scénarios de projections de la population et de l'emploi en Ile-de-France à l'aide du modèle dit « P+E ».

Les objectifs de ce modèle sont :

- de proposer des scénarios de développement cohérents avec les dynamiques territoriales connues à court ou moyen terme et les intentions politiques affichées à plus long terme ;
- de permettre une vision partagée de ces dynamiques entre tous les acteurs institutionnels de la région ;
- d'anticiper les développements futurs sur la base de l'évolution programmée de l'accessibilité aux transports sur le territoire (notamment par la mise en service du Grand Paris Express).

La dernière mise à jour du modèle (hiver 2019-2020) a été employée comme référence pour la modélisation à l'horizon 2030.

Les hypothèses macroscopiques qui gouvernent ces scénarios sont les suivantes :

Horizon	2015	2025 bas ou tendanciel	2025 haut ou « Grand Paris »	2035 bas ou tendanciel	2035 haut ou « Grand Paris »
Population (en milliers)	12 082	12 681	12 797	13 095	13 504
<i>dont âgés de moins de 20 ans</i>	<i>25,7 %</i>	<i>25,4 %</i>	<i>25,6 %</i>	<i>24,4 %</i>	<i>24,8 %</i>
<i>dont âgés de 60 ans et plus</i>	<i>19,4 %</i>	<i>21,7 %</i>	<i>21,4 %</i>	<i>24,0 %</i>	<i>23,3 %</i>
Emploi (en milliers)	5 692	6 078	6 203	6 373	6 685
Actifs occupés (en milliers)	5 405	5 686	5 910	5 953	6 226
Chômeurs (en milliers)	785	688	678	639	593
Étudiants (en milliers)	666	671	685	695	725

La tendance est à la croissance de la population et de l'emploi et au recul du chômage dans un contexte de vieillissement de la population. Le scénario haut se distingue du scénario bas par une croissance plus forte et une population un peu plus jeune et active. Le scénario « bas » de P+E est calé sur un rythme annuel de construction de 50 000 logements tandis que le scénario « haut » est calé sur la Loi Grand Paris adoptée en 2010 qui fixe l'objectif de construire chaque année 70 000 logements.

3.1.2 - Scénario 2030 pour MODUS

Le scénario socio-démographique qui alimente le scénario MODUS 2030 est basé sur les résultats du scénario haut du modèle P+E. La méthode de projection consiste à appliquer, aux statistiques INSEE 2012 des zones MODUS, les coefficients d'évolution par catégorie de population ou d'emploi à l'échelle communale ou supra-communale en 3 étapes :

- redressement des données 2012 sur l'année 2015 référence du modèle P+E ;
- application des coefficients d'évolution 2015-2025 ;
- application de la moitié des coefficients d'évolution 2025-2035 sous l'hypothèse que l'année 2030 sera à mi-chemin des évolutions entre l'état 2025 et l'état 2035 du scénario P+E.

Les principaux coefficients utilisés sont les suivants :

- évolution de la population active (actifs occupés haute qualification et autres emplois) ;
- évolution de la population étudiante au lieu d'études (étudiants au lieu d'études) ;
- évolution de la population de moins de 20 ans (élèves du primaire et du secondaire) ;
- évolution de la population de plus de 60 ans (retraités) ;
- évolution de l'emploi (toutes catégories d'emploi) ;
- évolution de la surface des commerces (correction de l'emploi commercial).

Plusieurs redressements successifs permettent ensuite d'extrapoler le nombre de chômeurs, d'inactifs et de corriger les volumes d'étudiants au lieu de résidence, de places dans l'enseignement primaire et secondaire selon les statistiques préalablement mises à jour.

À l'échelle régionale, les hypothèses d'évolution des données socio-démographiques entre 2012 et 2030 se traduisent ainsi :

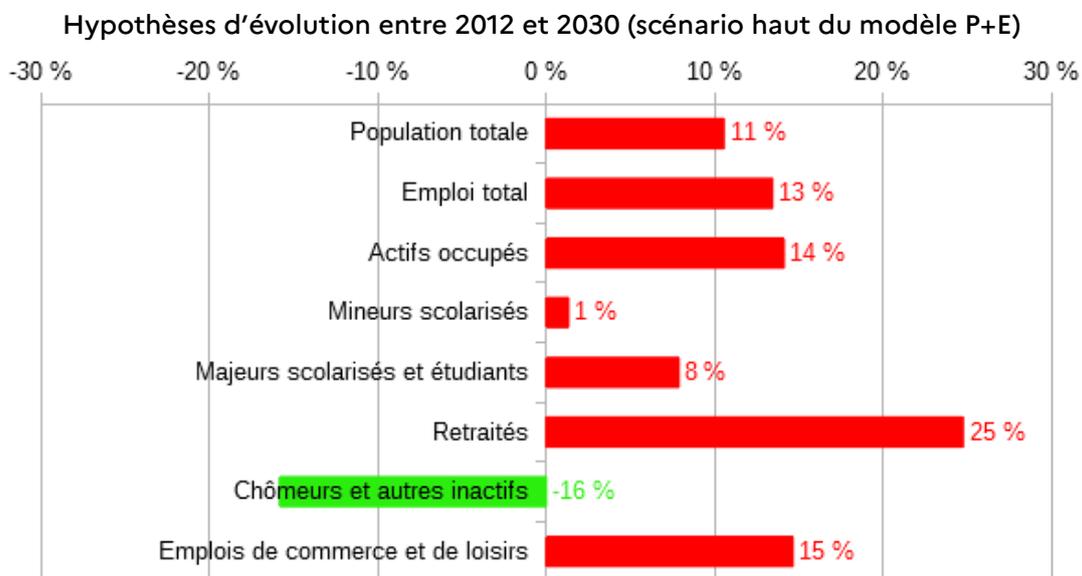


Figure 19 : évolutions relatives de l'occupation des sols à l'échelle régionale entre 2012 et 2030

Les cartes ci-dessous représentent les taux d'évolution de la population et de l'emploi sur le territoire, appliqués à l'échelle du zonage MODUS.

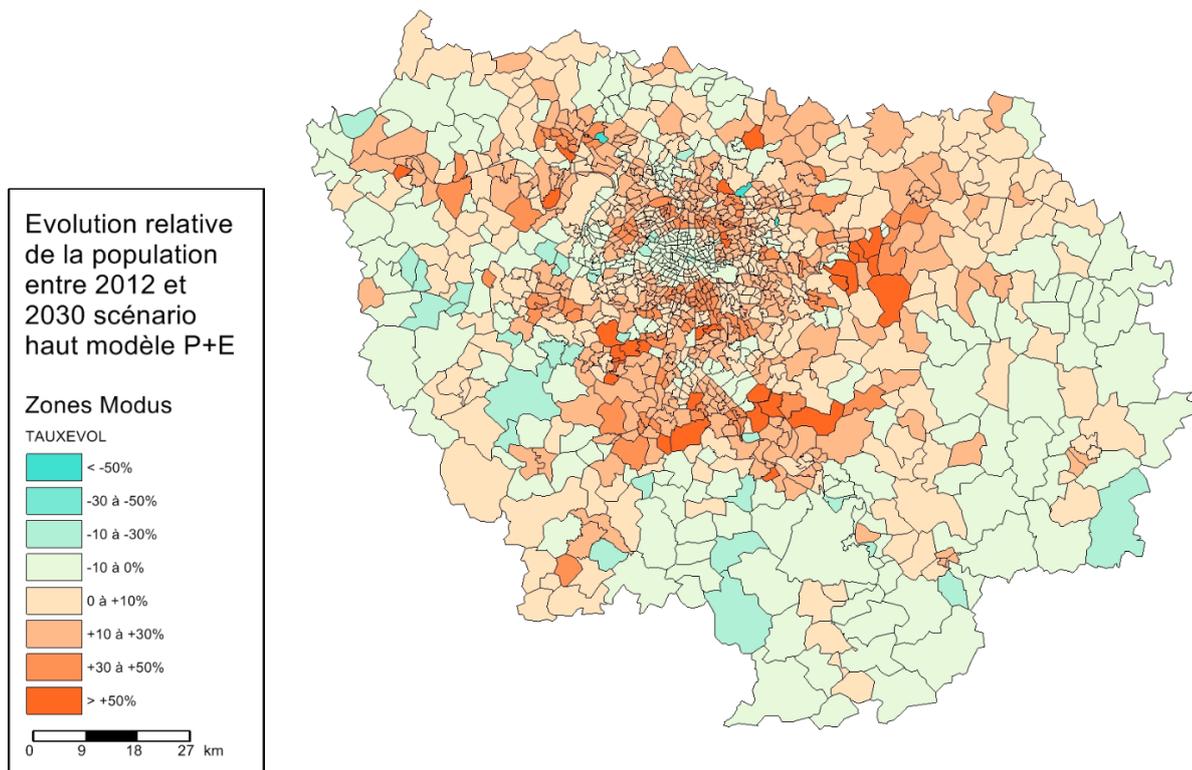


Figure 20 : carte d'évolution relative de la population entre 2012 et 2030 selon le zonage MODUS

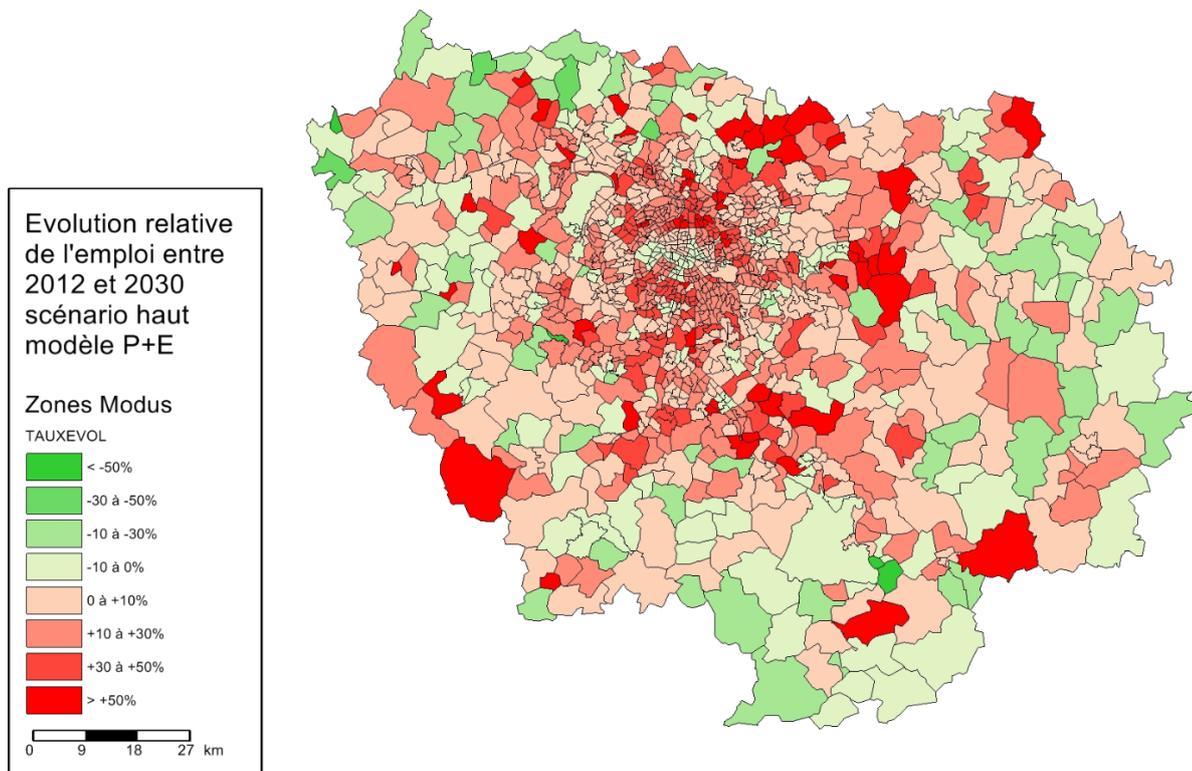


Figure 21 : carte d'évolution relative de l'emploi entre 2012 et 2030 selon le zonage MODUS

3.2 - Les scénarios d'offre de transport

L'intérêt premier de MODUS est de tester l'influence en termes de trafic de projets d'infrastructures. Avant de s'intéresser à l'étude d'un projet en particulier, il faut définir un cadre de référence de l'ensemble des projets susceptibles d'être mis en service à l'horizon considéré, aussi bien pour le réseau routier que TC. Les hypothèses de mise en service datent de fin 2019.

3.2.1 - Projets routiers en service à l'horizon 2030

La carte ci-dessous illustre les principaux projets routiers considérés comme mis en service à l'horizon 2030 pour cette simulation.

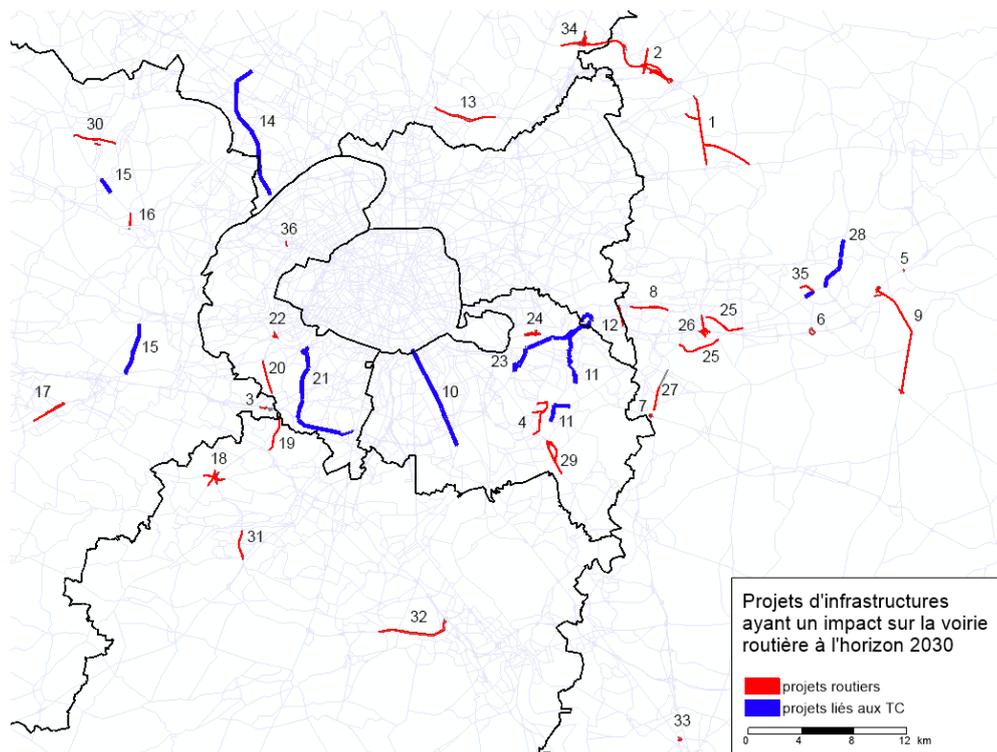


Figure 22 : carte des projets routiers pris en compte à l'horizon 2030

Le tableau suivant décrit succinctement ces projets en référence à la numérotation figurant sur la carte précédente. Il convient de rappeler que seuls les projets impactant significativement les routes modélisées dans le réseau VP font l'objet d'un codage spécifique. De nombreux projets locaux sans incidence à l'échelle régionale à laquelle sont analysés les résultats de simulation ne sont donc pas intégrés à cette liste.

