

Le modèle *TRANUS* de simulation intégré pour la région française du Nord-Pas-de-Calais

« La constitution d'un Modèle d'Usage du Sol et Transport (MUST) pour un territoire représente un investissement important. D'abord un effort important en ingénierie d'étude, pour rassembler des informations, identifier et retracer des phénomènes, simuler un état observé du système territorial, synthétiser des performances. Ensuite et surtout, un investissement important pour la gestion du territoire : l'enjeu est de disposer d'un outil de simulation, puissant et flexible, pour le diagnostic et le pronostic – la planification par scénario. Un MUST sert à amplifier et à approfondir la capacité de conception du planificateur territorial, et à intégrer les enjeux de l'aménagement spatial d'une part, du développement économique et social d'autre part. »

Les modèles d'usage du sol et transport. Où la géographie et l'économie se rejoignent – 2012 – F. Leurent, Université Paris-Est - Laboratoire Ville Mobilité Transports - École des Ponts Paris Tech

Ce chapitre expose les hypothèses de base, la structure et les phases d'implémentation, de calibration et de mise en œuvre d'une modélisation intégrée d'usage du sol / transport, réalisée pour le territoire de la région française du Nord-Pas-de-Calais en utilisant le logiciel *Tranus*. La modélisation intégrée d'usage du sol et transport est un outil aussi puissant que complexe. Il permet en fait de modéliser, de représenter et de simuler les relations et interactions qui lient le système de transport et l'usage du sol. Grâce à cette technique de modélisation on arrive à analyser les influences et interférences qui caractérisent les choix de mobilité et le choix de localisation des ménages et des emplois. On introduira dans le début du chapitre les fondements théoriques et les principes à la base de la modélisation intégrée de l'usage du sol et du transport, qui trouve sa caractéristique la plus intéressante dans la capacité de reproduire de manière intégrée le concept de boucle de rétroaction dans le temps, entre urbanisme et transport. Sera traitée également la thématique de l'applicabilité de ce type d'outil dans des contextes différents de ceux de la recherche et donc de l'apport potentiel qu'il peut représenter pour les collectivités et les décideurs. Comme cela sera expliqué dans la suite, le logiciel *Tranus* a été considéré comme le plus adapté et le plus fonctionnel face aux hypothèses et aux objectifs de cette recherche. Son intérêt provient également de sa capacité à reproduire des dynamiques de caractère multi scalaire et pour sa caractéristique d'intégration complète entre le modèle de transport et le modèle d'usage du sol. Cette action de recherche a donc été essentiellement conçue avec l'objectif de simuler, de tester et d'évaluer les effets et les impacts d'un plan régional de Transit

Oriented Development ou d'urbanisme orienté vers le rail valorisant les transports en commun, en analysant l'évolution du système de transport régional, ainsi que des dynamiques de localisation résidentielles et des activités et donc d'usage du sol, à différents horizons temporels. Par conséquent, cette recherche vise précisément à analyser l'application d'un plan de TOD à l'échelle régionale, sur une série de nœuds et de corridors ferroviaires de la région expressément sélectionnés en fonction de leur potentiel de développement selon les principes du TOD. Du point de vue des outils, un intérêt supplémentaire est lié en outre au fait que la modélisation intégrée d'usage du sol et des transports à l'aide du logiciel Tranus, a été appliquée dans de nombreux cas et à différentes échelles spatiales, principalement en Amérique du Sud, mais beaucoup moins en Europe, en particulier à des échelles régionales. L'intérêt principal était donc d'appliquer Tranus dans l'étude d'une hypothèse de TOD régional en Europe. En particulier, suite à la définition et à la mise en œuvre d'un scénario de base, se référant à l'année 2009, un travail de recueil, d'élaboration et d'utilisation des données a été effectué ; suivi d'une calibration, avec l'objectif de reproduire une correspondance correcte entre les données observées et les données calculées par le modèle. Pour toutes les zones du modèle les résultats et les tendances d'évolution sont analysés en fonction de plusieurs paramètres et indicateurs fournis par le modèle, ayant trait par exemple à la répartition modale, aux niveaux de congestion, à l'évolution des dynamiques de choix de localisation résidentielle aux activités, ainsi qu'aux prix des terrains. La présentation détaillée des résultats de la modélisation sera objet du chapitre suivant.

5.1. La modélisation intégrée d'usage du sol et des transports, comme support aux stratégies de développement du territoire

L'étude et la reproduction dans un modèle des relations entre le système de transport et l'usage du sol, représentent un sujet largement traité par les modélisateurs spécialistes des méthodes de simulations.

Un Modèle d'Usage du Sol et des Transports (MUST) est une représentation théorisée et formalisée afin d'analyser un territoire dans ses aspects spatiaux, économiques et sociaux. (F. Leurent, 2012)

À travers l'utilisation de la modélisation intégrée d'usage du sol et des transports il est possible d'effectuer des simulations qui fournissent des prévisions relatives aux transports, à la localisation de la population, des activités et des emplois, ainsi qu'à l'estimation des évolutions des prix fonciers et immobiliers. Ce type de modélisation, qui a été développé à partir des années mille neuf cent soixante, permet en fait d'intégrer directement les informations sur l'usage du sol avec les données sur le système de transport, en donnant la possibilité de simuler leur interaction, sur un horizon temporel futur. Par modélisation intégrée on entend donc la capacité de modéliser l'offre et la demande d'un système de transport et le fonctionnement socio-économique d'un territoire, à travers la simulation des comportements des ménages et des emplois, ainsi que les effets structurant de l'offre de transport sur la composition spatiale de l'aire d'étude. Il s'agit de modèles capables de faire interagir ces deux systèmes et de reproduire ensuite les enjeux économiques d'équilibre entre offre et demande et également la dynamique concurrentielle qui existe dans les choix de localisation des ménages et des activités, en fonction de certains facteurs clés : l'accessibilité, les coûts de transport et les prix fonciers et immobiliers (Nguyen-Luong, 2012). Les modèles LUTI (*Land Use and Transport Integrated models*) requièrent de ce fait la définition de catégories de population, d'emplois et d'activités productives présentes sur le terrain d'étude.

« Le ménage est modélisé comme une entité décisionnelle, rationnelle, soumise à une contrainte budgétaire entre les dépenses (de logement, de transport, en autres consommations) et les revenus, parmi lesquels les revenus d'activité professionnelle. » (Laurent, 2012)

Pour cela, il est nécessaire de définir les caractéristiques physiques (infrastructures) et opérationnelles (services) du système de transport et des typologies d'usage du sol présentes, avec les surfaces disponibles et les prix fonciers ou immobiliers associés. Dans la plupart des cas,

le terrain d'étude est représenté en le subdivisant en zones discrètes et le facteur temporel est considéré en définissant aussi des intervalles discrets, d'une ou de plusieurs années.

En particulier Wegener (1995) a identifié trois méthodologies principalement utilisées pour étudier les impacts réciproques entre politiques de transport et usage du sol : la méthode des *préférences déclarées (stated preference)*, basée sur des entretiens directs qui interrogent les changements possibles dans les choix de localisation et de mobilité conditionnés à des changements dans les caractéristiques du système de transport et d'usage du sol ; la méthode des *préférences révélées (revealed preference)*, qui se base sur l'observation des habitudes des utilisateurs et de leurs évolutions dans différents contextes ; la *méthode mathématique*, laquelle se base sur la simulation à travers des modèles et des algorithmes mathématiques, des choix de mobilité et de localisation des utilisateurs (Lefèvre, 2009; Wegener, 1995). Les faiblesses de la première méthode concernent la causalité et les incertitudes des réponses relatives à des comportements dans des situations encore inconnues. La deuxième méthode, même si elle peut fournir des résultats fiables et précis, ne porte que sur des situations actuelles et donc ne donne pas d'indications totalement fiables sur des horizons temporels futurs. Enfin, les méthodes mathématiques assurent soit la possibilité d'étendre la simulation à des périodes futures et donc à des situations inconnues, soit de fournir des résultats quantitatifs et donc vérifiables (Lefèvre, 2009; Wegener, 1995).

“Les modèles mathématiques sont la seule méthode à travers laquelle les effets déterminants des facteurs individuels peuvent être analysés en gardant tous les autres facteurs fixes.”
(Wegener, 1995)

En focalisant donc l'attention sur cette dernière méthode, dans son compte-rendu sur les différentes approches, présentes dans la littérature relative à la méthode de simulation mathématique, B. Lefèvre (2009) utilise la classification proposée à l'origine par Wegener et Fürst (1999). En particulier les trois approches principales identifiées sont les suivantes :

- Une approche de type géographique et sociologique, basée sur la théorie de l'évolution de Darwin et orientée vers l'étude des dynamiques éco-socio-spatiales urbaines. Cette méthode fournit des résultats qualitatifs et ne peut pas simuler l'interaction entre transport et usage du sol.
- Une approche de type micro-économique des dynamiques urbaines, basée sur la théorie des interactions spatiales de Lowry (1964) et orientée vers l'étude des interrelations entre transport et usage du sol, mais avec une représentation de l'espace homogène et généralement monocentrique.

- Une approche de type opérationnel qui ne s'appuie pas sur une théorie spécifique, mais qui comprend généralement une modélisation des systèmes urbains de transports (modèle à quatre étapes), des modèles de choix discrets et un modèle de simulation intégré d'usage du sol et du transport.