Tableau des projets routiers à l'horizon 2030

N°	Axe	Nom du projet	Description
1	RD212	Doublement de la RD212	Mise à 2x2 voies de la RD212 entre Claye-Souilly et Compans
2	RD212/RD401	Déviation Est Le Mesnil-Amelot liaison RD212/RD401	Création d'une nouvelle voie reliant la RD212 à la RD401
3	A86/RN118	Échangeur A86-RN118 Vélizy	Création d'un nouvel accès à la ZAI de Vélizy-Villacoublay depuis l'A86
4	RN406	Desserte du port de Bonneuil-sur-Marne	RN406, création de 2 km de voies pour mieux desservir le port de Bonneuil-sur-Marne
5	A4/RD934	Échangeur A4/RD934	Complément échangeur A4/RD934
6	Nouvelle route	Échangeur Jossigny	Nouvel échangeur Jossigny
7	RN104/RN4	Échangeur RN104/RN4	Complément échangeur RN104/RN4
8	RD199	Carrefours RD199	Réaménagement carrefours RD199
9	RN36	RN36	Réaménagement RN36
10	RD5	T9	Tramway 9 reliant la porte de Choisy à Orly en remplacement de la ligne de bus 183
11	RD233/RD10	TCSP Altival	Création d'un TCSP pour faciliter les liaisons entre le nord et le sud de la Communauté d'agglomération du Haut Val-de-Marne
12	RD370	Noisy-Champs RD370	Réaménagement ZAC Noisy-Champs RD370
13	RN17 D301-D84 D170-D301	Boulevard Intercommunal du Parisis	BIP de la RD84 à la RN17, BIP Section Est de la RD301 à la RD84, BIP Section Ouest de la RD170 à la RD301
14	RD392	TCSP Bezons-Herblay	TCSP
15	RD190	T13	Tramway 13 reliant Saint-Germain en Laye à Saint-Cyr
16	RN13/RN184	RN13/RN184. Aménagement du carrefour du Bel-air et de la RN184 à St Germain-en-Laye	Création d'un giratoire et élargissement de la rue Albert-Priolet (RN184) Passage de 3 à 4 voies dans sa section entre le carrefour du Bel-Air et la gare de la Grande Ceinture
17	RN10	Requalification de la RN10 à Trappes	Dénivellation de la RN10
18	RN118/RD36	RN118/RD36. Réaménagement du Christ de Saclay	Mise à 2x2 voies de la RD36 entre la RN118 et le poste EDF et passage sous le giratoire pour les véhicules de moins de 3,8 mètres
19	RN118	RN118 voie dédiée	Création d'une voie dédiée le long de la forêt de Verrières, circulation sur BAU sans impact sur la circulation VP

20	RN118	RN118 voie dédiée	Création d'une voie dédiée le long de la forêt de Meudon dans le sens province => Paris et au droit de Meudon-la-Forêt dans le sens Paris => province, circulation sur BAU sans impact sur la circulation VP
21	RN186	T10	Tramway 10 reliant Clamart à Antony
22	RN118/RD7/RD910	Echangeur de la manufacture (pont de Sèvre- RD7-RD910- RN118)	Réaménagement complet de l'échangeur du pont de Sèvres actuel en un échangeur urbain
23	RD3A/RD3/RD330	TCSP Est-TVM	TCSP
24	A86/A4	Aménagement du pont de Nogent-sur-Marne	Création d'une bretelle A86 nord => A4 Création d'un rond-point sur la bretelle de sortie de l'A4 Création d'un pont permettant de rejoindre l'A4 vers Paris
25	A4/A104/RD471	Collégien-aménagement	Création de voies
26	A4/A104/RD471	A4/A104/RD471. Traitement du nœud de Collégien (déviations de Collégien)	Création d'une nouvelle voie
27	A104	Élargissement A104 entre RN4 et A4	Élargissement du tronçon de la Francilienne compris entre l'A4 et la RN4, en passant de deux à trois voies dans les deux sens de circulation
28	D5d	TCSP Esbly-Chessy	Amélioration de la desserte interne de Marne-La-Vallée
29	RN19	Déviations de la RN19 à Boissy-Saint-Léger	Déviations à 2x2 voies depuis l'échangeur avec la RN406 à Bonneuil-sur-Marne, jusqu'au carrefour avec la RD94E à Villecresnes
30	RD30/RD190	Liaison RD30-RD190 Pont à Achères Boucle de chanteloup	Projet de liaison RD190-RD30 avec la création d'un nouveau pont sur la Seine à Achères
31	RN118	RN118 Requalification de la desserte de la ZAI de Courtabeuf _ring des Ulis	Suppression des deux bretelles d'accès intérieures du « ring » pour supprimer les échanges avec la N 118. Création de bretelles d'accès directs à l'échangeur de Mondétour, depuis la RN 118, dans les deux sens de circulation
32	RN104	RN104 voie dédiée	Création d'une voie dédiée a priori sans restreindre la capacité de la section courante de Sainte-Geneviève-des-Bois à Courcouronnes
33	RD306	RD306 à Melun	Élargissement de la RD 306, création d'un carrefour à feux au nord de Melun
34	A1/RN104	Contournement Est de Roissy	Échangeur A1-RN104
35	Cours du Danube	Prolongement rue de Rome à Chessy	Amélioration de la desserte interne de Marne-La-Vallée
36	RD933	Tour Hekla	Construction de le tour Hekla à La Défense

3.2.2 - Projets TC en service à l'horizon 2030

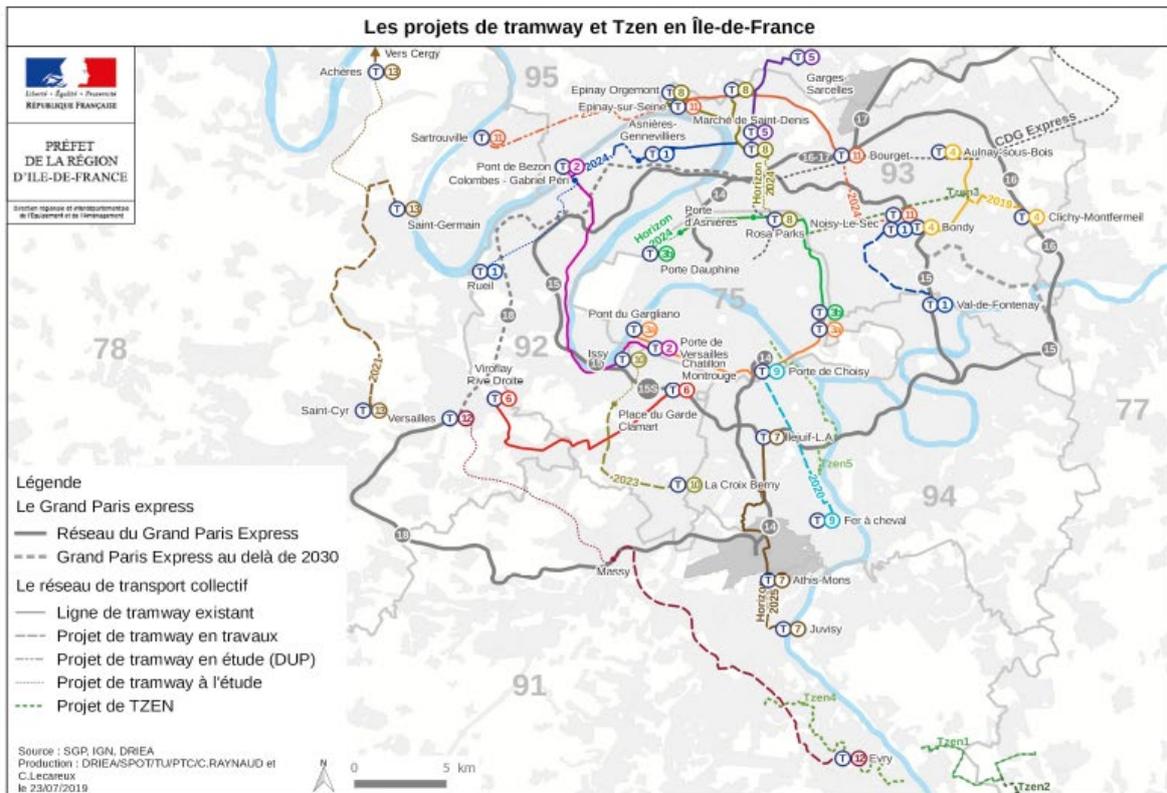
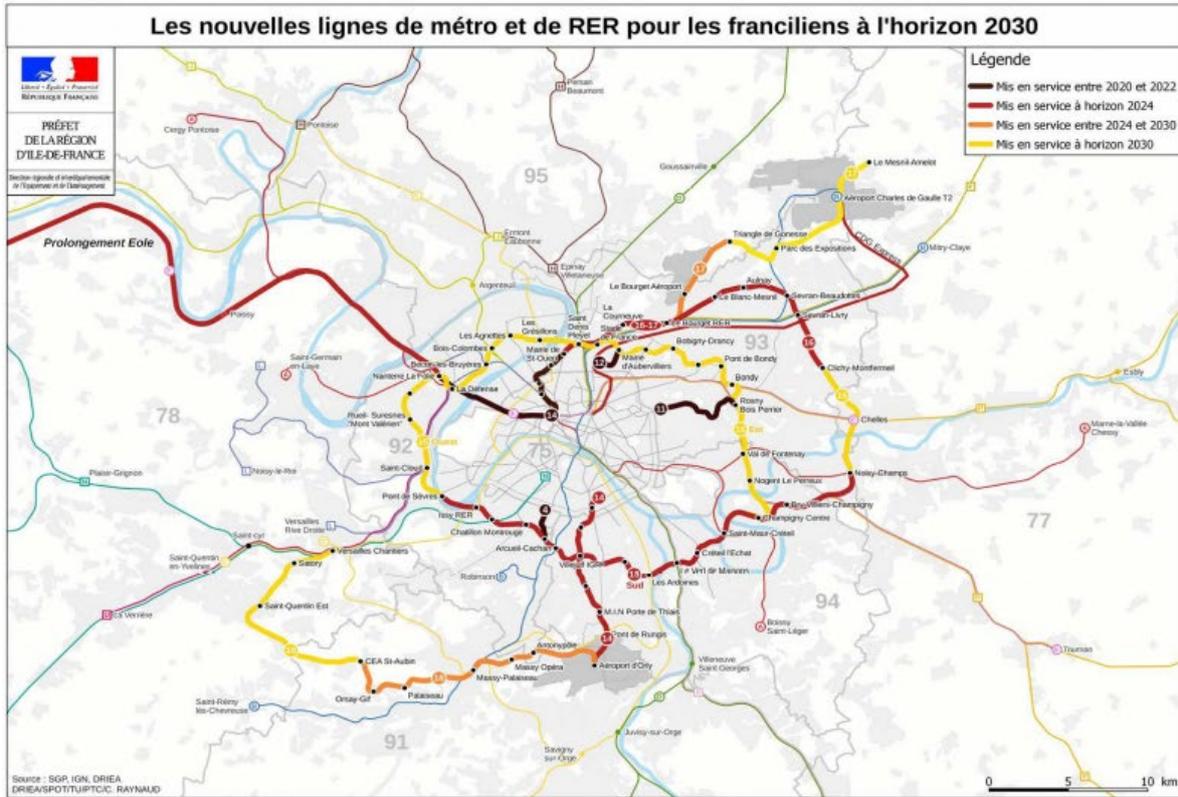


Figure 23 : cartes des projets TC en région Île-de-France

Compte tenu de l'importance stratégique des transports collectifs, MODUS 3.1 prend en compte les projets mis en service en 2030, généralement ceux du Grand Paris des transports.

Dès lors, la nouvelle version de MODUS intègre de nombreux projets, tels que tramways, bus à haut niveau de service (BHNS) et création ou prolongement de lignes de métros existants. Le réseau de bus est considéré constant, mis à part les quelques projets de BHNS. Le Grand Paris des bus mis en service en avril 2019 fait également partie du socle de lignes.

Les métros

Nom de ligne	Travaux
Métro 1	Prolongement vers l'est, Val-de-Fontenay
Métro 4	Prolongement vers le sud, Bagneux
Métro 10	Prolongement vers le sud-est, Ivry
Métro 11	Prolongement vers l'est, Rosny-Bois-Perrier
Métro 12	Prolongement vers le nord, Mairie d'Aubervilliers
Métro 14	Prolongement vers le nord, Saint-Denis Pleyel

Le Grand Paris Express

Nom de ligne	Travaux
Métro 14	Prolongement vers le sud, Aéroport d'Orly
Métro 15	Création d'une ligne en rocade
Métro 16	Création d'une ligne entre la Seine-Saint-Denis et Noisy-Champs en Seine-et-Marne
Métro 17	Création d'une ligne au nord-est, vers l'Aéroport Roissy-CDG
Métro 18	Création d'une ligne au sud-ouest, centrée sur le plateau de Saclay

RER et Transilien

Nom de ligne	Travaux
RER et Transilien	Sélection de projets dans les schémas directeurs, schémas de secteurs et interconnexions avec le GPE
RER E	Prolongement d'EOLE vers l'ouest, Mantes la Jolie
Roissy-Picardie	Création d'un accès ferroviaire direct entre la Picardie, le Nord-Est du Val-d'Oise et la gare de Roissy TGV

Les Tramways

Nom de ligne	Travaux
T1	Prolongement vers l'est, Val-de-Fontenay et à l'ouest, Rueil-Malmaison
T3b	Prolongement vers l'ouest, Porte-Dauphine
T4	Prolongement vers l'est, Hôpital de Montfermeil
T7	Prolongement vers le sud, Juvisy
T9	Création d'une ligne au sud-est, Orly-Ville
T10	Création d'une ligne au sud-ouest, Clamart
T11Express	Création d'une ligne au nord, Sartrouville
T12Express	Création d'une ligne au sud, Massy
T13Express	Création d'une ligne au sud-est, Saint-Cyr-l'École

Les BHNS Tzen

Nom de ligne	Travaux
Tzen 2	Création d'une ligne au sud-est, Melun
Tzen 3	Création d'une ligne à l'est, Gargan
Tzen 4	Création d'une ligne au sud, Corbeil-Essonnes
Tzen 5	Création d'une ligne au sud-est, Choisy-le-Roi
Tzen du Mantois	Création d'une ligne entre l'écoquartier Mantes-Rosny et la gare de Mantes-la-Jolie

Les TCSP – Bus en site propre

Nom de ligne	Travaux
Altival	Création d'une ligne en site propre
Entre Seine	Création d'une ligne en site propre
Massy-Arpajon	Création d'une ligne en site propre
Est-TVM	Création d'une ligne en site propre
Plateau de Saclay	Création d'une ligne en site propre
Sénia Orly	Création d'une ligne en site propre
Esbly-Chessy	Création d'une ligne en site propre

Transport par câble

Nom de ligne	Travaux
Câble A Téléal	Création d'une liaison entre Villeneuve-Saint-Georges et Créteil

3.3 - Les scénarios de politique transport

Les infrastructures d'offre de transport ne sont pas les seules à pouvoir affecter la mobilité du futur. Une politique de transports sur la qualité de service peut aussi être incorporée dans les scénarios.

3.3.1 - Abaissement des vitesses (BP et 80 km/h)

L'abaissement des vitesses limites autorisées sur la route est une mesure politique qui répond généralement à des enjeux de sécurité routière, de réduction des nuisances sonores et d'émissions de polluants et parfois de fluidification du trafic. En Île-de-France, 3 mesures sont significatives :

- le passage à 70 km/h sur le boulevard périphérique ;
- le passage à 80 km/h sur les routes bidirectionnelles ;
- la mesure dynamique de réduction des vitesses en cas de pic de pollution.

MODUS ayant vocation à représenter un jour moyen, la notion de pic de pollution est hors cadre du modèle, ainsi les abaissements dynamiques de vitesse ne sont pas intégrés aux simulations.

3.3.2 - Tarification des TC (GPE, zonage RATP)

En situation de scénario, comme pour la situation de calage du modèle en 2012, la tarification des TC n'est prise en compte que dans l'étape du choix modal. La matrice interzonale des coûts TC est mise à jour avec les différents scénarios d'offre de référence de la DRIEA-IF : 2012 et 2030 avec et sans le GPE. Seul le choix de l'itinéraire le plus efficace et le poids des déplacements Domicile-Travail est changé.

Le Grand Paris Express est considéré comme un métro, accessible via un ticket t+¹³.

Les coûts des abonnements et des billets origine destination ne sont pas actualisés. Cette hypothèse n'est pas tellement pénalisante, car les coûts de son concurrent direct, la voiture, ne sont pas actualisés non plus : on ne favorise pas artificiellement un mode par rapport à l'autre et on simule seulement l'effet de l'évolution des P+E et des d'infrastructures.

Le dézonage du pass Navigo n'est pas pris en compte, pour deux raisons principales :

- MODUS n'intègre pas de modèle d'abonnement, une variation de ce paramètre ne serait pas très pertinente ;
- le modèle a été défini sur la base « d'équations de mobilité » prenant en compte la tarification de 2012. Ce comportement étant projeté tel quel dans le futur.

3.3.3 - Stationnement et offre Vélib

Ces deux paramètres sont gardés constants par rapport à la situation actuelle (2012).

3.4 - Les scénarios de demande exogène

3.4.1 - Transport de marchandises

Un modèle gravitaire a été créé pour projeter la matrice de demande PL. L'estimation des paramètres de ce modèle a été réalisée à partir de régressions linéaires par la méthode des moindres carrés sur différentes variables issues des données d'entrée à notre disposition.

Cette méthode simplifiée permet de réaliser une projection à horizon 2030 des déplacements issues du calage initial de la matrice PL sur chaque OD en fonction de l'évolution des emplois, de la population et des surfaces bâties. En effet, les données d'entrées nécessaires à alimenter le modèle FretUrb pour simuler un horizon 2030, en particulier une base de données détaillée des entreprises à cet horizon, dépasse de loin la finesse atteignable dans l'exercice de prospective 2030.

3.4.2 - Cordons routiers

Des projections ont été réalisées en se basant sur les prédictions de croissance de trafic issues de la nouvelle version des fiches-outils de la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) relatives à *l'évaluation socio-économique des projets de transports*. Ces hypothèses sont :

- croissance annuelle de 1.1% de la circulation des voyageurs ;
- croissance annuelle de 0.4 % de la circulation des marchandises.

La croissance totale est modulée par zone MODUS suivant l'évolution de l'emploi en 2030.

Pour calculer les cordons routiers à horizon 2030, on applique ces hypothèses de croissance pour toutes les matrices cordons en situation actuelle, à savoir les VP, TC et les PL. Ces valeurs sont facilement modifiables si les hypothèses économiques venaient à changer, grâce à un paramétrage de l'outil dédié.

¹³ Cette hypothèse n'engage en rien la tarification future du GPE.

3.4.3 - Vecteurs gares

Les hypothèses retenues sont issues des rapports du CGEDD et de la DGEC¹⁴.

Les hypothèses retenues sont une croissance pour le ferroviaire de 1,7 % par an correspondant à une élasticité au PIB de 1.33. Ces taux de croissance sont appliqués aux vecteurs gares en situation actuelle.

Ces valeurs sont facilement modifiables si les hypothèses économiques venaient à changer, grâce à un paramétrage dans un outil dédié. Cet outil permet également de différencier la croissance du trafic selon les gares parisiennes.

3.4.4 - Vecteurs aéroports

Les hypothèses retenues sont celles du *Contrat de régulation économique 2016-2020* signé par l'État et Aéroport de Paris.

Les hypothèses retenues sont :

- une croissance annuelle du trafic de 2,6 % correspondant à une élasticité au PIB de 1.73 pour Roissy-CDG ;
- une croissance annuelle du trafic de 2 % correspondant à une élasticité au PIB de 1.33 pour Orly.

Ces valeurs sont facilement modifiables si les hypothèses économiques venaient à changer, grâce à un paramétrage dans un outil dédié.

En outre, à titre de contrôle, la demande est redressée sur l'évolution de l'emploi et des volumes annuels de passagers considérés sur chaque plateforme aéroportuaire entre l'horizon de calage et l'horizon d'étude.

¹⁴ Pochez R., Wagner N., Cabenne I., 2016. Projections de la demande de transport à long terme. Rapport du CGDD, 170 p. ; Rapport de la DGEC, 2019. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. 47 p.

4 - Les résultats du scénario 2030 avec GPE

4.1 - Indicateurs régionaux agrégés

4.1.1 - Nombre de déplacements totaux et par mode et leur évolution

À l'échelle de la région, les déplacements des franciliens évoluent globalement à la hausse du fait de la croissance de la population et de l'emploi. Néanmoins, du fait des hypothèses socio-démographiques présentées précédemment les motifs de déplacement associés aux mineurs (accompagnement et scolarité) évoluent moins que ceux des actifs, des étudiants et des retraités.

Évolution des flux de déplacements en Île-de-France entre 2012 et 2030 en période de pointe du matin et du soir avec MODUS 3.1

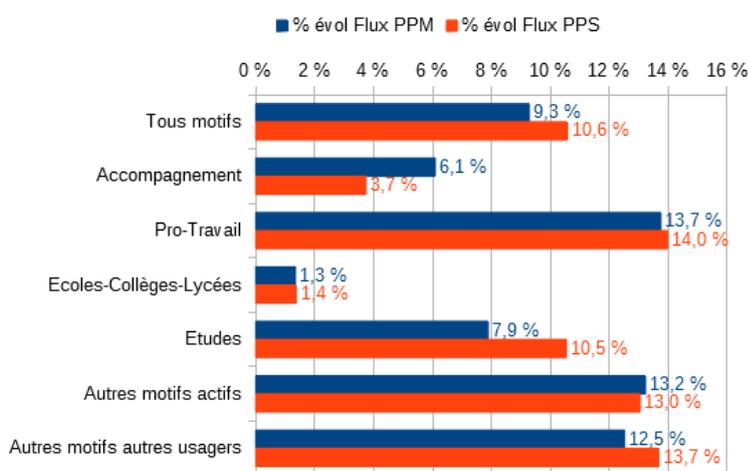


Figure 24 : évolution relative des déplacements entre 2012 et 2030

Cela impacte directement l'évolution des volumes de déplacements propres à chaque mode de transport : en effet, le GPE vient concurrencer la voiture pour les trajets de longue distance, c'est-à-dire ceux des actifs et des étudiants.

4.1.2 - Parts modales et leur évolution

En comparant les portées et temps moyens de déplacements propres à chaque mode en 2012 et en 2030, on observe que les franciliens se déplacent plus loin et plus longtemps, un phénomène particulièrement porté par le développement de l'offre de transports collectifs. Le constat est valable aussi bien en période de pointe du matin que du soir.

Tableaux des d'évolution des portées, temps et vitesse moyenne entre 2012 et 2030

Modes	Portée moyenne 2012 6h-10h	Portée moyenne 2030 6h-10h	Temps moyen 2012 6h-10h	Temps moyen 2030 6h-10h	Vitesse moyenne 2012 6h-10h	Vitesse moyenne 2030 6h-10h	Evolution portée 2012 - 2030 6h-10h	Evolution temps 2012 - 2030 6h-10h	Evolution vitesse 2012 - 2030 6h-10h
Tous modes confondus	6,58	6,97	22,18	23,02	17,81	18,17	+5,85 %	+3,78 %	+1,99 %
Transports collectifs	11,27	12,15	38,72	39,13	17,46	18,62	+7,82 %	+1,07 %	+6,68 %
Véhicules particuliers	7,64	7,40	15,34	15,72	29,90	28,25	-3,15 %	+2,52 %	-5,52 %
Marche, trottinette et rollers	0,75	0,75	14,70	14,68	3,08	3,08	-0,14 %	-0,14 %	-0,00 %
Vélos et Velibs	2,32	2,31	12,05	11,99	11,54	11,54	-0,56 %	-0,56 %	-0,00 %

Modes	Portée moyenne 2012 16h-20h	Portée moyenne 2030 16h-20h	Temps moyen 2012 16h-20h	Temps moyen 2030 16h-20h	Vitesse moyenne 2012 16h-20h	Vitesse moyenne 2030 16h-20h	Evolution portée 2012 - 2030 16h-20h	Evolution temps 2012 - 2030 16h-20h	Evolution vitesse 2012 - 2030 16h-20h
Tous modes confondus	4,66	4,97	18,07	18,98	15,48	15,71	+6,57 %	+5,00 %	+1,50 %
Transports collectifs	8,79	9,63	33,96	34,91	15,52	16,55	+9,62 %	+2,79 %	+6,65 %
Véhicules particuliers	6,14	5,85	14,75	14,60	24,96	24,06	-4,62 %	-1,05 %	-3,61 %
Marche, trottinette et rollers	0,75	0,75	14,64	14,56	3,08	3,08	-0,54 %	-0,54 %	-0,00 %
Vélos et Velibs	2,27	2,24	11,79	11,66	11,54	11,54	-1,07 %	-1,07 %	-0,00 %

En termes de parts modales, les transports collectifs prennent le pas sur les 3 autres modes de déplacements :

En période de pointe du matin, la part des TC gagne 2,4 points en nombre de déplacements, 5 points en portées cumulées et 2,6 points en temps de parcours cumulés.

La part des VP diminue de 0,9 point en nombre et en temps et de 4,7 points en portée.

Les modes actifs (modes doux et cycles) reculent de 1,5 point en nombre, 0,3 point en portées cumulées et 1,8 point en temps de parcours cumulés.

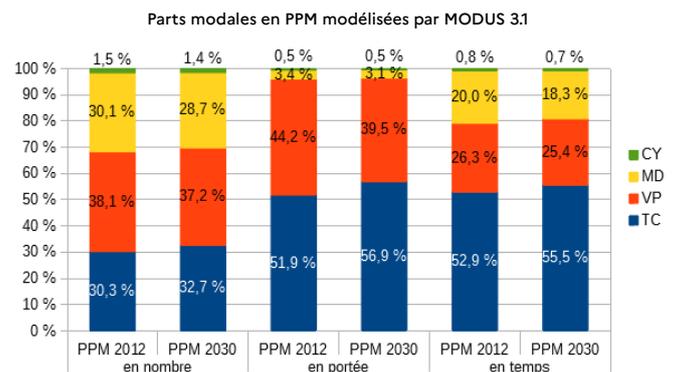


Figure 25 : évolution des parts modales entre 2012 et 2030

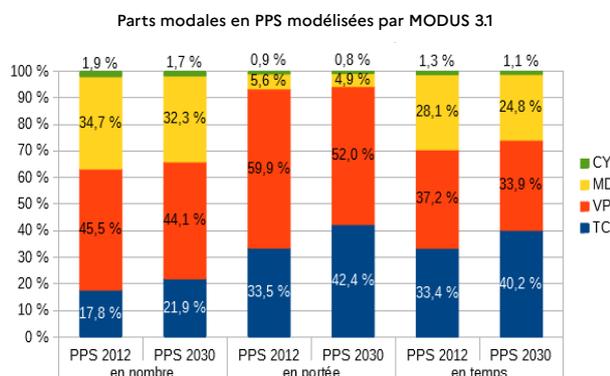


Figure 26 : évolution des parts modales entre 2012 et 2030

En période de pointe du soir, la part des TC gagne 4,1 points en nombre de déplacements, 8,9 points en portées cumulées et 6,8 points en temps de parcours cumulés.

La part des VP diminue de 1,4 point en nombre, 7,9 points en portées cumulées et 3,3 points en temps de parcours cumulés.

Les modes actifs (modes doux et cycles) reculent de 2,6 points en nombre, 0,8 point en portées cumulées et 3,3 points en temps de parcours cumulés.

L'évolution est contrastée sur le territoire du fait du vieillissement de la population favorable à l'usage de la voiture, en contre-poids d'un report modal important sur les TC autour des nouvelles gares du GPE. La carte suivante illustre l'évolution 2012-2030 de la part modale des TC pour les déplacements motorisés à destination des zones MODUS du cœur de l'agglomération parisienne.

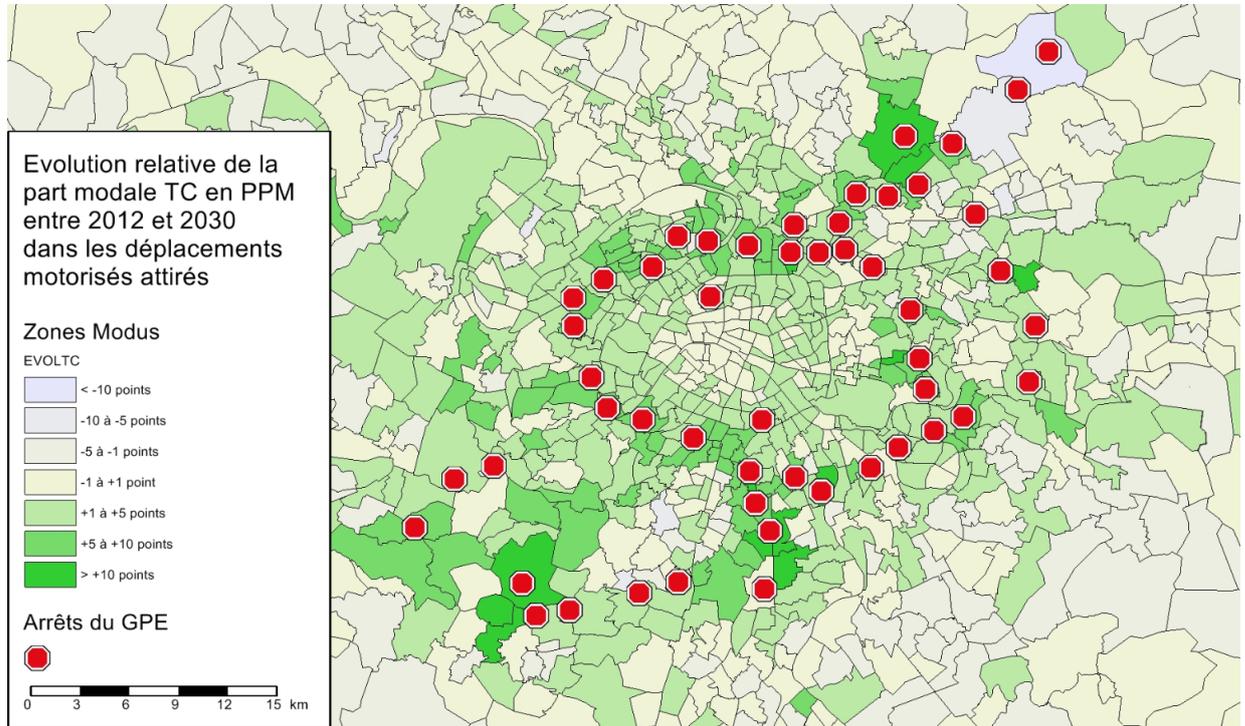


Figure 27 : carte d'évolution des parts modales TC pour les déplacements motorisés entre 2012 et 2030

Si on isole l'effet du GPE sur la part modale TC en 2030, on obtient la carte suivante qui dessine nettement les contours de la zone de desserte du GPE.