En particulier, les systèmes de modélisation urbaine de transports sont utilisés pour prévoir des effets sur la demande de transport. Donc, ils simulent le processus de choix fait par les utilisateurs concernant les motifs du déplacement, le mode de transport et le parcours. Le modèle mathématique le plus commun utilisé dans ce domaine est le modèle dit à quatre-étapes, correspondant à une séquence de processus décisionnels qui couvre: l'émission des flux, la génération des flux origines-destination, la distribution de la demande de transport, le choix modal et de parcours. Pour cette typologie de modélisation, les données relatives à l'usage du sol doivent être ajoutées de manière exogène (Lefèvre, 2009). Les modèles de choix discrets se basent en substance sur la théorie des utilités aléatoires de McFadden (1973). Ce type de modèle représente un développement des modèles classiques de transport (de la Barra, 2013), introduisant un élément aléatoire, analysé à travers des modèles de probabilité de type *Logit* et *Probit* (McFadden, 1973).

En général, les différences dans les approches liées aux modèles LUTI (Wilson, 1997; Wegener, 2004) dépendent de la façon dont est étudiée l'évolution du système analysé. Les modèles *statiques* étudient une variable dans une période de temps fixe, en gardant inchangée les autres variables du système, tandis que les modèles *dynamiques* simulent explicitement l'évolution du système, compte tenu de différentes périodes de référence affectées par des changements dans le temps (DT, 2005). Les modèles dynamiques considèrent en fait l'hypothèse que les systèmes urbains sont toujours dans une situation de déséquilibre, due au fait que dans certains cas les changements de la demande et de l'offre (de transport ou d'usage du sol) se développent selon des temporalités très différentes. Ils sont définis également comme étant *quasi-dynamique* quand ils adoptent des méthodes de calcul de type récursif (Wegener, 2010). Parmi les modèles *quasi-dynamiques* on peut en outre distinguer: les modèles basés sur le principe de la maximisation de l'entropie (Wilson, 1970) et donc sur l'identification de la condition la plus probable d'équilibre; les modèles spatio-économiques, qui reposent sur la reconnaissance de la dimension spatiale des phénomènes socio-économiques (basés sur le modèle *entrée-sorties* de Leontief, que l'on illustrera en détail dans la suite); les modèles basés sur les activités (*activity based*) et sur leurs interactions et dynamiques de choix de localisation, desquels dérive la demande de transport (Homocianu, 2009).

La théorie des choix discrets ou des utilités aléatoires de McFadden (1973) est toutefois commune à tous les modèles LUTI, en permettant de modéliser le choix « à partir d'un ensemble

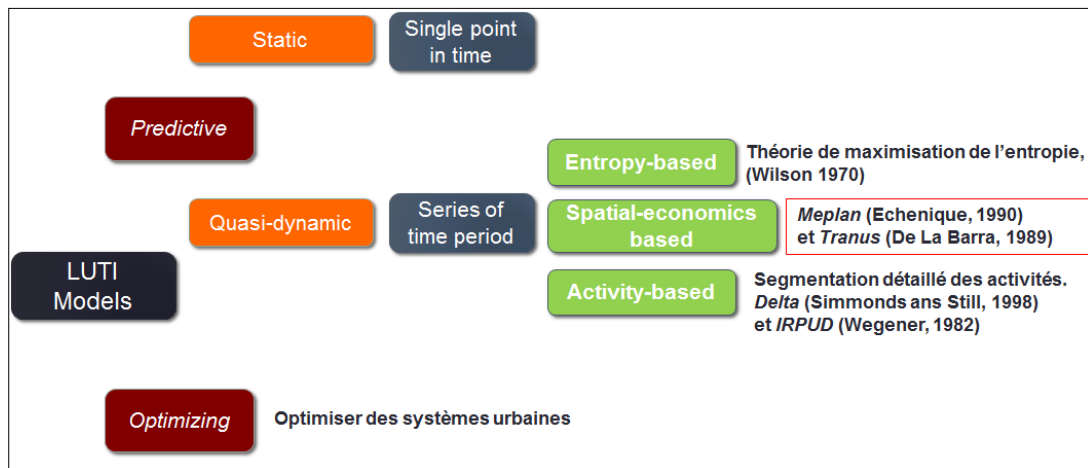


Figure 42: Classification des différents modèles intégrés d'usage du sol et transports.

d'alternatives mutuellement exclusives » (Nguyen-Luong, 2012). La probabilité de choix d'une alternative est donc proportionnelle à l'utilité associée aux différents attributs considérés par le décideur, selon le principe de la maximisation de l'utilité.

Wegener (2010) présente en outre une distinction en deux groupes de modèles : les modèles *unifiés* et *composites* (*unified and composite models*) ; en identifiant dans le premier cas ceux qui fusionnent tous les sous-systèmes présents et dans le deuxième cas ceux qui prévoient un système hiérarchique de sous-systèmes considérés, ou un couplage de modèles, qui sont interconnectés mais structurellement autonomes. Par rapport à la manière dont la localisation des activités et leur interaction dans l'espace sont mise en relation, on peut distinguer, en outre, les approches d' « *Interaction-Localisation* » (IL) et de « *Localisation-Interaction* » (LI) (DT, 2005). L'approche *IL* ou *intégrée* prévoit que les interactions économiques entre les activités déterminent leur localisation, en suivant un principe d'équilibre et permet de convertir ces interactions en demande de transport. L'approche *LI* ne prévoit pas un équilibre entre la localisation et les interactions des activités et nécessite d'être liés à un modèle de transport distinct (DT, 2005).

La littérature scientifique présente une large quantité de documents qui analysent les différents modèles LUTI utilisés et fournissent des comptes rendus et aperçus de leurs principales potentialités, faiblesses et caractéristiques opérationnelles (CERTU, 1996 ; DETR, 1999 ; NCHRP, 2002 ; Timmermans, 2003 ; DT, 2005 ; Hunt, et al., 2005 ; Zhao et Chung, 2006). Dans notre nous nous referons principalement à l'ouvrage de M. Wegener (2010) qui fournit une excellente synthèse des différentes méthodes utilisées et des avantages et inconvénients des principaux modèles LUTI, actuellement présents dans le domaine scientifique.

L'approche de modélisation intégrée d'usage du sol et des transports peut être synthétisée par l'idée de combiner et de lier les fonctions de prévision de la demande de transport à celles de l'estimation des dynamiques d'usage des sols et donc de la localisation des résidences et des

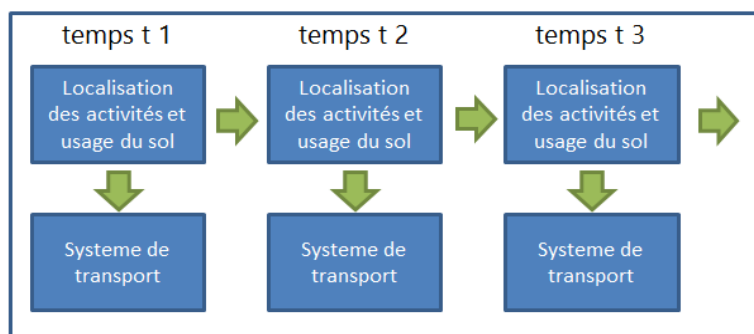
emplois, pour ensuite simuler les influences réciproques. Si les modèles de transport classiques prévoient l'insertion des données sur l'usage du sol de manière exogène, pour chaque horizon temporel simulé, les modèles LUTI peuvent directement générer les prévisions sur l'évolution de l'usage de sol, qui iront ensuite influencer le changement dans les niveaux d'accessibilité et donc dans le système de transport.

Parmi les théories à la base des modèles d'usage du sol et du transport on peut

distinguer une approche opérationnelle, basée sur la théorie des interactions spatiales (Lowry, 1964), ou sur la théorie de la maximisation de l'entropie (Wilson, 1970), dans laquelle les modèles d'usage des sols ont pour objectif l'étude des relations entre les différentes activités dans une zone localisée, sur la base de l'analogie avec la théorie gravitationnelle de Newton. Les travaux de microéconomie urbaine effectués par Von Thünen (1826), Wingo (1961) et Alonso (1964) représentent également un apport fondamental dans le cadre de l'étude des comportements des ménages par rapport à leur choix de localisation.

Les modèles économétriques *d'input/output* (*entrées-sorties*) sont normalement utilisés pour représenter les flux économiques qui existent dans le terrain d'étude, comme c'est le cas avec le logiciel de modélisation *Tranus* (T. de la Barra, 1989). L'ensemble de la structure de ces modèles *d'input/output* s'appuie sur des modèles économiques intégrés où la demande de transport est obtenue en fonction de toutes les relations économiques qui se produisent entre les activités productives présentes dans la zone d'étude. Le modèle *d'entrées-sorties* de Leontief (1941) divise donc le système économique régional en secteurs et prévoit que les produits d'une industrie peuvent être utilisés comme *input* pour un autre secteur productif ou consommés par le secteur final de la demande (qui peut inclure la population, les exportations les investissements, etc.) (Wilson, 1974). Les *inputs* de production industrielle peuvent aussi

Modélisation classique



Modélisation intégrée usage du sol - transport

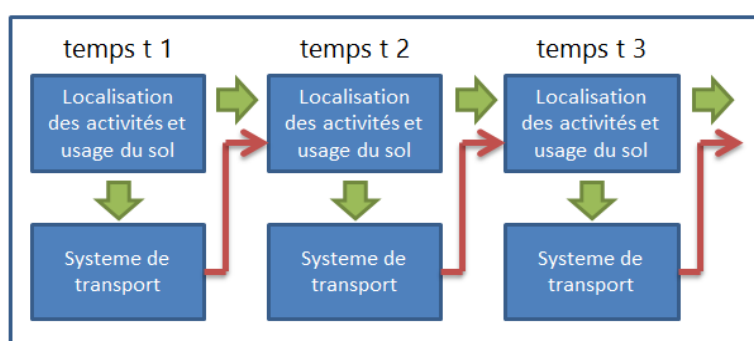


Figure 43: Modélisation classique et modélisation intégrée. (F. Lo Feudo; 2014)

provenir de l'extérieur du système économique régional, en représentant les entrées de type exogène (matière première, capitaux financiers, subsides publics, etc.) (Wilson, 1974). Sur cette base les entrées sont divisées en *produced inputs* et *primary inputs* et les sorties en *intermediate*