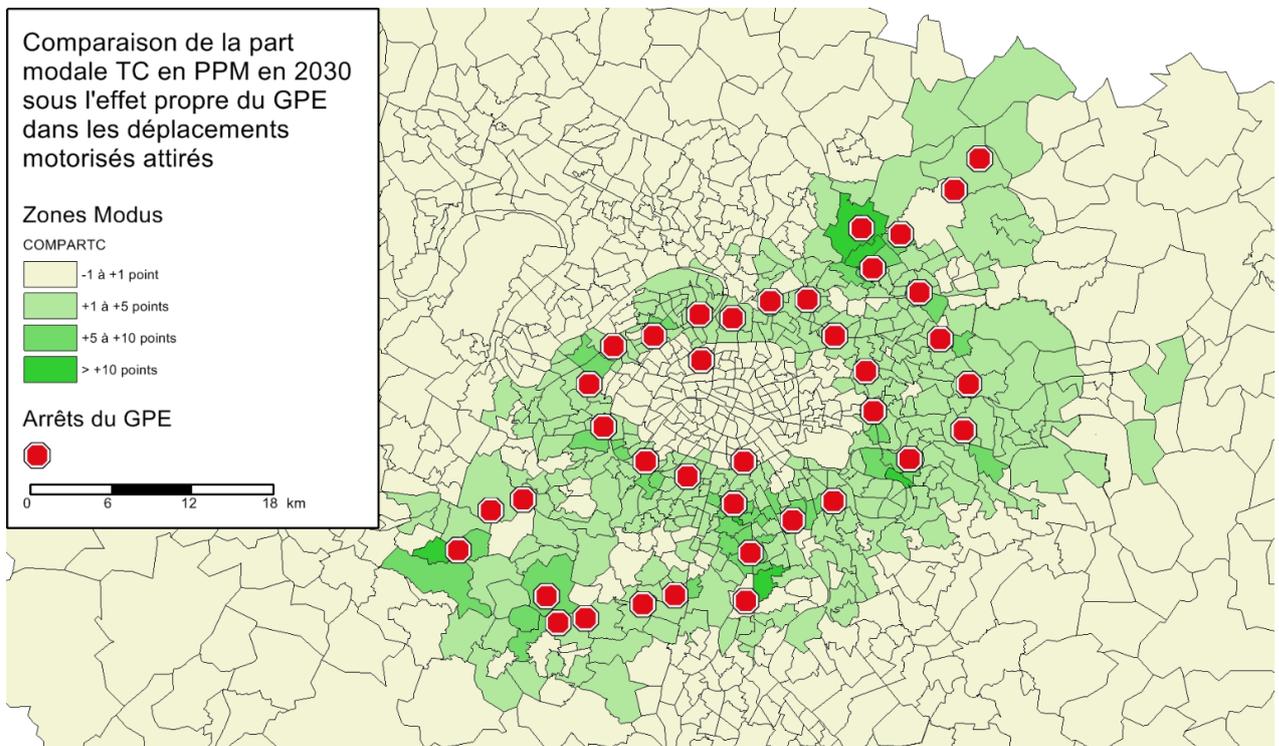


Figure 28 : carte d'évolution des parts modales TC pour les déplacements motorisés en 2030 sous l'effet du GPE

4.2 - Les Matrices

4.2.1 - Demande zonale par mode

Les matrices de voyageurs et de véhicules utilisées pour charger les réseaux TC et TI de MODUS présentent les évolutions suivantes entre 2012 et 2030 :

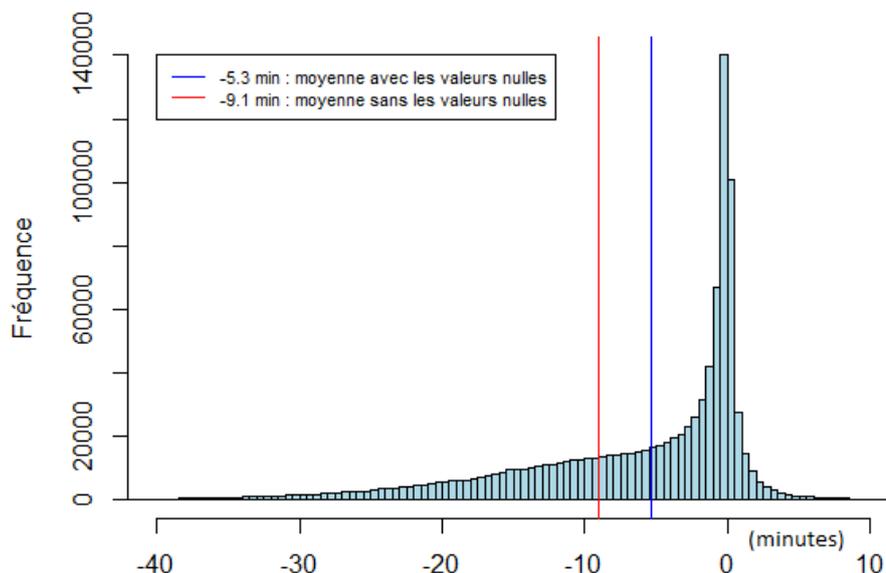
Demande moyenne horaire	2012	2030	Evolution Globale	Evolution Annuelle
TC – PPM (voy/h)	685 383	806 751	17,70 %	0,91 %
TC – PPS (voy/h)	866 534	1 154 222	33,20 %	1,61 %
TI – PPM (UVP/h)	651 271	732 145	12,42 %	0,65 %
TI – PPS (UVP/h)	1 045 272	1 169 555	11,89 %	0,63 %

Du fait de la mise en service du GPE, la demande sur les TC augmente plus rapidement que celle sur les transports individuels. Ces matrices sont obtenues après intégration des demandes externes (cordons routiers, vecteurs gares et aéroports) et report de calage.

4.2.2 - Temps et leurs composantes

Les matrices de temps font partie des premiers indicateurs agrégés à analyser. Leurs évolutions entre différents scénarios donnent une première idée de l'impact du projet testé. Néanmoins, une analyse détaillée pour chacune des relations « origine – destination » (soit plus de 1,7 millions) est trop chronophage. L'évolution des temps totaux est d'abord étudiée puis, au besoin, ses composantes avec le temps de rabattement ou le temps d'attente.

Histogramme des différences des temps totaux par OD



999590 valeurs nulles non prises en comptes pour 1,7 millions d'observations

Figure 29 : impact de la mise en service du GPE : différence des temps totaux **en minutes** de déplacement par OD entre le scénario 2030 avec GPE et sans GPE.

L'étude de l'histogramme ci-avant montre que le GPE permet un gain de temps de parcours pour de nombreux couples Origine-Destination. Environ 60 % des zones MODUS sont impactées par le GPE. Le gain de temps moyen est de 5,3 minutes (non pondéré par la demande sur l'OD). Dans de rares cas, le temps économisé peut dépasser 30 minutes.

On peut voir sur l'histogramme un allongement des temps de parcours sur certaines OD. Une limite est à intégrer dans l'analyse de cet indicateur, car les temps totaux sont issus de moyennes des temps des différents itinéraires empruntés. Si le projet rajoute un itinéraire avec un temps supérieur à la moyenne des temps de la référence, alors la nouvelle moyenne de temps intégrant ce nouvel itinéraire peut être plus longue que la moyenne de temps initiale. L'indicateur devient donc négatif alors que l'offre est meilleure car plus fournie. Il s'agit d'un problème classique des modèles. Cet indicateur ne permet donc d'avoir qu'une première idée seulement de l'impact d'un projet.

4.3 - Cartes de charges VP

4.3.1 - Charge du réseau routier

L'affectation de la demande routière VP et PL sur le réseau permet de représenter ce réseau en situation de charge. Il est possible d'extraire quelques statistiques agrégées par type de réseau pour qualifier globalement la circulation, en cumulant les kilomètres parcourus par chaque véhicule se déplaçant sur le réseau et le temps passé pendant la période horaire étudiée.

Type de route	Véh. km PPM	Véh. km PPS	Véh.h PPM	Véh.h PPS	Vitesse PPM	Vitesse PPS
Autoroutes et VCA	3 920 211	4 608 417	52 125	68 753	75,2	67,0
Boulevard périphérique	348 825	385 717	7 181	9 086	48,6	42,5
Bretelles et autres VR	417 956	503 428	6 963	8 879	60,0	56,7
Voies périurbaines	2 181 857	2 751 825	30 392	38 195	71,8	72,0
Voies urbaines	2 851 660	3 591 778	91 962	141 030	31,0	25,5
Ensemble du réseau	9 720 509	11 841 165	188 623	265 943	51,5	44,5

Les poids lourds représentent une part plus importante du trafic en période de pointe du matin qu'en période de pointe du soir, comme l'illustre le tableau suivant :

Part des poids lourds dans les circulations selon les types de voies

Type de route	Véh. km PPM	Véh. km PPS	Véh.h PPM	Véh.h PPS	Vitesse PPM	Vitesse PPS
Autoroutes et VCA	12,9 %	7,6 %	13,6 %	7,8 %	71,5	65,3
Boulevard périphérique	13,2 %	7,9 %	13,5 %	8,1 %	47,4	41,6
Bretelles et autres VR	11,5 %	6,1 %	10,9 %	5,8 %	62,8	59,8
Voies périurbaines	11,8 %	6,2 %	11,7 %	6,1 %	72,6	72,5
Voies urbaines	8,1 %	3,9 %	9,0 %	4,1 %	28,0	24,4
Ensemble du réseau	11,2 %	6,1 %	10,9 %	5,5 %	52,8	49,1

4.3.2 - Trafic et saturation

La charge d'un tronçon du réseau routier correspond au nombre moyen de véhicules passant par celui-ci pendant une durée donnée. Sur les cartes ci-dessous, l'épaisseur des traits est proportionnelle à la charge. En comparant ces charges aux capacités des tronçons, on construit un taux d'occupation, qui est représenté sur les cartes par une couleur allant du vert pour les tronçons fluides (chargés à moins de 70 % de leur capacité) jusqu'au noir (chargés au-delà de leur capacité donc totalement saturés).

Les cartes suivantes illustrent que le GPE à lui seul ne suffira pas à résoudre les difficultés de circulation prévisibles en 2030 en période de pointe du matin et du soir.

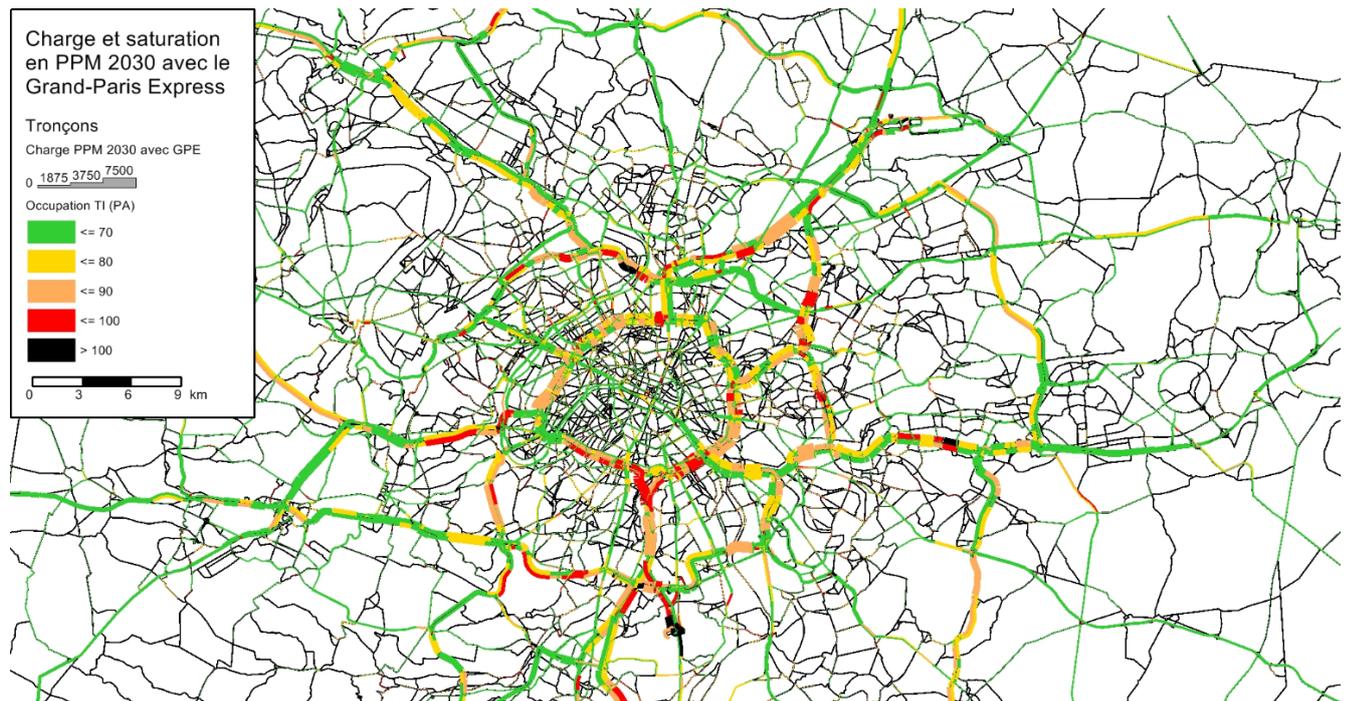
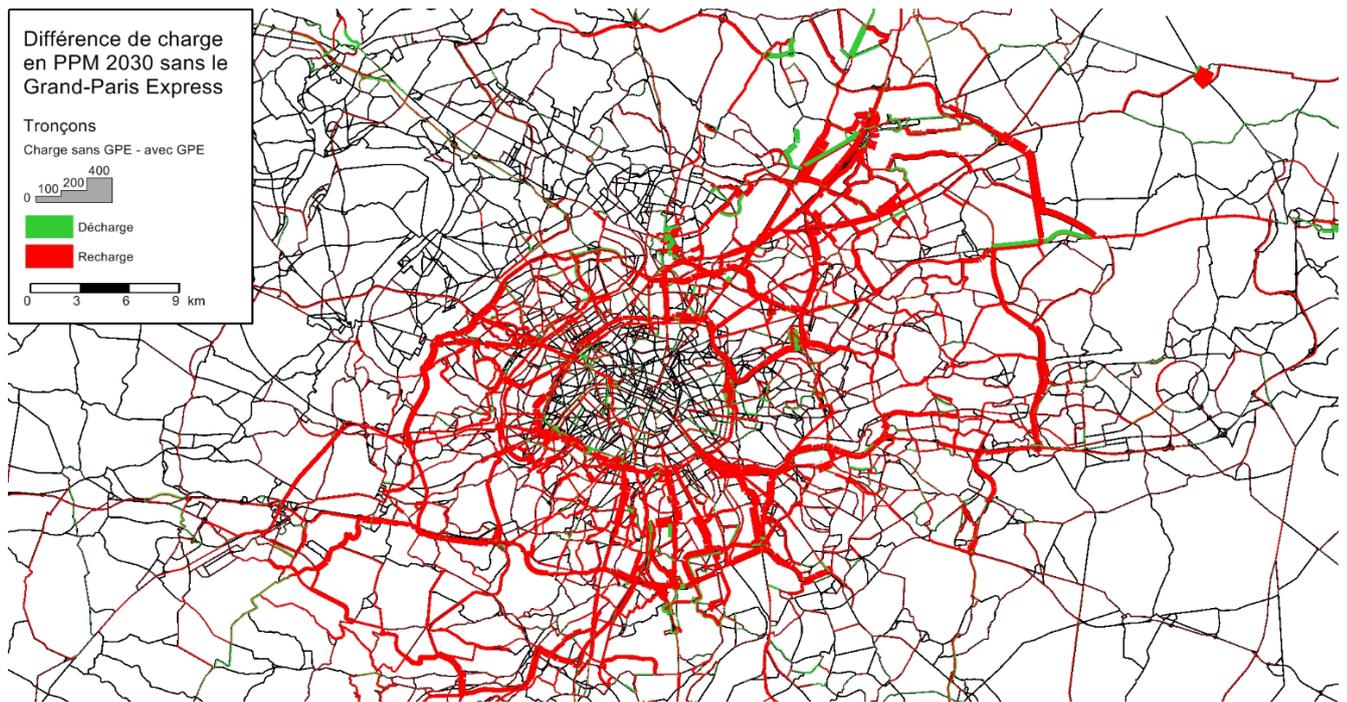


Figure 30 et 31 : cartes de charge et saturation du réseau routier en PPM et PPS à l'horizon 2030

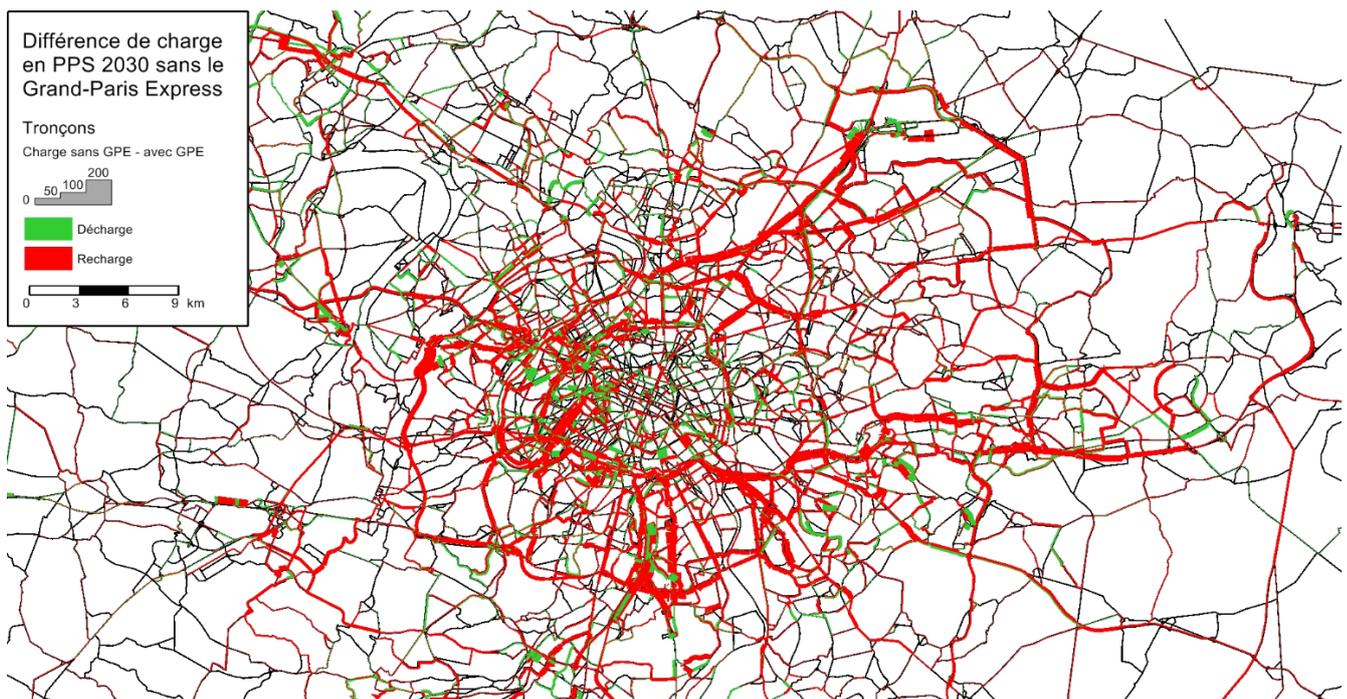


4.3.3 - Différences de charge

Au-delà du contexte de croissance du trafic routier accompagnant celle de la population et de l'emploi en Île-de-France, l'analyse des effets propres du GPE sur le réseau routier s'établit sur la base d'un scénario de référence auquel il faut comparer le scénario de projet. Dans notre cas, il s'agit de comparer la charge du réseau 2030 sans mise en service du GPE, à celle tenant compte de sa mise en service. Les cartes suivantes illustrent que sans la mise en œuvre du GPE la circulation routière serait relativement plus importante en période de pointe du matin et du soir (la couleur rouge indique que le nombre de véhicules par heure représenté par l'épaisseur du trait s'ajoute à celui des cartes précédentes, tandis qu'en vert ce sont des véhicules en moins sur le réseau).