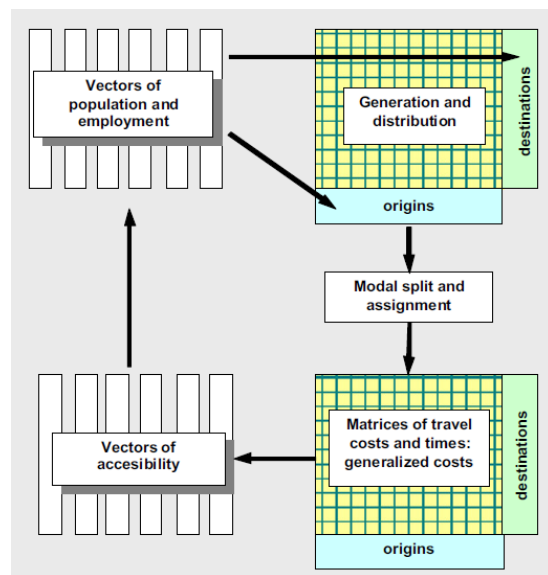


Figure 44: Structure de type vectoriel des modèles intégrés d'usage du sol et du transport (de la Barra, 2013)

et *final demand* (T. de la Barra, 1989). La demande intermédiaire est précisément une matrice dont chaque élément représente la quantité d'output d'un secteur de production, demandé pour la production d'un autre secteur d'activité (T. de la Barra, 1989). Une fois le calcul itératif complété et une fois la convergence des résultats réalisée, le modèle d'*input-output* fournit la quantité de production régionale requise pour satisfaire la demande de consommation totale (T. de la Barra, 1989).

La structure des modèles intégrés de transport et l'usage du sol peut être en outre de type *vector-based* ou bien *matrix-based* (T. de la Barra, 2013). C'est-à-dire, que dans le premier cas, les attributs du modèle relatifs à la population, à l'emploi et à l'usage du sol, sont représentés sous forme de vecteurs. Ces vecteurs sont utilisés pour estimer les matrices *Origines/Destinations* de la demande de transport, lesquelles sont désagrégés successivement pour chaque mode de transport et ensuite affectés sur le réseau. Cette approche relève une problématique d'agrégation (T. de la Barra, 2013) entre la matrice origines/destinations (O/D) et le modèle d'usage du sol, lequel reste sous forme vectorielle.

Dans l'approche de type matricielle, en utilisant comme base théorique le concept de la modélisation d'entrées et sorties (*input-output*) introduit par Leontief (194), les flux de biens et donc économiques, deviennent des flux des personnes, en gardant la forme matricielle. Ensuite à partir de la matrice O/D et des désutilités de transport (coûts généralisés de transport), les données peuvent rentrer dans le modèle

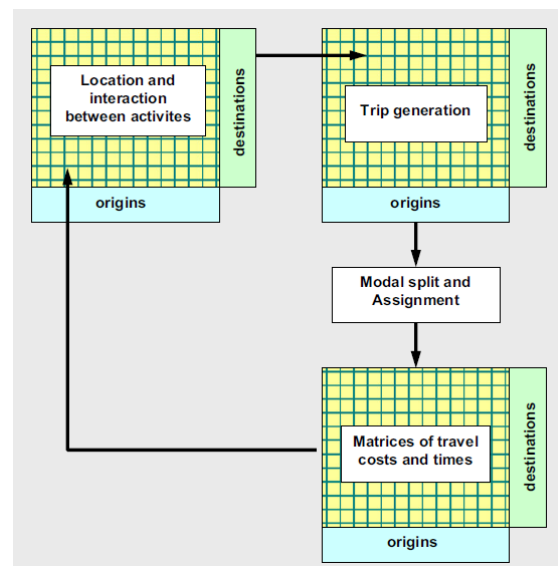


Figure 45: Structure de type matriciel des modèles intégrés d'usage du sol et transport (de la Barra, 2013)

d'usage du sol, sous forme de matrice, en évitant le problème d'agrégation présent dans l'approche vectorielle (T. de la Barra, 2013).

Cette structure de type *matrix to matrix* qu'on retrouve dans la formulation mathématique du logiciel de simulation *Tranus*, permet de renforcer la consistance de son algorithme et d'intégrer à l'intérieur du même modèle les calculs relatifs au système de transport et d'usage du sol⁵⁶. En conclusion on voudrait souligner les considérations d'A.G. Wilson (1997) et de H. Timmermans (2003). Le premier auteur considère la capacité de reproduction (*Reproductive capacity*) des données de référence comme une des caractéristiques les plus importantes d'un modèle LUTI ou MUST (Laurent, 2012) qui impose de disposer d'une approche et d'une expertise de type multidisciplinaire. Le deuxième auteur dénonce le fait que l'inclination particulière de la modélisation LUTI à traiter et soutenir des politiques de long terme et donc dans la pratique difficilement réalisables et gérables par les collectivités locales, ne représente pas une incitation à l'application de ce type de technique.

"[...] tant d'un point de vue académique qu'appliqué on peut soutenir qu'il existe un manque d'incitations à être fortement impliqué dans ce domaine de recherche." (Timmermans, 2003)

5.1.1. Réflexions sur l'applicabilité et sur le potentiel d'apport aux décideurs de la modélisation intégrée

Plusieurs chercheurs, dont F. Laurent (2012), observent cependant que la modélisation LUTI ou MUST représente un outil qui peut être appliqué pour répondre aux problèmes et aux questionnements typiques des aménageurs et des urbanistes, par ses potentialités et par sa capacité tant de spatialisation que de décomposition des temporalités et des différents aspects comportementaux des acteurs qui contribuent à l'évolution des territoires. Ce type de modélisation peut permettre une analyse globale et inclusive, en particulier pendant la démarche décisionnelle touchant à la localisation des services, ressources ou activités, ainsi que pour l'identification des configurations spatiales de développement à envisager. L'objectif est de maximiser la potentialité d'interaction entre la fonction de connexion fournie par les réseaux de transport et les multiples dynamiques de fonctionnement territoriaux, ainsi que d'optimiser les objectifs de durabilité économique, environnementale et sociale des projets de développement urbain et régional.

⁵⁶ Pour une explication détaillée de cette caractéristique spécifique de solidité du modèle *Tranus*, on renvoie aux travaux de B. Lefèvre (2009).

“D'un point de vue technique, les perspectives sont excellentes. Des ordinateurs plus puissants peuvent éliminer les anciens obstacles à l'augmentation de la résolution spatiale, temporelle et matérielle des modèles.” (Wegener, 2010)

En même temps en France comme dans toute l'Europe l'utilisation de ce type de modèles est encore limitée. En outre, l'application de la modélisation LUTI par des collectivités ou des bureaux d'études professionnels est très rare, avec des expériences qui se concentrent presque exclusivement dans le domaine de la recherche (Nguyen-Luong, 2012).

En ce qui concerne les applications quantitatives, on constate au plan international une disparité entre les pays anglo-saxons mais aussi latino-américains et extrême-orientaux, où des MUST sont appliqués pour la plupart des grandes métropoles et parfois à des échelles territoriales plus larges, et d'autres pays dont la France, où les rares applications restent des expérimentations portées par des laboratoires de recherche. (F. Leurent, 2012)

Nombreuses sont, en outre, les critiques qui dans le monde scientifique sont adressées à cette technique de modélisation, notamment au sujet de sa complexité, des faibles progrès accomplis par rapport aux théories traditionnelles de localisation et de transport et de leur caractère de *boîte noire (black box)* (Timmermans, 2003). Berechman et Small (1988) identifient aussi dans leur faible capacité à reproduire l'effet d'agglomération, une importante faiblesse des modèles LUTI. P. Waddell (2002) toutefois affirme que les évolutions technologiques des dernières décennies dans l'informatique (notamment le développement des Systèmes d'information géographique (SIG) ont apporté d'énormes bénéfices à la modélisation LUTI, par rapport surtout à la capacité de désagrégation des calculs et des résultats (en stimulant le développement de la technique de microsimulation défendue par Waddell, qui n'est pas traitée dans cette thèse).

Plusieurs laboratoires de recherche en France ont tenté d'aborder la thématique de la modélisation intégrée d'usage du sol et du transport. De plus en 2011, la Société du Grand Paris (SGP) a publié un appel d'offre pour l'application d'une modélisation LUTI, concernant les effets de la mise en place du projet du Grand Paris sur les dynamiques de fonctionnement de la région Île-de-France. Les modèles *Mussa*, *UrbanSim* et *Relutran* ont été utilisés dans le cadre de cette recherche, avec un bilan qui, pour le moment, ne semble pas être très positif, surtout à cause de problèmes de « *zonages incompatibles, [...] de calage approximatif sujet à caution, de confusion entre modèle explicatif (travail de l'économètre) et modèle prédictif (travail du modélisateur), et d'absence de tests de sensibilité* » (Nguyen-Luong, 2012). Une autre expérience très intéressante est celle du projet CITiES (*Calibrage et validation de modèles Transport – usage des Sols*), qui a démarré début 2013, avec le but de développer des théories et méthodes de support à la

calibration des modèles LUTI. Plusieurs opérateurs et laboratoires français de recherche (IAU, IDDRI, IFSTTAR, INRIA, LET, LVMT, Vinci) ont été associés par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) dans le cadre de son programme «*Modèles Numériques*». Le projet voit, en outre, le support de Tomás de la Barra et Paul Waddel, qui sont les concepteurs et créateurs respectivement des modèles *Tranus* et *UrbanSim*.

« Ce qui retarde aujourd'hui la diffusion de ces modèles dans le milieu professionnel, c'est d'abord la disponibilité d'un logiciel au sens commercial du terme, permettant une démarche complètement intégrée de la double modélisation de trafic et de l'occupation du sol. [...] Une recommandation est de renforcer le dialogue entre les ingénieurs - modélisateurs et les expert-métiers sectoriels ou disciplinaires de l'aménagement (démographes, économistes, spécialistes du logement, urbanistes, géographes). » (Nguyen-Luong, 2012)

Dans le cadre du colloque « Mobilités et dynamiques des localisations. Où en est la modélisation ? », organisé par le CERTU en 2011, plusieurs acteurs du monde de la recherche, professionnels, spécialistes de l'aménagement et représentants des collectivités, ont pu discuter sur les potentialités et l'utilité de la modélisation intégrée d'usage du sol et des transport, notamment en appui des élus, des décideurs et des responsables des politiques de transport et d'urbanisme. En analysant les conclusions de cet intéressant colloque, plusieurs difficultés émergent dans la diffusion de l'usage de ce type d'outil au sein des collectivités territoriales.

La complexité intrinsèque dans la conception et l'implémentation des modèles et la nécessité d'une approche très spécialisée et multidisciplinaire, posent en fait un problème d'ingénierie et donc de compétence, ainsi qu'un problème de temporalité, de reproductibilité et de partage entre chercheurs et décideurs, sur les objectifs et questions à poser à la modélisation (CERTU - PST Rhône-Alpes, 2011). Ces problématiques se répercutent ensuite dans la difficulté à créer, des partenariats entre plusieurs maîtres d'ouvrages, consacrés à l'implémentation des modèles LUTI. La question de la pédagogie et donc de la façon de présenter par les modélisateurs ce type d'outil aux décideurs et aux élus, apparaît également très importante, par trouver des points de rencontre entre différentes sensibilités et contextes professionnels, ainsi que de bien clarifier quel type de réponses il est possible fournir à leurs questions, dans quelle temporalité et avec quel niveau de précision.

«[...] c'est qu'il faut bien dire également aux élus, aux techniciens, aux habitants, ce que sont les limites d'utilisation des modèles. Il y a des modèles pour chaque question et ce n'est pas la peine de rêver à un modèle qui répondrait à toutes les questions. Cela n'existe pas. Après, concernant

la simplification, à un moment on peut rêver à un modèle simple et il faut aussi expliquer qu'il y a une complexité du système qui fait qu'il faut l'appréhender pour poser des actions pertinentes. » Stéphane Gusmérioli⁵⁷ (CERTU - PST Rhône-Alpes, 2011)

Dans la présente recherche de doctorat, sur la base des réflexions qui viennent d'être exposées, l'avis et les recommandations des acteurs et des décideurs qui s'occupent, dans les collectivités territoriales du Nord-Pas-de-Calais, de la définition des politiques d'urbanisme et transport a été considéré avec beaucoup d'attention. Dans les conclusions du prochain chapitre, relatif aux résultats de la modélisation, sera exposée en détail, la façon dont ont été organisés des échanges avec des acteurs régionaux, notamment avec des représentants de l'Agence d'Urbanisme de Lille Métropole et de la Mission Bassin Minier du Nord-Pas-de-Calais, pour discuter et échanger sur l'apport et l'intérêt du travail de modélisation, exposé dans le cadre de cette thèse.

Il existe des expériences d'application des modèles LUTI ou MUST qui méritent d'être citées, notamment utilisant le logiciel *Tranus* utilisé en cette recherche. Le bureau d'étude belge STRATEC, par exemple, a appliqué *Tranus* dans l'implémentation d'un modèle pour l'étude du projet RER de Bruxelles (Gaya, 2011). Ce travail, mené dans le cadre du projet de recherche européen SCATTER (Gayda, et al., 2005), avait comme objectif l'analyse de la relation entre l'étalement urbain et le transport, avec un intérêt spécifique pour l'étude des effets conséquents de l'implémentation du projet de RER à Bruxelles. Sylvie Gayda⁵⁸, en présentant ce travail, signale que les résultats du modèle ont confirmé les doutes des autorités de la Région bruxelloise, sur le risque de favoriser l'étalement urbain avec l'amélioration de l'accessibilité entre le centre et la périphérie, découlant de la mise en place du service de RER. Il s'agit donc d'un cas où la modélisation intégrée d'usage du sol et du transport a été un support à la réflexion et à l'aide à la décision des opérateurs de transport. Ensuite, la Région bruxelloise, a réutilisé le même outil dans le cadre du Plan de déplacement de la Région (CERTU - PST Rhône-Alpes, 2011).

« Mais l'étude a sûrement permis aux autorités de la Région bruxelloise de mieux se rendre compte des risques par rapport à leur crainte d'avoir une migration forte des ménages. Cela les a aidées ensuite, dans le contexte institutionnel : car cela a été un outil dans la négociation qu'il y a eu, et qu'il y a même parfois encore, entre la Région bruxelloise et l'État fédéral sur les modalités de mise en œuvre du RER. » Sylvie Gaya (CERTU - PST Rhône-Alpes, 2011)

⁵⁷ Syndicat mixte des transports en commun /Communauté d'agglomération de Grenoble (Direction de la Mobilité et des Transports - Service Études et développement)

⁵⁸ Directrice d'étude du bureau d'étude STRATEC

Le travail de modélisation effectué sur l'aire urbaine de Grenoble et mené par des chercheurs de plusieurs laboratoires, notamment l'IDDRI, l'INRIA et le STEEP, en utilisant le logiciel *Tranus* est digne d'intérêt. Il s'agit d'un travail de modélisation qui a été mis en place avec l'objectif d'étudier les dynamiques urbaines de périurbanisation dans le cas grenoblois, avec une attention particulière à la thématique énergétique et à l'analyse économique des politiques climatiques. Ont été en fait analysées les potentialités de réduction des émissions de CO², en fonction de la mise en place de différents programmes et mesures de planification, en permettant donc de finaliser pour la première fois en France une modélisation intégrée d'usage du sol et des transports à l'échelle urbaine avec *Tranus* (Sujot, 2013). Avant le travail grenoblois il y avait eu une autre tentative d'application de *Tranus* en France, effectuée à Lyon par le CERTU et marquée par un échec⁵⁹, qui a de fait contribué à retarder la diffusion et l'usage de ce logiciel en France et peut être dans le reste d'Europe. Les deux cas de Bruxelles et Grenoble sont certainement des expériences qui ont alimenté avec profit le travail de réflexion, de conception et d'implémentation du modèle *Tranus* pour la région Nord-Pas-de-Calais, objet de notre doctorat. Par contre, la différence d'échelle entre le modèle présenté dans ce travail de thèse, qui est un modèle régional et les modèles décrits auparavant (qui se réfèrent à l'échelle urbaine et métropolitaine), a impliqué une différence substantielle dans la modalité de conception des hypothèses de base, de manipulation des données d'entrée et de représentation du terrain d'étude dans l'interface du logiciel de simulation *Tranus*, due essentiellement à l'approche multi scalaire (urbain, métropolitaine et régionale).

5.1.2. Le choix du logiciel de simulation intégré *Tranus*

Dans le cadre du travail de doctorat, l'outil *Tranus* et plus généralement la modélisation LUTI, a été considéré comme étant la méthode la plus adaptée et cohérente dans l'optique de tester l'applicabilité et la potentialité de certains modèles et politiques de développement urbain innovants et de caractère intégré. C'est le cas des politiques de *Transit Oriented Development* (Calthorpe, 1993; Cervero, 1998; Bartolini, et al., 2009) ou d'*urbanisme orienté vers le rail* (L'Hostis, 2009; Leysens, 2011), qui prévoient une densification urbaine le plus possible structurée et axée autour des réseaux de transport collectif, en promouvant les principes de qualité du design urbain, de mixité fonctionnelle, de priorité aux modes de transport actifs et d'accessibilité vers les transports collectifs, avec des objectifs de réduction de la circulation automobile et de l'étalement urbain.

⁵⁹ <http://www.iau-idf.fr/ultisim/spip.php?rubrique116>

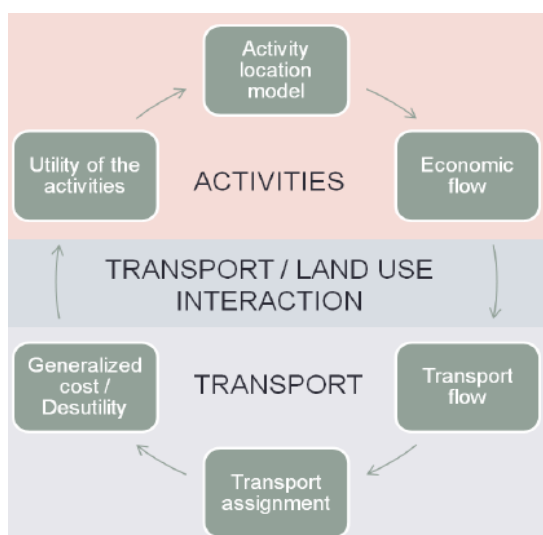


Figure 46: La boucle d'interaction dans Tranus (Pupier, 2013).