Figures 32 et 33 : cartes de différence de charge routière en l'absence du GPE en PPM et à l'horizon 2030



4.4 - Cartes de charges TC

4.4.1 - Charges TC par mode et par ligne

Les 3 graphiques suivants (figures 34, 35 et 36) visent à comparer les évolutions de charges totales entre les modélisations avec et sans GPE.

L'indicateur pris en compte est le nombre de voyageurs empruntant chacune des lignes de TC lourds. Il permet de constater les différences entre deux scénarios aussi bien en valeur absolue qu'en valeur relative. Cela permet de souligner ainsi d'une part, le volume total de voyageurs gagné ou perdu entre les deux modélisations, et d'autre part, le pourcentage de voyageurs gagné ou perdu entre les deux.

La mise en service du GPE induit des modifications significatives sur les lignes historiques. Il permet de décharger le réseau existant notamment pour les RER A et B, et la ligne 1 du métro. La ligne 15 devient la ligne de TC la plus empruntée, devant le RER A.

Pour les Transiliens, l'histogramme par mode de TC lourds (figure 35) ne montre aucun impact du GPE. Toutefois l'illustration des évolutions par ligne (figure 36)¹⁵ apporte des explications supplémentaires : le réseau du Transilien est partagé pour moitié entre des lignes gagnant du trafic suite à la mise en service du GPE, et une autre perdant du trafic. Finalement, pertes et gains se compensent. Pour les autres modes, la décroissance s'observe de façon plus homogène.

Même si le calage de l'affectation de MODUS 3.1 a été réalisé sur les périodes horaires de 6 - 10 h et 16 - 20h, les charges des lignes et des tronçons (figure 37) sont présentées à l'HPM (7 h 45 - 8 h 45). En effet, cette donnée est préférée car elle représente généralement la charge dimensionnante. Elle permet aussi des comparaisons entre les différentes versions de MODUS (MODUS 2 fournissait une sortie à l'HPM directement) ainsi qu'avec les autres modèles de trafic francilien. Pour autant, par rapport aux résultats en PPM, la fiabilité des résultats en HPM est dégradée car l'HPM n'est pas la période de calage du modèle. Les résultats sont généralement donnés à l'arrondi de 100 à 1000 voyageurs, car la précision des modèles de trafic ne permet pas d'obtenir une meilleure finesse.

Concernant la fiabilité des résultats, de manière générale le calage sur l'horizon du modèle ne permet pas de satisfaire une représentation idéale des comptages pour chacune des lignes. Des compromis ont été faits entre les différents indicateurs de calage pour qu'au global le modèle produise ses meilleurs résultats. Ces résultats sont donc à prendre avec précaution et à regarder en évolution plutôt qu'en valeurs absolues.

¹⁵ Principe de précaution à la lecture des chiffres de trafics : les correspondants entre lignes de TC sont comptés pour une unité pour chacune des lignes empruntées du mode.

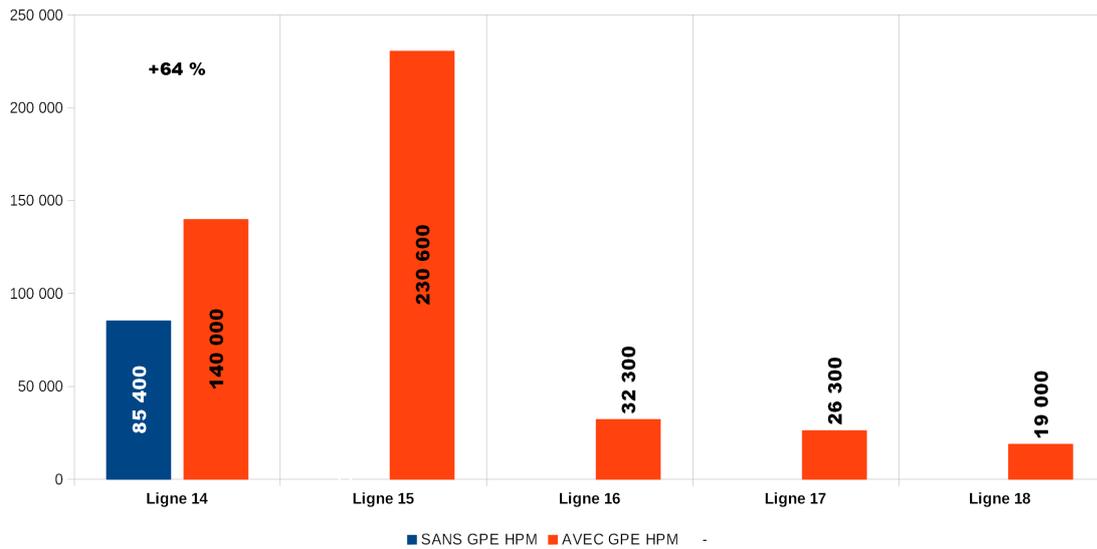


Figure 34 : charges des lignes du GPE à l'HPM en 2030, sans GPE et avec GPE

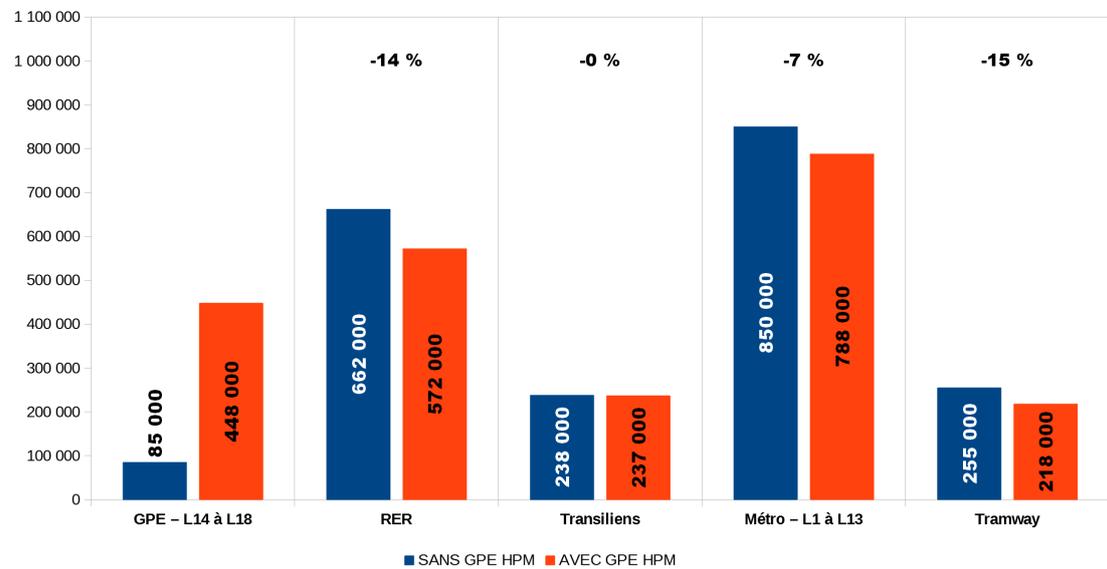


Figure 35 : charges par mode de TC lourds à l'HPM en 2030, sans GPE et avec GPE

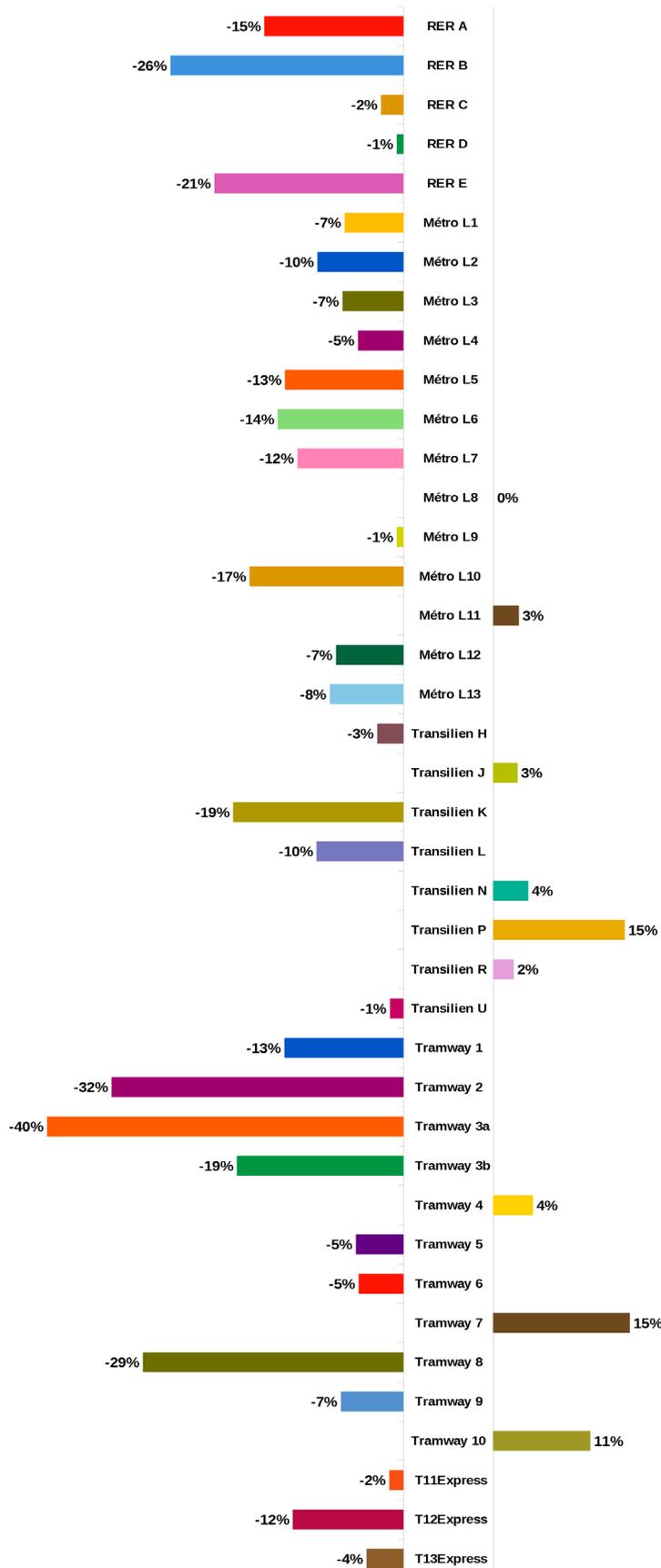


Figure 36 : évolution en % des charges des lignes de TC lourds à l'HPM en 2030, entre les scénarios sans GPE et avec GPE

4.4.2 - Charges par tronçon

L'indicateur agrégé par ligne ne prend pas en compte localement (par tronçons) les évolutions. Il convient alors d'observer les différences de charges sur le réseau par tronçons de manière complémentaire. Si la différence globale de charges de la ligne est pertinente et permet de comprendre les évolutions de façon macroscopique, la différence de charges par tronçons des lignes permet de comprendre les évolutions de façon plus territorialisée.

Qu'est-ce qu'une carte de charge ?

Dans MODUS 3.1, une carte de charge est une illustration graphique et schématique du niveau de voyageurs empruntant les tronçons du réseau en un temps donné. Ces cartes sont issues du résultat d'affectation du modèle.

Comment lire et comprendre une carte de charge ?

La lecture d'une carte de charge s'opère en fonction des couleurs des tronçons représentés. Plus la couleur tire vers le rouge (trafic du GPE en figure 37), plus le nombre d'usagers empruntant la ligne est important. Il est aussi possible de produire des cartes en faisant varier l'épaisseur des tronçons en fonction de sa charge au lieu de sa couleur. Comme les trafics sont représentés par classe de charges, nous avons choisi d'y associer cette coloration pour marquer les différents seuils.

Les cartes de charges montrent directement le niveau d'affluence sur un tronçon, pour chaque sens de circulation. Par convention, les véhicules sont représentés sur les cartes en circulant à droite (Transilien compris, même si les trains roulent à gauche dans la réalité). Des cartes de différences de charge du réseau TC entre deux scénarios peuvent aussi être produites pour constater les évolutions de trafic induites. Il s'agit de vérifier l'influence finale des modifications d'infrastructures et de la répartition des emplois et de la population sur le réseau.

Il ne faut pas confondre la somme des charges par tronçon et les charges totales par ligne. En effet, la somme des trafics par tronçon n'est pas équivalente à la charge de la ligne, car les voyageurs restants dans un véhicule entre deux tronçons seraient doublement comptés.

4.4.2.1 - Charges sur le Grand Paris Express en 2030

La carte globale du GPE (figure 37) représente le chargement par classe de 5000 voyageurs HPM sur le GPE. Pour chacune des lignes du GPE nous pouvons relever que :

- pour la ligne 14, le tronçon central (entre Bibliothèque François-Mitterrand et Saint-Lazare) est dimensionnant avec un seuil de charges supérieur à 20 000 voyageurs HPM. En outre, les tronçons du prolongement au nord montrent un nombre de voyageurs un peu plus élevé que ceux attendus pour le prolongement au sud ;
- pour la ligne 15, on observe une ligne plus chargée à l'ouest et au sud-ouest qu'à l'est ou au nord-est. En effet, les tronçons de la ligne 15 ouest sont davantage sollicités (seuil de charges entre 15 000 et plus de 20 000 voyageurs) que les tronçons de la ligne 15 est (entre 5 000 et 15 000 voyageurs). Une grande partie des emplois de la région (en particulier pour les fonctions des cadres) se trouve sur la ligne 15 ouest, ce qui peut expliquer une large part de cet effet ;
- pour la ligne 16, on constate des charges relativement homogènes dans les deux sens. Le nombre de voyageurs est croissant au fur et à mesure que l'on se rapproche de Saint-Denis Pleyel, pôle d'échange attractif. La portion commune avec la ligne 17 montre les trafics associés à la ligne 16 et 17 ;

- pour la ligne 17, les trafics progressivement croissants (sens sortant de Paris) et décroissants (sens entrant dans Paris) montrent deux typologies d'utilisation de la ligne : la desserte de l'aéroport Roissy CDG et celle du territoire Nord Parisien intermédiaire. Pour rappel la future ligne du CDG Express n'est pas modélisée dans MODUS 3.1. En effet, MODUS ne prenant pas en compte la tarification dans l'affectation, il serait difficile d'intégrer une ligne à tarification spéciale comme celle-ci. L'enjeu en termes de trafic n'est pas le même également : le dossier d'enquête publique de la ligne 17 annonçait en 2016 un trafic de 40 à 50 millions de voyages annuels pour 2030, alors que le dossier d'enquête publique du CDG Express annonçait en 2016, 8,6 millions de voyageurs annuels en 2035, dont 10 % venant de la ligne 17. La portion en commun avec la ligne 16 montre les trafics associés à la ligne 16 et 17 ;
- pour la ligne 18, ligne la moins chargée du GPE, on relève une certaine homogénéité de la classe de charge sur l'ensemble des tronçons de la ligne. Pour autant, le tronçon entre les stations « Massy-Palaiseau » et « Palaiseau » (dans le sens vers Versailles) est un peu plus attractif que le reste de la ligne.