Effectivement, les caractéristiques et potentialités de représentation multi scalaire propres du logiciel intégré *Tranus*, qui a été beaucoup plus exploité dans les pays de l'Amérique du Sud et d'Asie qu'en Europe, représentent le facteur qui a influé de manière décisive le choix du logiciel pour ce travail de modélisation. Le fait, en outre, que *Tranus* soit diffusé sous forme de logiciel libre avec un support continu et direct par ses créateurs à travers un forum en ligne⁶⁰, a également pesé dans le choix d'appliquer ce logiciel. Il faut

préciser aussi que dans l'environnement scientifique du laboratoire de recherche LVMT et du département de planification territoriale de l'Université de Calabre (Italie)⁶¹, des chercheurs avaient déjà développé une expertise sur la modélisation LUTI en général et également sur le logiciel de simulation *Tranus*. De ce fait, il a été possible de bénéficier d'une aide et d'un soutien pour la conception et à la mise en œuvre du modèle, ainsi qu'à l'élaboration des résultats finaux⁶². *Tranus* se distingue en particulier par sa faculté à intégrer plusieurs approches théoriques différentes⁶³ dans une structure unique, qui représente tant les phénomènes liés aux transports que ceux liés à l'usage du sol. Parmi les fondements théoriques de *Tranus* on retrouve d'abord la théorie de la base économique de Lowry (1964), laquelle repose sur l'idée qu'un système territorial se développe autour d'un moteur économique qui représente le centre attractif et générateur d'emplois. Le modèle *input-output* (Leontief, 1936) permet de définir dans *Tranus* les relations entre consommation et production, pour les secteurs d'activité considérés, selon des fonctions de demande qui peuvent être inélastiques ou élastiques (en fonction du prix). Une autre théorie d'appui à la structure du logiciel *Tranus* est la théorie micro-économique de l'utilité aléatoire (*random utility*) de McFadden (1973). Grâce à cette théorie il est possible de définir les comportements de choix des consommateurs (choix du parcours,

⁶⁰ <https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!forum/tranus>

⁶¹ Ce travail de thèse a été en fait mené dans le cadre d'une convention de cotutelle entre le laboratoire LVME (Unité mixte de recherche de l'Ifsttar) et l'Université de Calabre en Italie.

⁶² En particulier N. Coulombel et F. Leurent de l'LVMT et les ingénieurs A. Vitale et M. Tucciarelli de l'Université de Calabre

⁶³ La macro économie spatiale (*Von Thunen*), le modèle gravitationnel et de l'entropie (*Lowry, Wilson*), le modèle comptable *input/output* (*Leontief*), le modèle d'utilité aléatoire et choix discrets (*McFadden*), l'algorithme du plus court chemin (*Dijkstra*).

choix modal, choix de localisation, etc.) en fonction de l'utilité attribuée à toutes les options disponibles (Gaya, 2011).

En substance *Tranus* est un logiciel de modélisation intégrée d'usage du sol et du transport, qui présente une approche basée sur l'équilibre général, obtenu à travers l'interaction entre la demande et l'offre (de transport, foncière ou immobilière). *Tranus* est basé essentiellement sur un modèle *logit* emboîté multinomial⁶⁴ (T. de la Barra, 1989) et est un modèle spatial *d'entrées-sorties*, de type agrégé, basé sur l'équilibre en fonction des prix et du temps (CETE Normandie Centre, s.d.).

Tranus inclut, en fait, un sous-modèle *transport* (qui s'occupe de la génération et affectation de la demande de transport, de la définition de la répartition modale et des niveaux de congestion) et un sous-modèle *d'activité* (qui simule la localisation et l'interaction entre les activités et l'usage du sol).

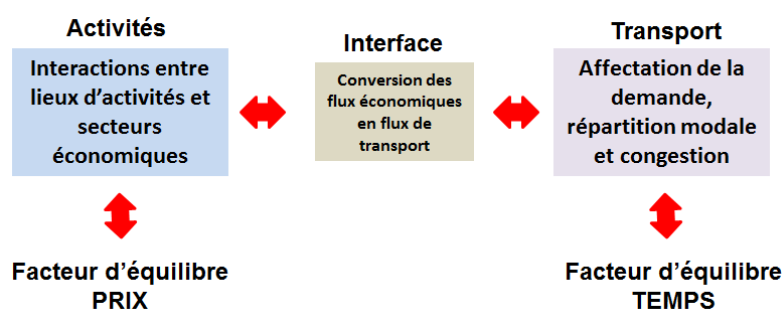


Figure 47: Interaction entre les modules de *Tranus* et facteurs d'équilibre. (F. Lo Feudo; 2014)

Un module d'interface simule les interactions entre les deux, en utilisant comme paramètres d'équilibre respectivement le temps de déplacement et/ou d'attente et le prix foncier et/ou immobilier. Le modèle d'activité ou d'occupation du sol est du type économique-spatial discret et consiste dans le calcul de la demande totale, à travers une matrice *input-output*, qui est ensuite distribuée dans les zones du modèle selon le principe de la maximisation de l'utilité (coût de localisation et coûts de transport). Comme nous l'avons expliqué précédemment, la consommation de chaque type d'usage du sol est définie à travers des fonctions de demande élastiques, en fonction du prix. Pour certains secteurs d'activité la fonction de demande peut être complètement inélastique, tandis qu'il est possible que certains secteurs d'activité consomment la production de différents secteurs productifs, précédemment déclarés comme *substitutes* ; c'est-à-dire que chaque activité et catégorie de population peut choisir entre une série des choix différents de localisation (différents type d'usage du sol et de typologie immobilière) (Johnston & de la Barra, 1998).

“En substance, deux types de choix peuvent être définis: choix de localisation pour répartir la production transportable aux zones de production depuis une zone de consommation ; les choix de substitution dans lequel il y a un choix entre la production de plusieurs secteurs de production.

⁶⁴ Nested multinomial logit model.

Typiquement les substitutions sont définies pour les secteurs non-transportables, liées à un choix de localisation. Dans les deux cas, localisation et substitution, une fonction d'utilité est définie comme la somme des prix de localisation et des prix d'ajustement" (T. de la Barra, 2013)

Le modèle est donc capable de reproduire le mécanisme de compétition propre du marché foncier ou immobilier. Le système d'activité et les transports se développent dans une dynamique de relation entre demande et offre, pour laquelle si, par exemple, la demande de logement augmente dans une zone spécifique, sans ouverture de surface nouvelle à l'urbanisation, le prix du sol augmente, tandis que dans le domaine du transport, si la demande de transport augmente sans que la capacité soit accrue, alors il y aura aussi une augmentation de la congestion et donc du temps de déplacement. *Tranus* permet donc de reproduire et simuler dans le temps l'évolution de cette intégration entre système de transport et usage du sol. Le fonctionnement du modèle transport commence par la définition de la matrice *Origines-Destinations* initiale, par la transformation des flux économiques en flux de transport, effectuée à travers la matrice *input-output*. Ensuite la demande de transport est distribuée sur le réseau en fonction des désutilités de transport, qui comprennent des facteurs monétaires (tarif, péage, coût de l'énergie, coût de transfert entre modes de transport, etc.) et non monétaires (valeur du temps d'attente, pénalités en fonction du mode et de la catégorie de transport) et des rapports volume/capacité, donc des niveaux de saturation du réseau, qui sont recalculés à chaque itération. Le modèle est constitué par des zones, par des catégories de transport et de population et par des secteurs d'activités. Pour chaque zone du modèle et pour chaque secteur d'activité, les valeurs de production et de demande, de type exogène et induit, sont définies. Il s'agit des importations et exportations relativement au terrain d'étude, des contraintes de production, les coûts de consommation et production et des prix d'équilibre. Les secteurs exogènes sont uniquement consommateurs d'input provenant de l'extérieur de la zone d'étude. Les secteurs d'activités endogènes sont, par contre, sont consommateurs ou producteurs et représentent les secteurs induits par la production de type exogènes. Le mécanisme de localisation et distribution des ménages et des emplois dans l'espace, suit le principe de la minimisation du coût généralisé d'implantation et donc de la maximisation de la fonction d'utilité. La fonction d'utilité inclut donc à la fois les coûts généralisés de transport et les coûts de localisation. Cette structure de modélisation possède la capacité de reproduire certaines dynamiques typiques, comme le fait que se localiser dans les zones ayant une densité d'emplois élevée implique une réduction des coûts de transport, alors que se localiser dans une zone moins dense induit une diminution des coûts de localisation et une augmentation des coûts de transport, par exemple pour les déplacements domicile-travail. Grâce à la possibilité de

reproduire ces dynamiques dans le temps, le modèle peut par exemple définir des coûts généralisés de transport en fonction de la charge de trafic sur le réseau.

Tranus permet ainsi de représenter le système de transport de manière très détaillée, en tenant compte des contraintes de capacité et de congestion. Le modèle transport est caractérisé par une catégorisation des utilisateurs du système transport et des motifs de déplacement, permettant d'affecter la demande sur un réseau de type multimodal et spatialisé. Le modèle d'interface est représenté par une matrice *input-output*, laquelle a donc la fonction de gérer l'interaction entre les flux économiques et les flux de transport et qui, en substance, transforme les interactions entre les activités économiques et productives qui se déroulent à l'intérieur de la zone d'étude, en demande de transport.