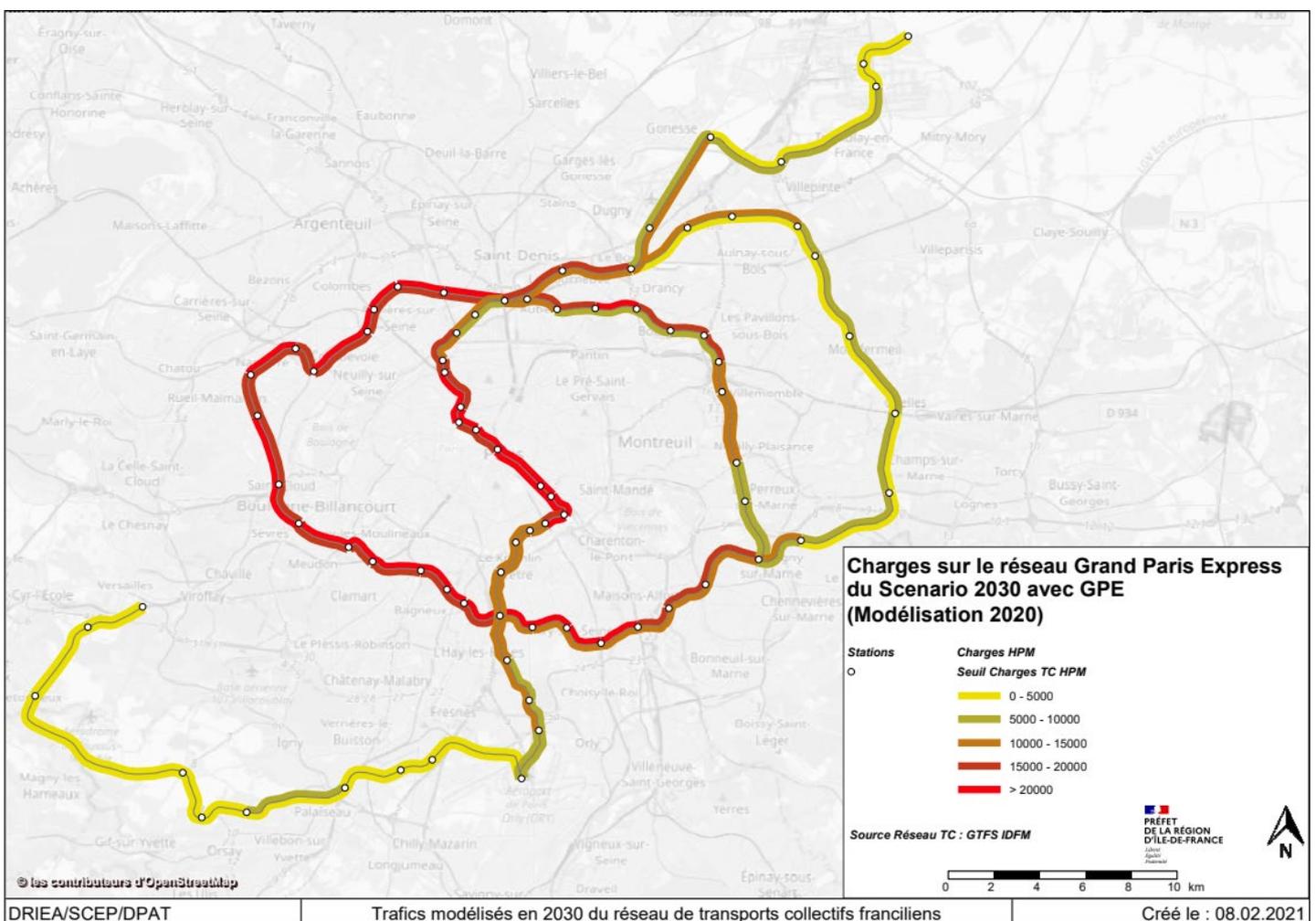


Figure 37 : carte de charges du GPE à l'HPM en 2030

4.4.2.2 - Différences de charges sur le réseau historique entre le scénario 2030 avec GPE et le scénario 2030 sans GPE

Les cartes de charges permettent de situer les impacts des projets programmés à partir d'une situation actuelle connue des usagers, donc plus concrète. Les effets viennent alors principalement du facteur de changement des réseaux, mais aussi de l'évolution des populations et de l'emploi.

Les cartes de différences de charges permettent de situer les impacts des projets programmés à partir d'une situation de référence, c'est-à-dire ici sans le projet du GPE, afin de se rapprocher d'une situation connue des usagers. Les effets observés viennent alors principalement du facteur d'évolution des réseaux. Il est aussi possible d'intégrer l'évolution des populations et de l'emploi (pas dans ce rapport) si on prend un horizon temporel de référence autre que celui de projet pour créer la carte de différence de charge.

Pour l'ensemble des cartes suivantes (figures 38, 39, 40 et 41), la couleur violette illustre un déchargement dû à la mise en service du GPE, et la couleur verte un rechargement.

La figure 38 montre que globalement le GPE permet une désaturation des métros sur quasiment tous les tronçons, avec la mise en service d'offres alternatives. En revanche, certaines lignes avec des prolongements (L1, L4, L10, L11, L12) ou en correspondance avec le GPE voient apparaître une augmentation locale de leur trafic. Seule la ligne 14 est un cas particulier car elle voit son linéaire augmenté significativement avec les prolongements vers le nord et vers le sud : le trafic augmente de manière significative sur l'ensemble de la ligne (supérieure à + 1000 voyageurs HPM).

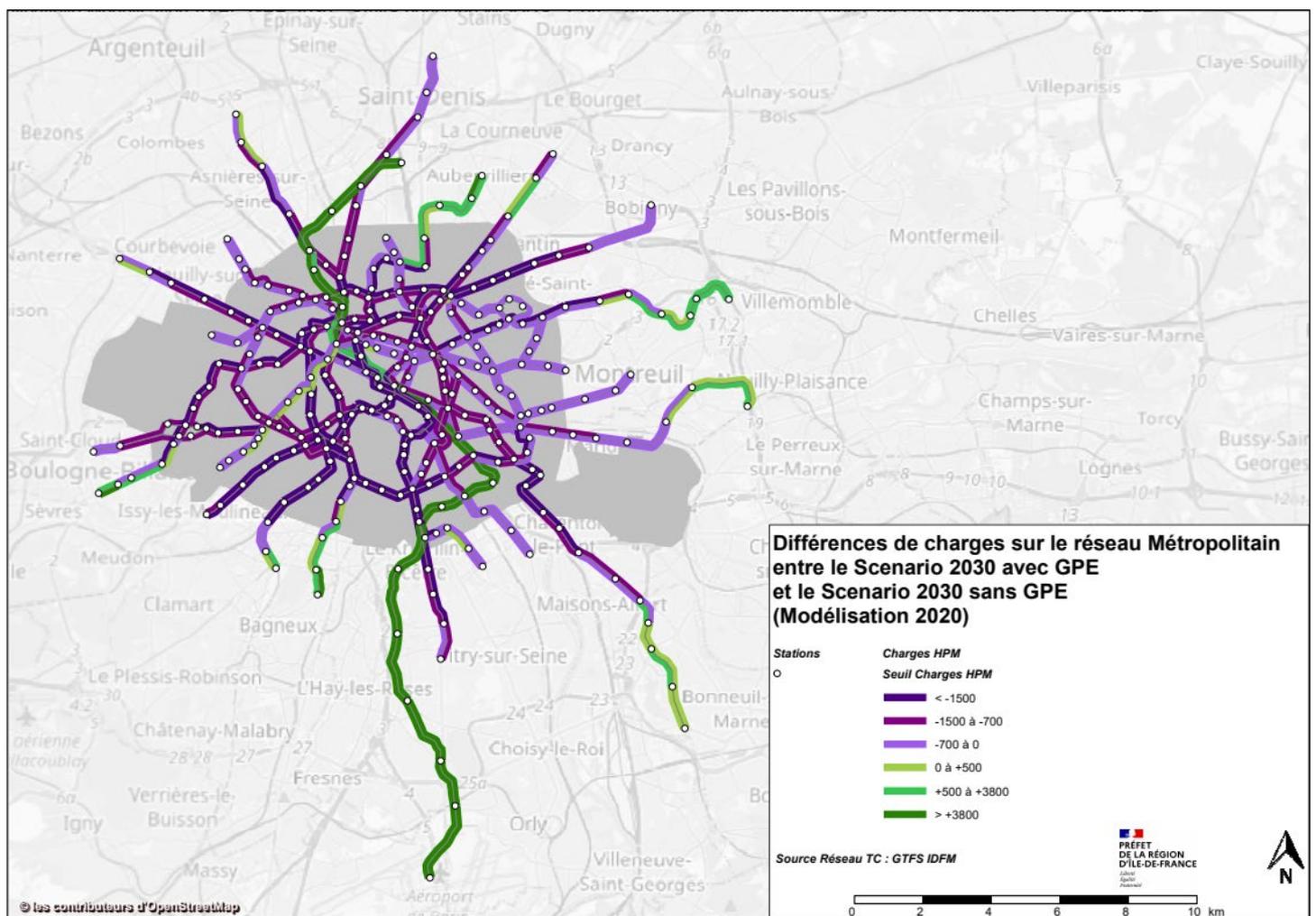


Figure 38 : carte des différences de trafics attendues sur le réseau de métropolitain à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et le scénario sans GPE.

L'impact du GPE sur le réseau de RER (figure 39) peut être décrit ainsi : à l'intérieur de l'aire du GPE les RER connaissent une baisse assez forte à très forte de trafic. À l'extérieur de cette aire, une faible décharge ou faible charge sont visibles selon les lignes. On remarque également une perte plus importante des charges HPM pour le RER B Nord par rapport au RER B Sud, pour le parcours Gare du Nord – Aéroport CDG, qui est corrélée avec l'arrivée de la ligne 17 du GPE.

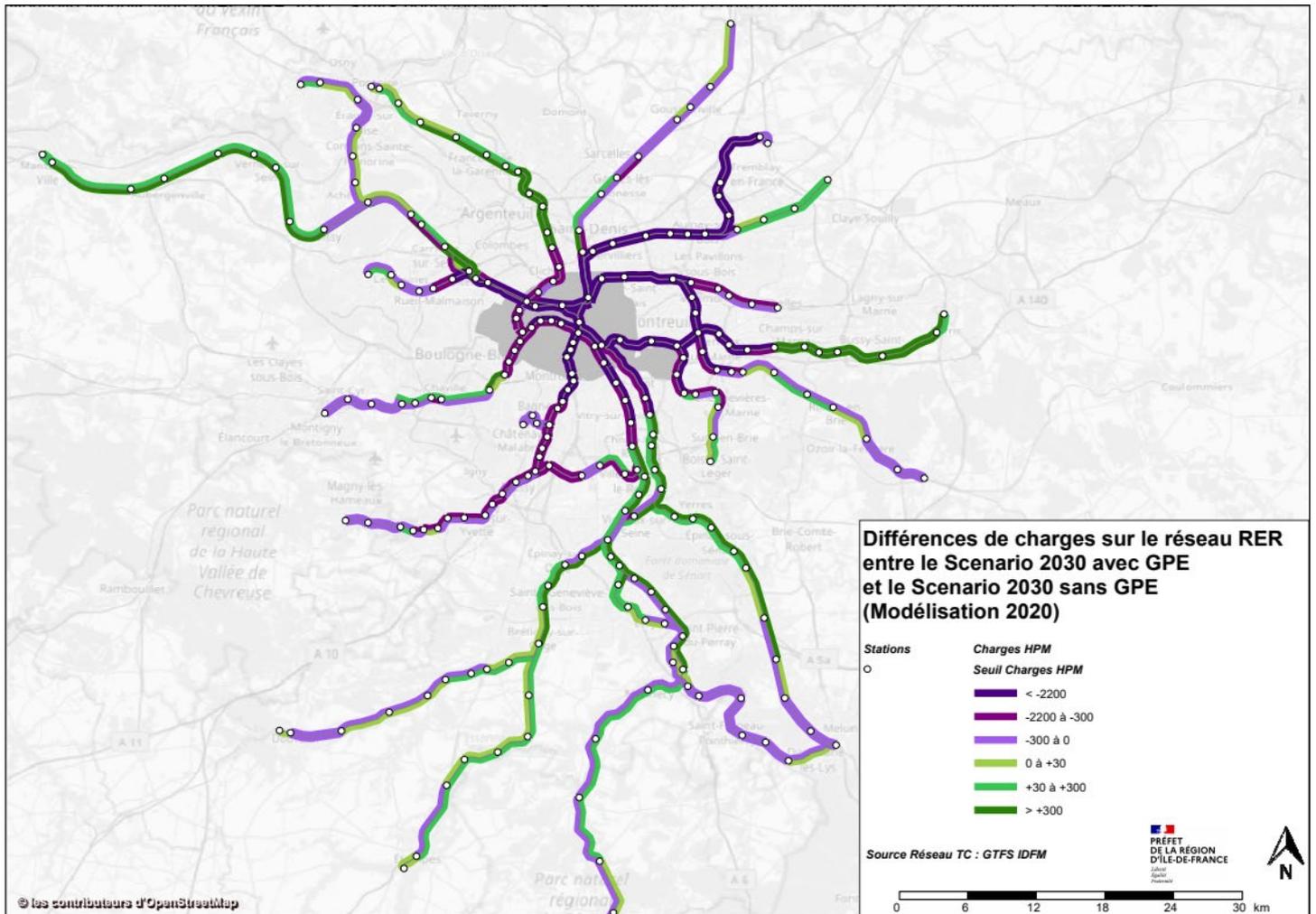


Figure 39 : carte des différences de trafics attendues sur le réseau de RER à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et le scénario sans GPE.

La figure 40 montre une désaturation des tronçons des Transiliens à l'intérieur de l'aire centrale du GPE (comme pour les RER). En revanche, à l'extérieur du GPE, la tendance est à la recharge en particulier dans le sens vers Paris.

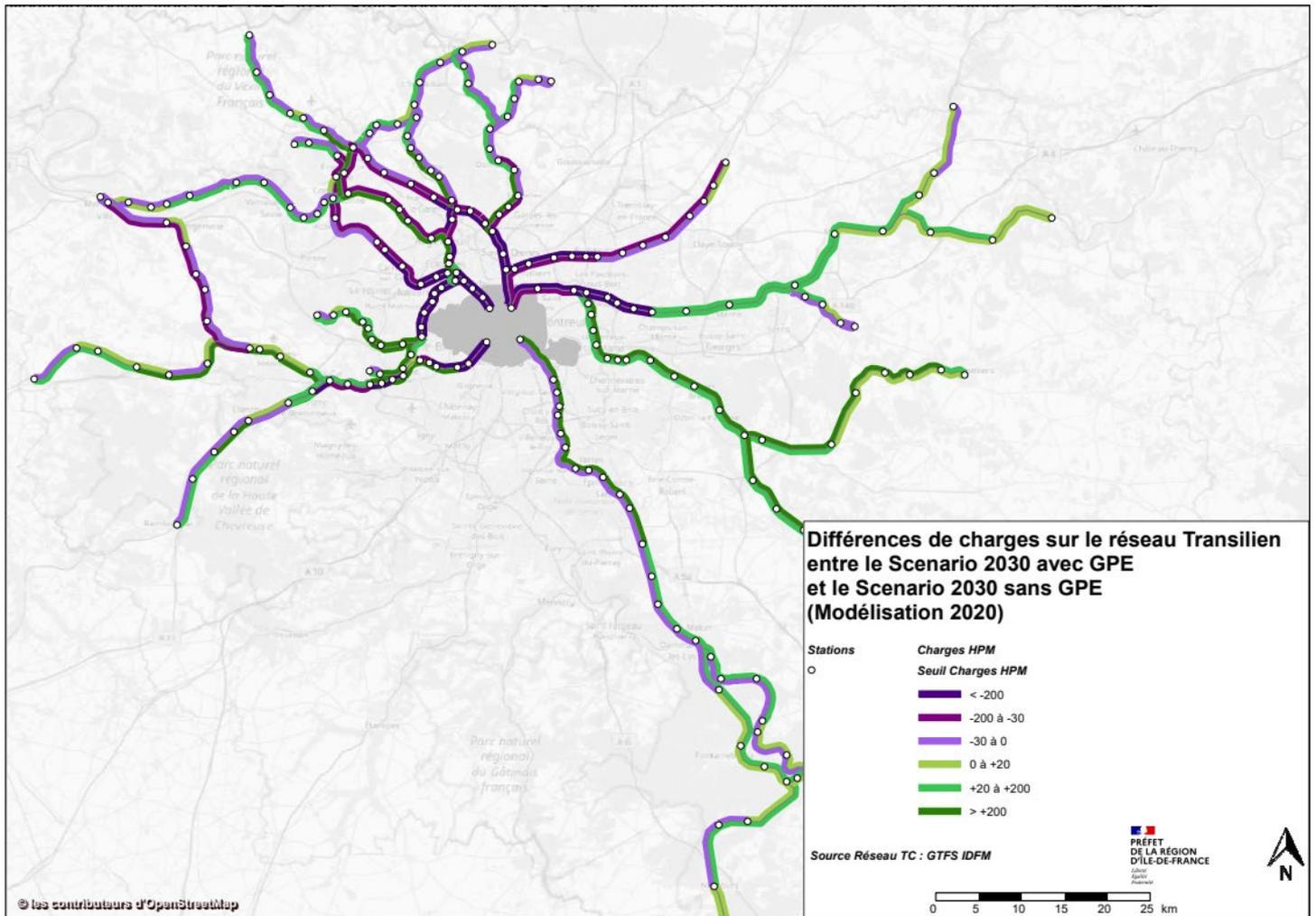


Figure 40 : carte des différences de trafics attendues sur le réseau de Transiliens à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et le scénario sans GPE.