*« Dans *Tranus* le modèle original d'entrée-sortie a été généralisé à tous les secteurs qui participent à la dynamique urbaine, comme le sol, les activités, la population et le transport. Ainsi, la dimension spatiale a également été ajoutée et intégrée avec le système de transport » (Lefèvre, 2009)*

Le modèle permet donc de reproduire les flux économiques, de les transformer en flux de transport et ensuite de calculer les coûts et les désutilités de transport qui vont influencer sur le modèle d'activité dans les temps de simulation successifs, en reproduisant un système de boucles de rétroaction. Dans *Tranus* les s de transport et d'usage du sol vont donc s'influencer mutuellement et de manière intégrée, selon la boucle reproduite sur la Figure 46.

« [...] si le modèle est appliqué pour la localisation des ménages et des emplois, les transports influenceront à la fois le volume et la localisation des ménages et des emplois, ainsi que les prix du foncier par l'intermédiaire du mécanisme d'ajustement des prix. » (CETE Normandie Centre, s.d.)

En définitive, les données à entrer dans le logiciel *Tranus* touchent à la localisation des activités, de la population et aux comportements relatifs aux choix de localisation, ainsi qu'aux caractéristiques d'usage du sol (surfaces disponibles par type d'usage et prix de location) et du système de transport de la zone d'étude (lignes de transport en commun, types d'infrastructures de transport disponibles). Les acteurs et les secteurs qui sont en relation avec le sous modèle d'occupation du sol, se localisent en fonction des valeurs d'accessibilité et de l'évolution des prix fonciers, donc en fonction du niveau d'attractivité de chaque zone du modèle.

«Le modèle est essentiellement un grand ensemble d'équations de demande dépendantes de type logit multinomial, intégrées dans des algorithmes pour accomplir l'équilibre » (Johnston & de la Barra, 1998)

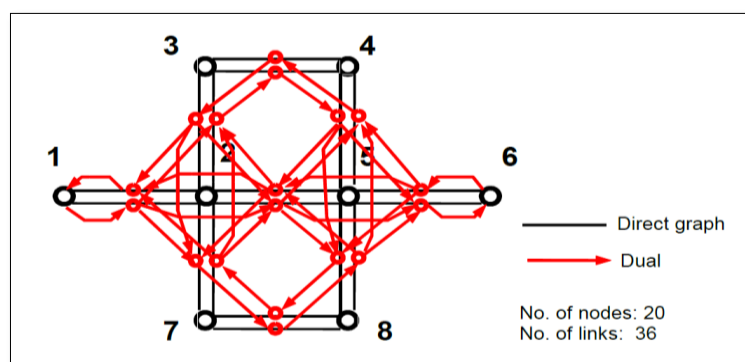


Figure 48: Représentation du graph direct et du graph duale généré par *Tranus* (Modelistica, 2013)

Une autre caractéristique fondamentale du modèle *Tranus* est l'inclusion d'un modèle de substitution de type *Logit*. Pour chacune de ces possibilités de choix, un ordre de préférence est défini, qui permet de mieux reproduire la modalité de

choix de localisation dans le terrain d'étude. De toute façon, toutes les dynamiques de choix, qu'il s'agisse de transport ou de localisation, présentes dans le modèle sont réglées selon la théorie de l'utilité aléatoire, ce qui veut dire qu'elles sont effectuées en fonction de la maximisation d'une utilité. *Tranus* prévoit, en outre, une modalité de représentation du réseau de transport différente des autres modèles de transport. J.Anez, T. de la Barra et B. Perez (1996) ont développé en fait une méthode pour représenter des réseaux de transport complexes et caractérisés par des restrictions de changements de direction (par exemple tourne à gauche interdit pour les voitures) et des transferts multiples : il s'agit de la technique du *graph dual* (Anez, et al., 1996). Le réseau de transport dans *Tranus* est donc représenté sous forme d'un graphe dual (généré automatiquement par le modèle), dans lequel les nœuds représentent les sections routières, et les liens, les intersections ; les connexions et les transferts internes à chaque nœud sont transformés en connecteurs (*links*) internes. Grâce à cette méthode, la définition des interdictions et des hiérarchies dans les intersections, ainsi que les transferts intermodaux sont simplifiés (Modelistica, 2013). La possibilité de créer des scénarios de simulation à différents horizons temporels, permet ensuite de tester et d'évaluer les effets sur le terrain d'étude de certaines hypothèses d'évolution, relatives tant à l'offre de transport qu'aux modalités d'usage du sol. Une fois que sont fixés également les horizons temporels de simulation pour chaque scénario, le modèle peut être activé et donc fournir ses résultats. Les principales sorties du modèle *Tranus* concernent la localisation des résidences et des activités dans la zone d'étude, l'évolution des prix du sol et des flux de trafics sur le réseau de transport, ainsi que la répartition modale de la demande. Ils permettent de ce fait d'étudier différentes situations et contextes, relatifs par exemple à l'introduction d'une nouvelle infrastructure de

transport ou ligne de transport en commun, à la modification du système de tarification ou de réglementation du stationnement des voitures ainsi que des politiques fiscales foncières et immobilières et donc des stratégies d'usage des sols.

5.1.3. La calibration du logiciel de modélisation *Tranus*

La calibration consiste dans l'ajustement de certaines paramètres et indicateurs du modèle, qui ne sont pas estimables empiriquement, dans le but de reproduire de manière acceptable les données d'entrée observées. *Tranus*, en particulier, permet de calibrer séparément les indicateurs du modèle transport et ceux du modèle d'usage du sol.

“La calibration toutefois, n'est pas simple, à cause du grand nombre de variables de calage, qui sont internes au modèle et qui sont également des entrées pour les autres sous-modèles. En raison de la complexité du modèle, la calibration ne peut pas être jugée par une statistique de type goodness-of-fit et doit être faite avec jugement [...]. Le calibrage peut prendre des semaines d'effort.” (Johnston & de la Barra, 1998)

En particulier, dans *Tranus* l'objectif est celui d'atteindre la convergence dans le processus de calcul itératif des prix, des flux et des variables relatives à la production. On cherche en fait à reproduire une correspondance entre les variables des prix et des productions observées et ceux calculées. Simmonds (1994) a identifié spécialement les désavantages les plus importants des modèles LUTI (comme *Tranus*) dans les difficultés relatives au processus de calibration.

“Il n'y a eu pratiquement aucun progrès dans la méthodologie pour calibrer les modèles dynamiques ou quasi-dynamiques.” (Wegener, 2010)

Le processus de calibration de *Tranus* n'est pas totalement automatisé et permet la correction de certains paramètres à travers des facteurs d'ajustement. Dans le détail, une fois que les valeurs d'entrées, relatives aux valeurs de production, aux prix fonciers et aux flux de transport ont été introduites dans le modèle, la sortie du processus de calibration prend la forme d'une série de facteurs d'ajustement, qui doivent respecter des limites de convergence précédemment fixées (Dutta, et al., 2012). Les variables qui dans le manuel de *Tranus* sont définies comme les *prix d'ajustement (shadow prices)* sont en fait des facteurs correctifs, donc des « *erreurs* », qui sont ajoutés où soustraits aux prix de référence du scénario de base, pour redéfinir la situation d'équilibre des scénarios successifs. Si le modèle dans une zone particulière reproduit des valeurs de production supérieures aux valeurs d'entrée, il y aura une augmentation des prix

d'ajustement (*shadow prices*) et une diminution de la probabilité de se localiser dans cette zone. Si le modèle reproduit une valeur de production inférieure à la valeur observée, il y aura une diminution du prix d'ajustement, avec un effet contraire sur la probabilité de localisation. Les prix d'ajustement peuvent suppléer également à la moindre fiabilité et précision qui concerne généralement l'estimation des prix fonciers et sont calculés par le modèle à travers un processus itératif qui s'arrête quand une convergence convenable est atteinte, entre les données observées et les données reproduites par le modèle. Théoriquement les *shadow prices* doivent être nuls si le modèle arrive à reproduire parfaitement la réalité, mais dans la pratique on peut considérer acceptable pour attester la convergence du modèle, des valeurs de prix d'ajustement dans la limite de 15% - 20%.

«Si le modèle ne converge pas, cela signifie qu'il y a quelque chose dans les données et/ou dans les fonctions qui cause le problème. C'est généralement facile à voir en regardant dans les prix d'ajustement. Un prix d'ajustement supérieur à du 15% signifie une erreur. Regardez les données et les fonctions, en activant l'option freeze. [...] Ce que vous voulez est que les prix d'ajustement soient tous à moins de 15% et que données d'entrée et valeurs modélisées correspondent. Dans ces circonstances votre modèle converge bien.» (T. de la Barra, 2013)⁶⁵

C'est en fait la variance des *shadow prices* qui doit être vérifiée dans la phase de calibration (les valeurs absolues ont une moindre importance) ; en présence d'une valeur excessivement élevée de variance, on risque d'attribuer trop d'importance aux prix d'ajustement dans les choix de localisation. Le modèle procède donc à un calcul itératif pour résoudre la chaîne de consommation et de production du modèle *input-output*. La première itération consiste dans le calcul de la production induite à partir de la production exogène initiale (les prix d'ajustement sont égaux à zéro dans la première itération). Dans les itérations successives, à partir de la production exogène et induite de l'itération précédente, une nouvelle valeur de production induite est calculée et si nécessaire le modèle génère des *shadow prices*, qui peuvent être à la hausse ou à la baisse. Ce processus s'arrête une fois que toute la production est calculée et localisée dans les zones du modèle.

“Il a été constaté que, si pendant la calibration Tranus converge, puis avec une forte probabilité le processus de calibration est vérifiée. De plus, une faible corrélation a été trouvée entre les entrées et les sorties du processus de calibration.” (Dutta, et al., 2012)

⁶⁵ Cette citation est un extrait d'une conversation eu en ligne, sur le Google forum de Tranus, avec le professeur Tomás de la Barra, concepteur du logiciel de simulation Tranus.

Pour une explication approfondie des relations entre les indicateurs présents dans l'interface du logiciel *Tranus* et les équations qui composent la structure mathématique de *Tranus*, on renvoie aux travaux de M. Vadon (2011), E. Ferrante et E. Iarussi (2010) et bien évidemment aux documents fournis sur le site internet officiel du logiciel *Tranus*⁶⁶. Par rapport à la propagation des incertitudes pendant le processus de calibration du logiciel *Tranus*, on renvoie à l'étude menée par les chercheurs de l'INRIA de Grenoble et de l'IDRI de Paris, en utilisant la méthode Monte Carlo et une méthodologie de vérification de type probabiliste (Dutta, et al., 2012). En conclusion de ce paragraphe nous citons la Directrice d'étude du bureau d'étude STRATEC, Sylvie Gayda, qui explique très clairement la difficulté, la complexité et l'incertitude qui sous-tendent un travail de modélisation intégrée d'usage du sol et du transport et notamment la phase de calibration du logiciel *Tranus*.

« Ça prend du temps. Les données existent mais il faut du temps pour les recueillir, le temps de se les approprier, de les traiter. Le plus important, c'est le temps de calibrage du modèle. [...] Pour l'étude sur Bruxelles, pour cette zone donc de 3 millions d'habitants, cela a pris de l'ordre d'un an, voire plus, pour avoir un premier calibrage, une première reconstitution raisonnablement satisfaisante, avec une équipe de quelques personnes. Ensuite, on peut commencer à faire des simulations et, ce qui arrive très classiquement, au cours des premières simulations, c'est que l'on se dise « ce résultat ne me paraît pas bon, il y a un paramètre qui doit être réajusté ». Donc, c'est vraiment un travail lourd mais, par contre, l'outil existe et à part cette question des ressources, je ne vois pas de raisons de ne pas se lancer dedans, si on est intéressé par l'évaluation des impacts des politiques. » (Sylvie Gayda, 2010).

⁶⁶ www.tranus.com

5.2. Hypothèses de base, données, structure générale et implémentation du modèle *Tranus* pour la région Nord-Pas-de-Calais

Pour le découpage du zonage considéré dans le modèle, a été suivi l'objectif de représenter le fonctionnement régional, en arrivant à reproduire les différentes polarités urbaines et en projetant les directions de développement d'une éventuelle dynamique de TOD. Dans cette

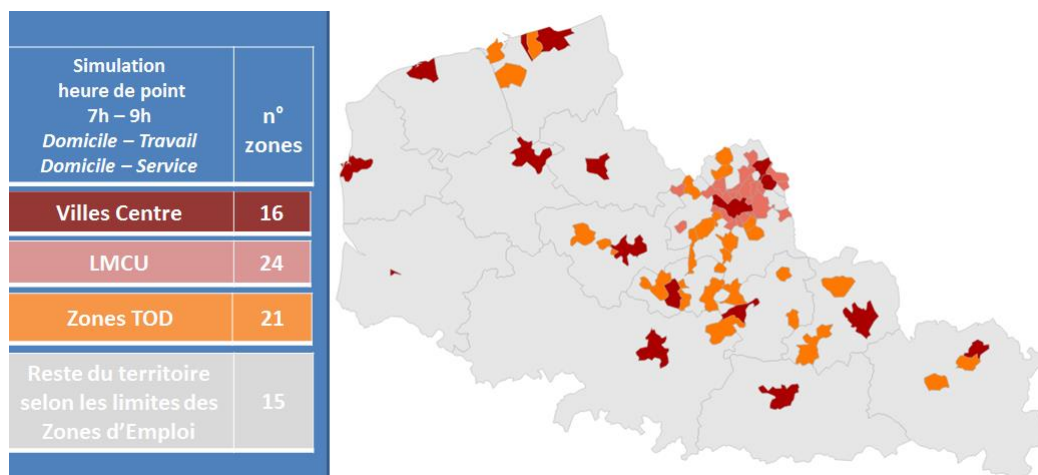


Figure 49: Le zonage du modèle (F. Lo Feudo; 2014).

optique l'enjeu principal a été celui de trouver un équilibre et une situation de compromis entre la nécessité de simplification du réel et le traitement de la complexité spatiale. Enfin une contrainte fondamentale est celle d'arriver à concevoir un découpage qui correspond aux données disponibles, issues des dispositifs de recueils institutionnels. De ce fait, pour la définition des zones du modèle *Tranus* dans la région Nord-Pas-de-Calais, a été reproduite l'organisation administrative régionale actuelle et ont donc été définies 16 zones de type *Ville centre* représentant les principales agglomérations urbaines régionales. Pour tenir compte des dimensions économiques et sociales des zones urbaines considérées, les données (population, emploi, usage et prix du sol) de chaque ville ont été regroupées avec celles des municipalités périphériques adjacentes, fonctionnellement et géographiquement reliées à la ville principale (*effet d'agglomération*). En particulier, les critères de regroupement considérés ont été ceux de la continuité du bâti et de l'unité morphologique des agglomérations, dans le but de limiter le plus possible le nombre total des zones du modèle, en manière à ne pas rendre excessivement complexe le travail de calibration et d'élaboration final des résultats⁶⁷. En substance, l'intention générale a été toujours celle de simplifier sans perdre la complexité. Plus précisément, la

⁶⁷ En effet pendant la modélisation on s'est rendu compte que bien évidemment le nombre de zones considérées est directement proportionnel à la complexité du travail de calibration ; mais c'est surtout quand les zones représentent des entités spatiales très différentes (au niveau de densité d'emplois et de ménages) qu'on rencontre des importantes difficultés dans la calibration.

définition de ces agglomérations urbaines, pas toujours institutionnellement identifiées, a été effectuée sur la base d'une observation cartographique, sans tenir compte des limites administratives inter-communales. Chacune des 16 zones *Ville centre* est en fait une agglomération de deux ou plusieurs municipalités, sauf dans le cas de la ville de Lille.

Lille est le principal centre urbain de la région et la Communauté Urbaine de Lille-Métropole est

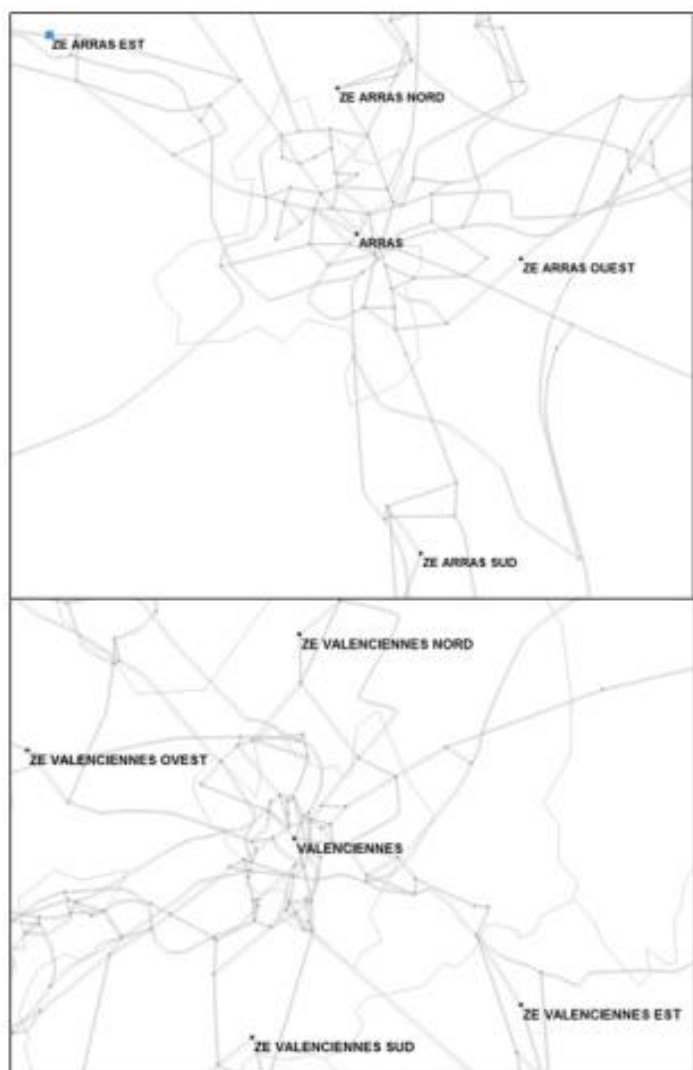


Figure 50: Exemple de la répartition spatio-fonctionnelle, à l'intérieur du modèle (autour des villes centre d'Arras et Valenciennes), des zones relatives au reste du territoire selon les limites des zones d'emploi. (F. Lo Feudo, 2014)

une entité institutionnelle qui rassemble 86 municipalités, avec une population totale de plus d'1 million d'habitants. Pour cette raison, le zonage du modèle dans la métropole lilloise a été appliqué d'une façon plus désagrégée, en créant une zone pour la commune de Lille et 21 autres zones associées aux communes les plus représentatives (par la taille et la densité de population) de l'agglomération métropolitaine. L'objectif est d'avoir une représentation plus détaillée de l'agglomération située autour de la capitale institutionnelle de la région, véritable épiscetre de l'activité économique et du

système de mobilité régionale. Pour tenir compte, dans le modèle, de tout le reste de la

population régionale, 15 zones correspondant au reste du territoire ont été définies. Ces zones reposent sur le découpage par bassins d'emplois régionaux (Zones d'Emplois selon la classification proposée par l'INSEE)⁶⁸, chacun gravitant autour d'une ville principale. Chaque zone correspond dans ce cas à une agrégation de plusieurs communes, permettant ainsi de