Concernant les tramways (figure 41), la tendance est à la désaturation avec des exceptions pour certains tronçons en correspondance avec le GPE. Les tramways T2 et T3a se déchargent tout particulièrement, face à la compétition de la desserte de la Défense par la ligne 15 ouest pour le T2 et face à une proximité des dessertes des communes voisines de Paris par la ligne 15 sud pour le T3a.

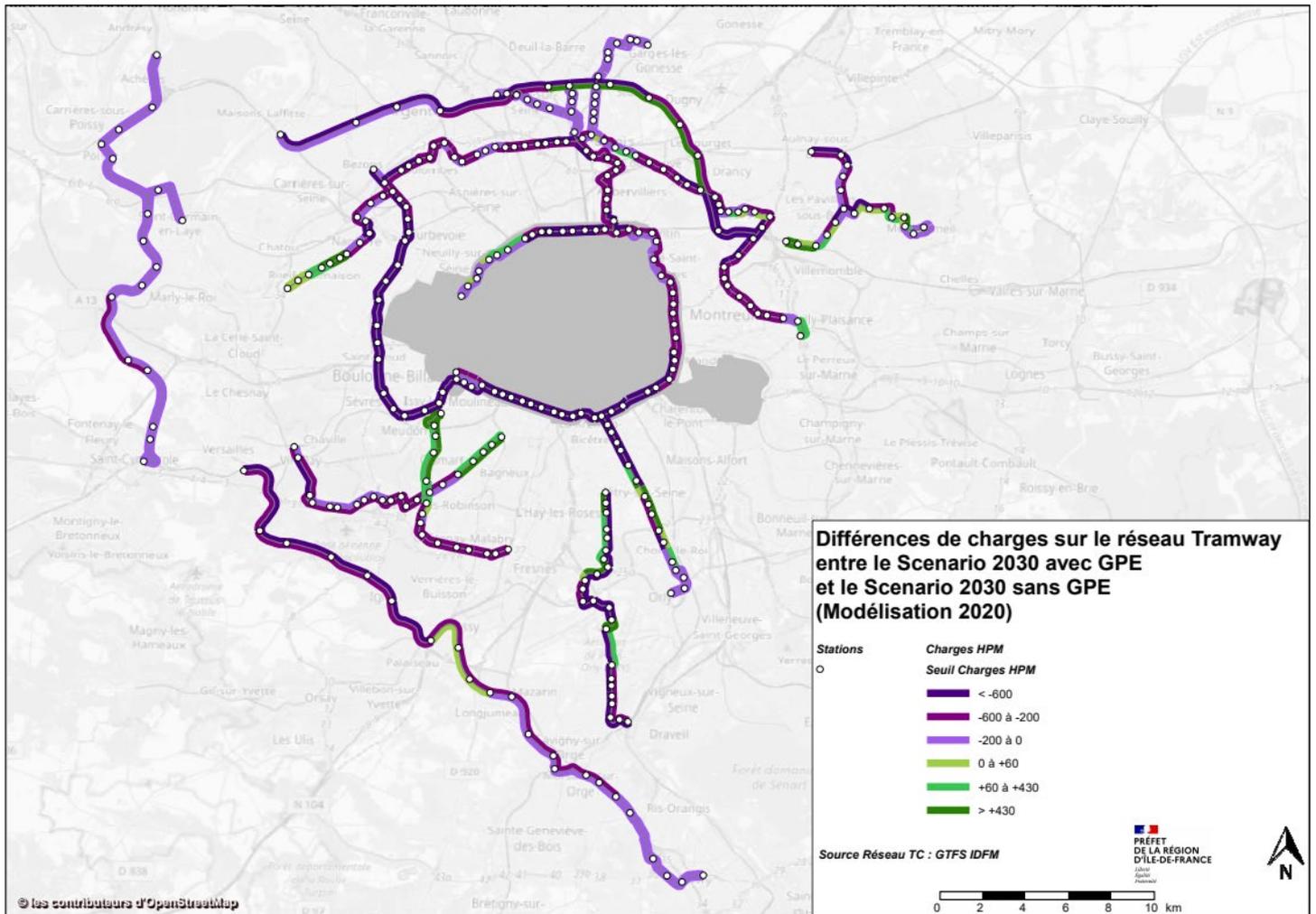


Figure 41 : carte des différences de trafics attendues sur le réseau de Tramways à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et le scénario sans GPE.

4.5 - Indicateurs d'accessibilité

4.5.1 - Isochrones

Les isochrones permettent de déterminer le territoire accessible depuis un pôle (une gare, un ensemble de gares, une zone) dans la limite d'un temps paramétrable, généralement 45 minutes pour se rapprocher de la moyenne des temps de trajet Domicile-Travail des franciliens.

Le calcul est effectué à partir des réseaux modélisant l'offre de transport (transport en commun ou réseau routier) d'Île-de-France à un horizon déterminé (2012 et 2030 pour notre présente étude). L'isochrone inclut des trajets terminaux effectués à une vitesse paramétrable (usuellement fixée à 4 km/h pour la marche). Ceci permet d'estimer le temps de parcours complet d'un usager, depuis sa zone de départ jusqu'à sa zone de destination, quel que soit le mode utilisé.

En plus du rendu cartographique de l'aire atteignable en 45 minutes, il est aussi possible de calculer l'évolution de la surface de l'aire entre deux scénarios, ainsi que le nombre d'emplois et de population accessible. À titre d'exemple, le gain d'accessibilité en 45 minutes de transport en commun au départ de la station de métro de la ligne 7 « Villejuif-Louis Aragon » avec la mise en service du GPE est de 213 % en surface, 88 % en population et 62 % en emplois.

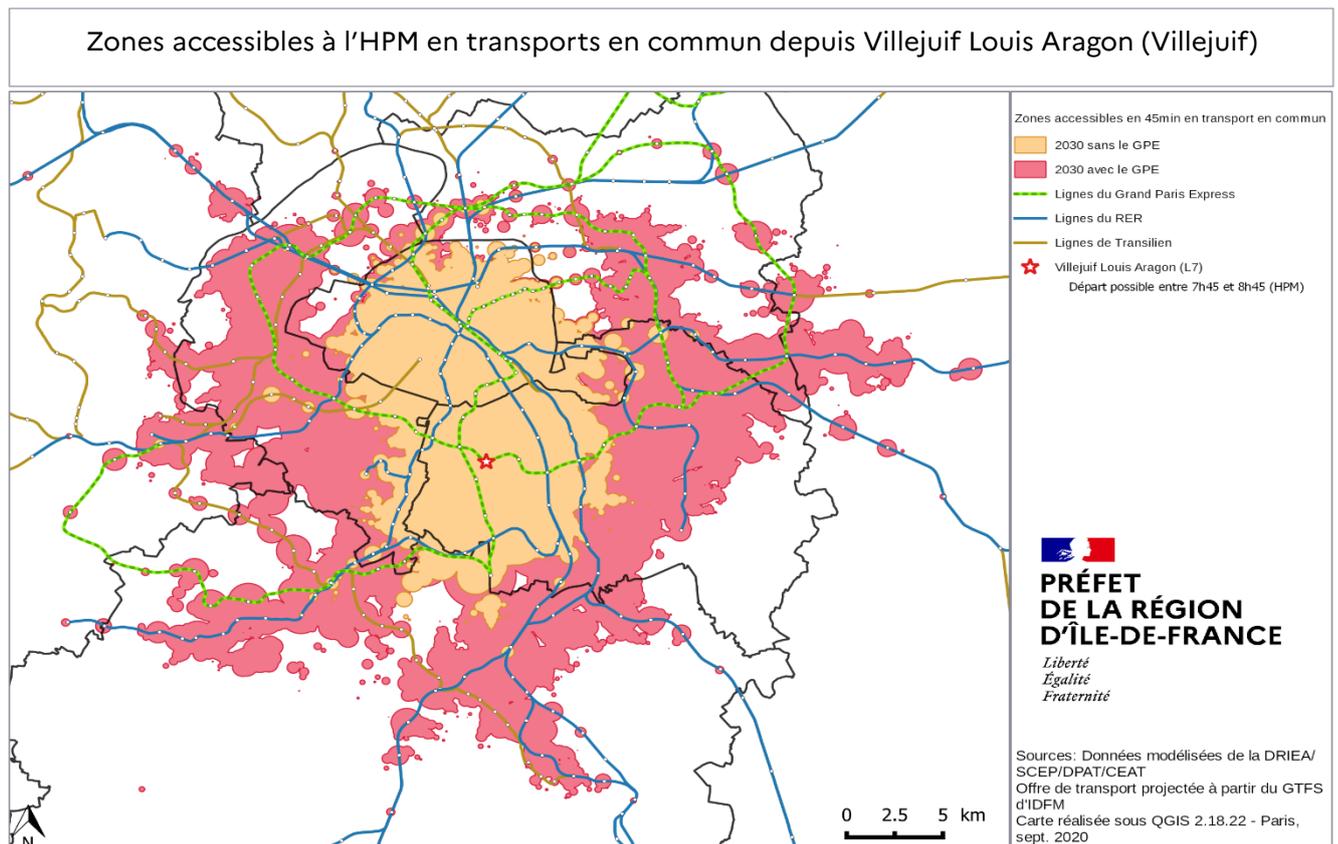


Figure 42 : zones accessibles en TC en 45 min. depuis Villejuif Aragon entre les scénarios 2030 avec et sans GPE à l'HPM.

4.5.2 - Accessibilité aux emplois et à la population à la zone MODUS

Afin de caractériser l'accessibilité en termes de population et d'emplois pour chacune des zones MODUS (sans passer par un calcul unitaire d'isochrone sur les 1289 zones), il est possible de croiser les données zonales socio-démographiques avec les matrices de temps de parcours (transport en commun ou voiture) issues de MODUS. Cette méthode permet d'évaluer le nombre d'emplois de la région auxquels un habitant d'une zone MODUS peut accéder en un temps donné (généralement 45 minutes). La zone MODUS est alors une origine. Il est aussi possible de calculer le nombre de franciliens pouvant accéder à un point d'intérêt en un temps donné. La zone MODUS est alors une destination. Dans tous les cas, le nombre de personnes ou d'emplois peut être ramené à leur part en pourcentage de la population francilienne.

Pour chaque zone d'origine (respectivement de destination), on détermine l'ensemble des zones atteignables en un temps donné. On somme alors le nombre d'emplois (respectivement de population) accessibles. Ce calcul peut être fait en situation actuelle et future, ce qui permet d'estimer l'impact d'un scénario sur l'accessibilité.

Le raisonnement inverse est aussi possible en calculant le temps de trajet nécessaire pour atteindre une certaine part d'emplois ou de population.

L'exemple ci-dessous permet de montrer que le GPE induit des gains significatifs d'accès à l'emploi autour de son tracé. Les gains potentiels se diffusent également largement autour de la nouvelle infrastructure.

Gains d'accessibilité d'emplois franciliens à la mise en service du GPE (2030)

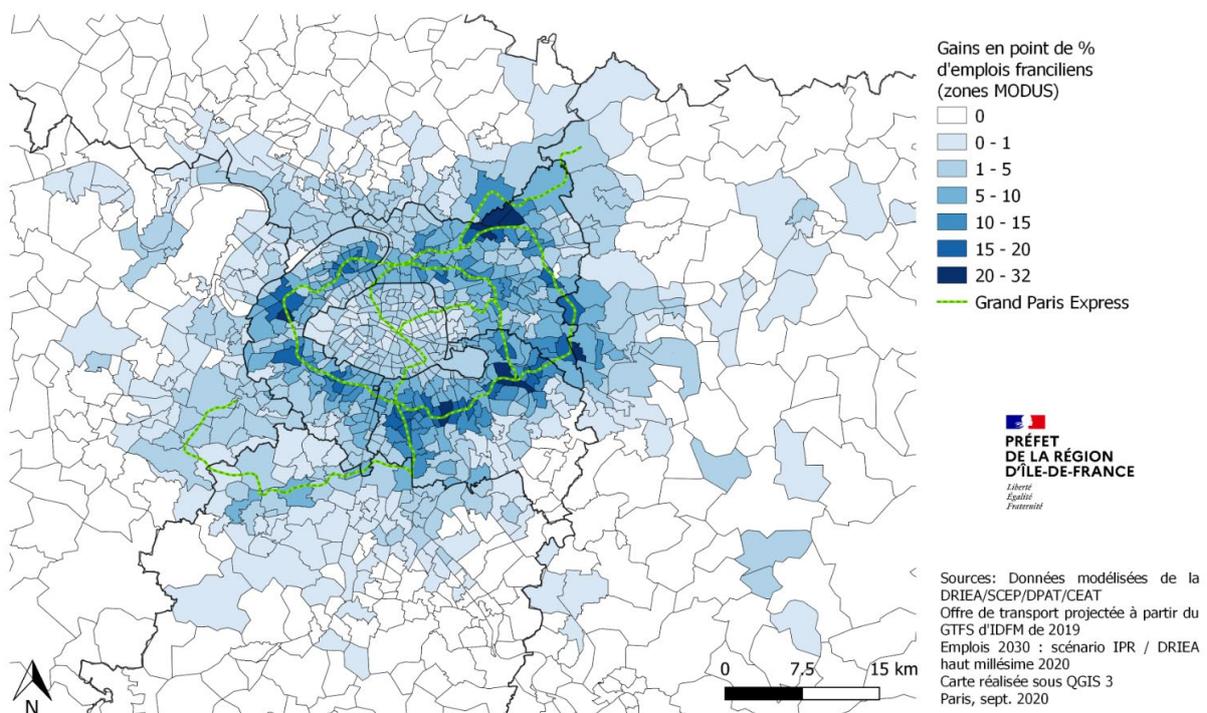


Figure 43 : exemple d'accessibilité P+E à la zone MODUS, en gain de points de % d'emplois franciliens

5 - Conclusion

Rappelons que MODUS sert principalement à l'évaluation comparative de scénarios régionaux qui peuvent porter sur des investissements d'infrastructures, des politiques de transport ou de gestion de trafic, de liens entre aménagement et transport.

Pour ce qui concerne la modélisation macroscopique statique, la congestion est grossièrement approchée sur le réseau routier, dans le sens où si les temps de parcours varient bien selon la charge sur les routes, l'allongement des temps de parcours est défini par des observations très agrégées, et les remontées de file ne débordent pas sur les tronçons en amont. Cette prise en compte partielle de la congestion est réalisée avec plusieurs itérations du modèle pour obtenir un équilibre entre les différents itinéraires possibles. En revanche, la contrainte de capacité n'est pas explicitement prise en compte sur le réseau de transport en commun, seulement de manière détournée par la pénalité de saturation, sans bouclage sur la demande.

Les lois utilisées dans MODUS caractérisent le comportement de mobilité des franciliens un jour de semaine. Elles ont été déterminées sur la base des enquêtes ménages déplacements réalisées en Île-de-France depuis plus de trente ans et calibrées sur la dernière enquête datant de 2010¹⁶. Elles permettent de décrire les processus d'arbitrage des différentes options : choix de déplacement, de destination, de modes et d'itinéraires. Les comportements sont supposés inchangés dans l'avenir (2030).

Ce rapport avait pour objectif de mettre en avant les grands principes de fonctionnement de la dernière version du modèle et de l'élaboration d'un scénario prospectif, les principaux indicateurs de fréquentations des réseaux et de déplacements, ainsi que des synthèses de trafics concernant l'impact du GPE sur les déplacements franciliens.

Les principaux résultats, à l'horizon 2030 avec la réalisation du GPE, se traduisent au travers d'indicateurs de déplacements 1) de charges des réseaux 2) et d'accessibilité 3) :

1) Indicateurs de déplacements :

- Par rapport à la situation de référence (année 2012), on constate une augmentation des flux totaux de déplacements le matin (6-10 h, avec + 9,3 %) et le soir (16-20 h, avec + 10,6 %), notamment du fait de l'accroissement de la population francilienne qui gagne plus d'un million d'habitants. Ces évolutions sont principalement le fait des motifs de déplacements pour le travail et les achats-loisirs.
- La portée moyenne en TC en 2030 s'établit pour le matin et le soir à respectivement environ 12,2 km et 9,6 km, pour une durée moyenne respective d'environ 39 minutes et 35 minutes, durée et portée étant en augmentation par rapport à 2012.
- Les VP connaissent une portée moyenne de près de 7,4 km le matin et de 5,9 km le soir, pour un temps moyen d'environ 15 minutes. Le soir les conducteurs bénéficient d'une réduction imperceptible du temps passé sur la route d'une petite minute qu'il convient de noter. En revanche, les VP le matin réduisent quelque peu leur portée mais accroissent légèrement leur temps.
- Les modes doux (MD) se distinguent naturellement par leur faible portée et durée (moins de 1 km et d'un quart d'heure), mais la portée est tirée vers le haut par la sous-catégorie du vélo qui pousse la distance moyenne en 2030 à environ 2,3 km et un temps moyen en légère augmentation d'environ 12 minutes matin et soir.
- Les parts modales se ventilent comme suit en 2030, le matin : 32,7 % TC, 37,2 % VP, 30,1 % MD ; le soir : 21,9 % TC, 44,1 % VP, 35 % MD. On retiendra des évolutions sensibles le matin que le soir avec $\pm 1,5$ à 2 points sur ces parts entre 2012 et 2030.

¹⁶Les résultats de la nouvelle EGT H2020 ne seront disponibles qu'à partir de 2023. Toutefois, la DRIEA disposera d'éléments au fil de son déroulement.

2) Indicateurs de fréquentation de voyageurs et de conducteurs sur les réseaux :

- Sur le réseau routier, on observe une augmentation des charges et des saturations des tronçons à l'horizon 2030. Autrement dit, le GPE à lui seul ne suffira pas à résoudre les difficultés de circulation prévisibles en 2030 en période de pointe du matin et du soir, et sans sa réalisation elles seraient aggravées.
- Le GPE permet en général une désaturation du réseau historique, en particulier en zone dense, à l'intérieur de son périmètre.

3) Indicateurs d'accessibilité :

- Globalement, l'accessibilité aux territoires s'améliore avec le GPE. Cet effet est logiquement le plus marqué dans les zones desservies par le GPE.

À l'heure de la finalisation de ce rapport dédié à la présentation des résultats des simulations prospectives des déplacements sur les réseaux de transports en commun et routier de la région capitale, la France connaît, comme d'autres pays, une crise sanitaire d'ordre mondial due à l'épidémie de COVID-19 par infection au coronavirus (SARS-CoV-2). Les résultats et les hypothèses présentées dans ce rapport n'intègrent pas les impacts éventuels de cette crise sanitaire ni ceux de la crise économique qui y est liée. Comme récent impact sur les déplacements, on peut citer par exemple l'explosion de l'utilisation des vélos pour certains déplacements quotidiens de courte ou moyenne distance (< 10 km), et en fonction de certains motifs ou un niveau de fréquentation des transports en commun restant nettement inférieur (de l'ordre de 60-70 % voire moins selon les périodes) à la situation pré crise.

Les récentes évolutions de la mobilité (vers le vélo ou les modes doux par exemple, dont certains sont réinventés depuis peu, comme les trottinettes) qui marquent leur empreinte notamment dans les centres urbains, ne sont pas encore bien connues même si des enquêtes spécifiques sont menées ou qu'il existe de nouveaux types de données, (traces GPS issues des smartphones par ex.). Ces données sont de plus en plus partagées à la demande, ou mises à disposition sur des plateformes en libre accès par leurs producteurs. Leur fiabilité reste toutefois à conforter dans le cadre d'éventuelles utilisations pour des travaux de modélisation des déplacements. Ce constat illustre le nécessaire recours à des données de mobilités fiables, standardisées et au meilleur ratio coûts/bénéfices. Ce sont ces dernières qui permettent essentiellement de nourrir les travaux de modélisation actuellement, du moins ceux présentés dans ce document.

MODUS 3.1 a, par nature, vocation à voir évoluer les caractéristiques techniques de ses sous modèles afin d'une part d'améliorer constamment la qualité de ses simulations et vocation à répondre aux évolutions des nouveaux usages de mobilité. Ainsi, les perspectives d'évolution de MODUS 3.1 intègrent : le codage de l'ensemble de la chaîne de modélisation sous un langage de programmation libre, en l'occurrence Python (au lieu de SAS® aujourd'hui) ; la modélisation d'un scénario de référence plus récent (année 2019 à la place de 2012 actuellement) ; porter une attention particulière relative à la demande cycliste, intégrer la tendance de fond du recours au télétravail et de son augmentation chez certaines CSP pour le motif de déplacement domicile-travail afin de mieux apprécier son impact sur les réseaux de transports aux heures de pointe ; la révision du zonage ; l'amélioration de l'approche de la congestion dans les TC ; et enfin, dernier et non des moindres, le développement d'un modèle dynamique régional comme fer de lance des évolutions de MODUS 3.1.

Ce chantier déjà engagé offrira une meilleure représentation des effets « dynamiques » liés à la congestion routière grâce à une modélisation plus fine de l'interaction entre les choix de trajets, la circulation, les temps de parcours et leurs coûts en prenant en compte leur évolution temporelle (choix de l'heure de départ, étalement des pics de trafic, etc.). En effet, cette évolution significative de la modélisation des déplacements renforce le rôle de MODUS comme un outil essentiel d'aide à la décision pour concevoir et évaluer les projets de transport et de politiques de mobilité en Île-de-France.

6 - Glossaire

Ce rapport utilise de nombreux sigles et acronymes dont la signification est rappelée ci-dessous. Pour faciliter la recherche, les sigles sont rassemblés par thématique (modes de transport, réseaux de transport, organismes, modèles et base de données, abréviations temporelles, notions de modélisation).

Modes de transports :

- VP : véhicule particulier (voiture, 2 roues motorisées, camionnette, fourgon, etc.)
- VUL : véhicule utilitaire léger
- TC : transports collectifs (bus, car, métro, tramway, train)
- MD : modes doux (marche, rollers, trottinettes, fauteuils roulants)
- CY : cycles (vélo, vélo en libre-service, vélo à assistance électrique)
- PL : poids lourds (véhicule de transports de marchandises de plus de 3,5 T)
- UVP : unité de véhicule particulier (une voiture vaut 1 UVP, un PL en vaut 2)

Réseaux de transport :

- RER : Réseau Express Régional (opéré par la SNCF et la RATP)
- GPE : réseau du Grand Paris Express
- Transilien : réseau ferré de trains opérés par la SNCF desservant la région Île-de-France et ses environs
- CDG : Charles de Gaulle en référence à l'aéroport de Roissy
- BP : Boulevard Périphérique
- VCA : voie à caractéristiques autoroutières
- VR : voie rapide

Organismes :

- SGP : Société du Grand Paris (maître d'ouvrage du Grand Paris Express)
- ADP : Aéroport de Paris (société en charge des 2 aéroports de Roissy et d'Orly)
- RATP : Régie Autonome des Transports Publics (opérateur du réseau de métro)
- SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer (opérateur du réseau Transilien)
- IDFM : Île-de-France Mobilités (autorité organisatrice des transports de la région Île-de-France)
- DRIEA-IF : Direction Régionale de l'Équipement et de l'Aménagement d'Île-de-France
- SCEP : Service de la connaissance, des études et de la prospective
- DPAT : Département prospective aménagement transport
- CMT : Cellule modélisation et territorialisation
- CEAT : Cellule études et aménagement transport
- COM : Cellule observation de la mobilité
- LAET : Laboratoire d'Économie des Transports rattaché à l'ENTPE, l'UMR 5593 du CNRS et l'Université Lyon 2
- IAU : Institut d'aménagement et d'urbanisme, devenu IPR en 2019
- IPR : Institut Paris Région, nouveau nom de l'IAU depuis 2019
- VdP : Ville de Paris
- SDES : Service de la donnée et des études statistiques du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire
- INSEE : Institut national de la statistique, des études et de l'évaluation

Modèles et base de données :

- MODUS : Modèle de Déplacement Urbain et Suburbain de la DRIEA-IF
- FretUrb : Modèle de simulation du transport de marchandise développé par le LAET
- SITRAM : Base de données nationale relative au transport de marchandises
- GTFS : General Transit Feed Specification (format de données d'offre TC)
- P+E : Modèle prospectif de cadrage de l'évolution de la population et de l'emploi en Île-de-France co-développé par l'IPR et la DRIEA-IF
- RP : Recensement de la population française réalisé par l'INSEE
- CSP : Catégories socio-professionnelles
- IRIS : Ilots regroupés pour l'information statistique, il s'agit d'un découpage du territoire français à un niveau homogène permettant d'exploiter les données produites par l'INSEE

Abréviations temporelles :

- PPM : Période de pointe du matin (6h-10h)
- PCJ : Période creuse de jour (10h-16h)
- PPS : Période de pointe du soir (16h-20h)
- HPM-HPS : Heures de pointe du matin et du soir (heures durant lesquelles le réseau étudié est le plus chargé)

Notions de modélisation :

- Algorithme de Fratar : L'algorithme de Fratar (aussi appelé algorithme de Furness) est à un algorithme itératif qui consiste à modifier une matrice OD de façon à ce que les sommes des lignes et des colonnes correspondent à des valeurs prédéfinies.
- Modèle Logit : modèle de choix discret permettant d'estimer la probabilité de choisir une alternative parmi plusieurs (exemple : choisir son mode de déplacement) supposées indépendantes les unes des autres et reposant sur des fonctions d'utilité propres à chaque alternative.
- Transformation Box-Cox : la transformation Box-Cox d'une variable (ex : le coût ou le temps de transport) est une formule mathématique non linéaire qui permet d'amplifier ou de réduire ses variations. Par exemple, une augmentation forfaitaire du coût des transports a un fort impact pour des coûts faibles et un impact moindre pour des coûts élevés. A contrario, un allongement forfaitaire du temps de déplacement a généralement un impact faible sur des courts trajets, mais plus fort sur des trajets longs déjà perçus comme pénibles.
- Equilibre de Wardrop : équilibre d'affectation statique tel que le coût généralisé de l'itinéraire choisi pour chaque relation OD est inférieur ou égal à celui de tout autre itinéraire possible (c'est-à-dire que l'itinéraire choisi est le meilleur au sens du moins coûteux pour l'utilisateur qui l'emprunte).
- Calibrage : estimation des paramètres d'un modèle permettant de reproduire une valeur à estimer à partir de données d'entrée à l'aide de procédures d'optimisation.
- Calage : ajustement des paramètres d'un modèle (exemple : fonction de temps généralisé, capacité des voies, courbes débit-vitesse) pour reproduire un ensemble de données observées (exemple : comptages de trafic).

Index des figures

Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un modèle de déplacement à 4 étapes comme MODUS	8
Figure 2 : Architecture de MODUS 3.1	10
Figure 3 : Répartition en période horaire selon les motifs de déplacements de MODUS	11
Figure 4 : Illustration des disparités territoriales dans l'émission et l'attraction des flux domicile travail.....	12
Figure 5 : Illustration de la distribution des flux émis par une zone dans MODUS	13
Figure 6 : Illustration du choix modal selon le motif dans MODUS	15
Figure 7 : Zonage de la région Île-de-France dans MODUS	18
Figure 8 : Éléments constitutifs du réseau TI de MODUS.....	21
Figure 9 : Types de tronçons routiers dans le réseau TI de MODUS	22
Figure 10 : Effet du nombre de voie sur les courbes débit-vitesse du réseau TI.....	23
Figure 11 : Effet des régimes de priorité sur les courbes débit-vitesse du réseau TI.....	23
Figure 12 : Pénalités aux nœuds appliquées dans le réseau TI de MODUS.....	24
Figure 13 : Temps de parcours des connecteurs routiers du réseau TI.....	24
Figure 14 : Carte des projets routiers mis en service entre 2012 et 2020	25
Figure 15 : GTFS d'IDFM (source : open data IDFM)	26
Figure 16 : Aperçu du réseau GTFS sous Visum – Nœuds et tronçons	27
Figure 17 : Ancienne méthode des connecteurs (MODUS 2)	29
Figure 18 : Nouvelle méthode des connecteurs (MODUS 3)	29
Figure 19 : Évolutions relatives de l'occupation des sols à l'échelle régionale entre 2012 et 2030.....	33

Figure 20 :	
Carte d'évolution relative de la population entre 2012 et 2030 selon le zonage MODUS	34
Figure 21 :	
Carte d'évolution relative de l'emploi entre 2012 et 2030 selon le zonage MODUS	34
Figure 22 :	
Carte des projets routiers pris en compte à l'horizon 2030	35
Figure 23 :	
Cartes des projets TC en région Île-de-France.....	38
Figure 24 :	
Évolution relative des déplacements entre 2012 et 2030.....	43
Figure 25 :	
Évolution des parts modales entre 2012 et 2030	44
Figure 26 :	
Évolution des parts modales entre 2012 et 2030	44
Figure 27 :	
Carte d'évolution des parts modales TC pour les déplacements motorisés entre 2012 et 2030	45
Figure 28 :	
Carte d'évolution des parts modales TC pour les déplacements motorisés en 2030 sous l'effet du GPE.....	45
Figure 29 :	
Impact de la mise en service du GPE : différence des temps totaux en minutes de déplacement par OD entre le scénario 2030 avec GPE et sans GPE.	46
Figures 30 et 31 :	
Cartes de charge et saturation du réseau routier en PPM et PPS à l'horizon 2030	48
Figures 30 et 31 :	
Cartes de charge et saturation du réseau routier en PPM et PPS à l'horizon 2030	48
Figures 32 et 33 :	
Cartes de différence de charge routière en l'absence du GPE en PPM et PPS à l'horizon 2030	49
Figures 32 et 33 :	
Cartes de différence de charge routière en l'absence du GPE en PPM et PPS à l'horizon 2030	49
Figure 34 :	
Charges des lignes du GPE à l'HPM en 2030, sans GPE et avec GPE.....	51
Figure 35 :	
Charges par mode de TC lourds à l'HPM en 2030, sans GPE et avec GPE.....	51
Figure 36 :	
Évolution en % des charges des lignes de TC lourds à l'HPM en 2030, entre le scénario sans GPE et avec GPE ...	52
Figure 37 :	
Carte des charges du GPE à l'HPM en 2030	54
Figure 38 :	
Carte des différences de trafics attendues sur le réseau de métropolitain à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et sans GPE	55

Figure 39 : Carte des différences attendues sur le réseau de RER à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et le scénario sans GPE.....	56
Figure 40 : Carte des différences attendues sur le réseau de Transiliens à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et le scénario sans GPE	57
Figure 41 : Carte des différences attendues sur le réseau de Tramways à l'horizon 2030, entre le scénario avec GPE et le scénario sans GPE	58
Figure 42 : Zones accessibles en TC en 45 min. depuis Villejuif Aragon entre les scénarios 2030 avec et sans GPE à l'HPM	59
Figure 43 : Exemple d'accessibilité P+E à la zone MODUS, en gain de points de % d'emplois franciliens.....	60