⁶⁸ Officiellement définies par l'Institut national français de statistique (INSEE) comme les «*espaces géographiques au sein desquels la majorité des employés vivent et travaillent et où les activités de production trouvent l'essentielle de la main-d'œuvre nécessaire pour couvrir leur offre de travail*».

couvrir la totalité de la population et de l'offre d'emplois à l'échelle régionale. Enfin, à l'intérieur de ce découpage, ont aussi été définies 14 *zones de développement urbain orienté vers les rail* ou *zones pour le TOD*, à travers une analyse du réseau ferroviaire régional et grâce à une classification des gares par type et niveau d'intégration avec la structure urbaine environnante effectuée dans le cadre d'une précédente recherche (Nedellec, 2010). En particulier parmi les types de configurations spatiales identifiés par M. Nedellec (2010) (*intégré; bicéphale, morcelé, village rural*) trois types ont été identifiés comme les plus susceptibles de recevoir des interventions de TOD. Des corridors ferroviaires caractérisés par la présence d'ensembles de gares voisines, qui répondent aux caractéristiques des gares intégrées, bicéphalées et morcelées, ont été identifiés et donc considérées comme constituant des espaces urbains potentiellement capables d'accueillir des interventions de TOD. En particulier à l'intérieur du modèle, pour éviter une discordance excessive et une différence d'échelle entre les valeurs de populations et d'emplois présentes dans les zones correspondant aux agglomérations urbaines (les 16 zones « Ville centre », les 21 zones de LMCU et 14 zones TOD) et les 15 autres zones relatives au reste du territoire régional, ces dernières ont été ensuite désagrégées en sous-zones

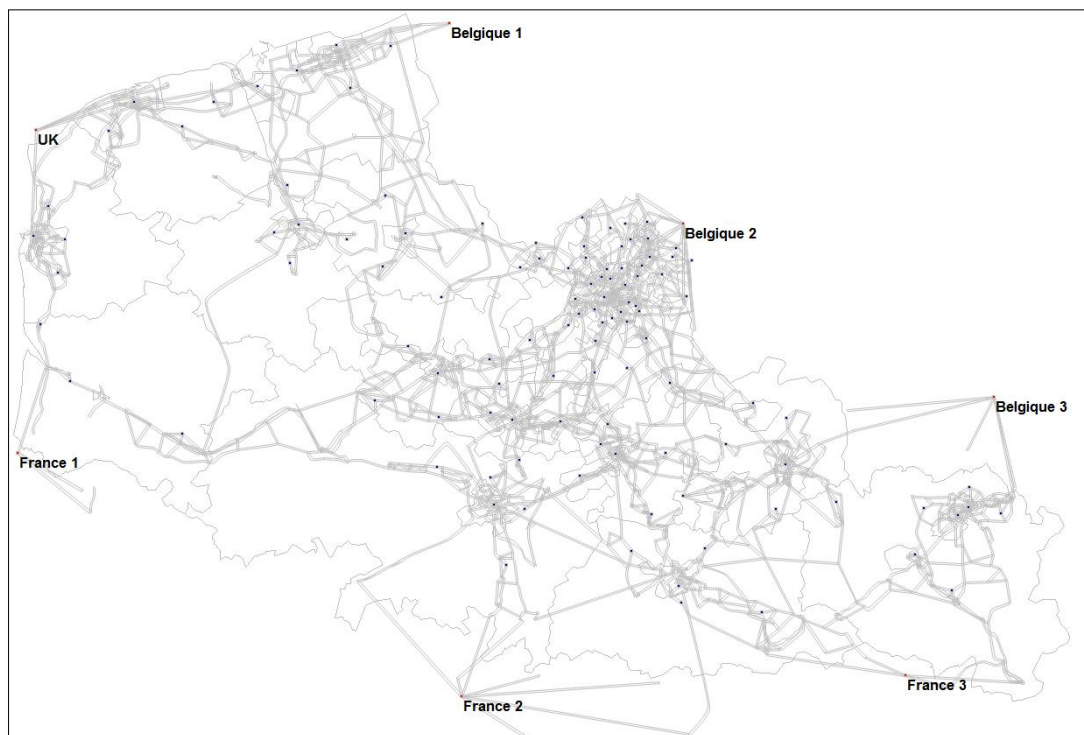


Figure 51: Représentation dans le modèle des zones externes au terrain d'étude.

arbitraires, de caractère spatio-fonctionnel. C'est-à-dire que chacune des 15 zones s'appuyant sur les limites des zones d'emplois régionaux a été divisée en 4 zones égales, environnant la ville centre correspondante, selon les quatre directions cardinales (nord, sud, est, ouest). Il s'agit d'un choix de simplification dans le travail de modélisation qui a d'ailleurs permis de mieux distribuer la demande de transport provenant des aires périphériques et périurbaines sur le territoire et,

en particulier, sur le réseau de transports urbain des villes centre, de manière à pouvoir ainsi reproduire avec plus de précisions les flux d'entrée et sorties dans les agglomérations urbaines de la région.

Pour tenir compte du caractère transfrontalier du territoire régional du Nord-Pas-de-Calais, 7 zones externes et des matrices O/D exogènes, représentant les déplacements en entrées, sorties et de traversées dans la région ont été établies. En particulier, pour caractériser la liaison de la zone d'étude avec les espaces externes, relativement aux dynamiques liées aux flux de transport, deux matrices O/D exogènes, représentant les déplacements (pour les motifs domicile-travail et domicile-service) en entrées, sorties et de traversée dans la région ont été chargées dans le modèle *Tranus*. Toutes les données relatives aux systèmes de transport ont été obtenues à partir de l'Enquête Régionale Mobilité et Déplacements (ERMD) (Conseil Régional NPDC, 2010). Une matrice O/D exogène a été également introduite dans le modèle pour tenir compte des flux de transport présents dans la région, relatif aux poids lourds.

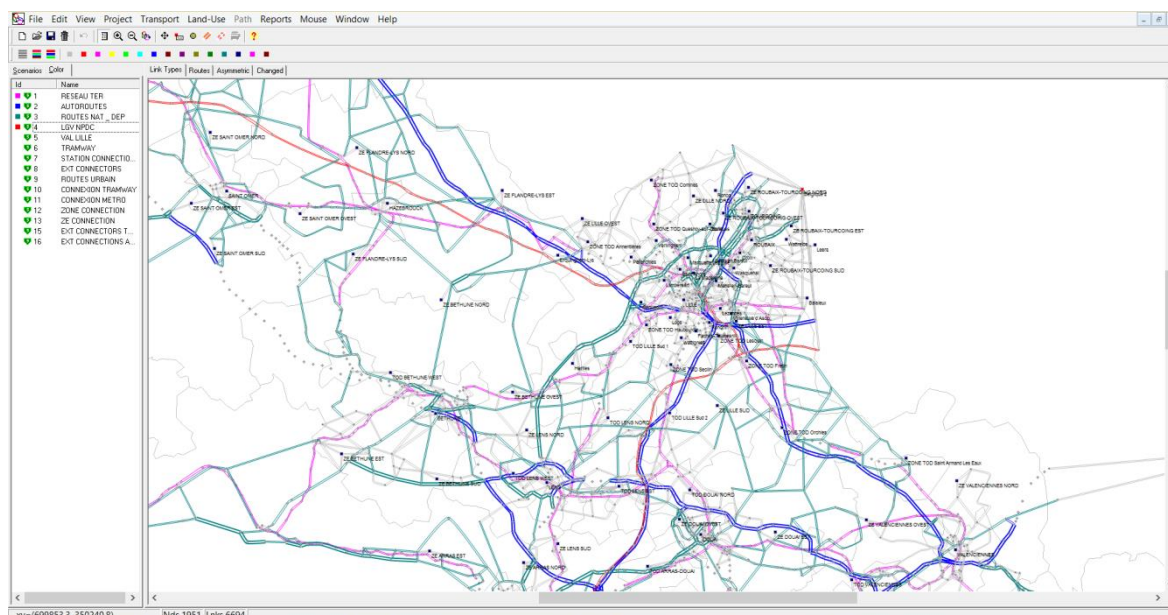


Figure 52: Capture d'écran du logiciel de modélisation Tranus (F. Lo Feudo; 2014).

Méthode pour l'identification des zones avec une potentialité de développement urbain orienté vers le rail et les transports en commun.

La procédure pour identifier les nœuds et corridors ferroviaires régionaux caractérisés par une potentialité de développement selon le principe du TOD, a été effectuée à travers d'abord une analyse du réseau ferroviaire régional et une classification des gares par type et niveau d'intégration avec la structure urbaine environnante. Ensuite ont été identifiés 14 corridors ou axes ferroviaires, composés d'un groupe de gares et donc des municipalités sur lesquelles à modéliser les effets et les impacts relatifs (sur le système intégré du transport et du territoire) à l'introduction des interventions de type TOD (mixité fonctionnelle, priorité à la mobilité douce et aux transports collectifs, densification autour de gares, restriction du stationnement et aménagements urbains de qualité, etc.).

Ce travail d'identification a été réalisé selon 4 étapes principales:

ÉTAPE 1 - Grâce à l'utilisation de cartes géo-référencées fournies par les autorités régionales (<http://opendata.nordpasdecals.fr/>) et l'utilisation de logiciels SIG comme Autocad Map3D et QGIS, une carte du réseau ferroviaire régional avec toutes les gares régionales a été construite.

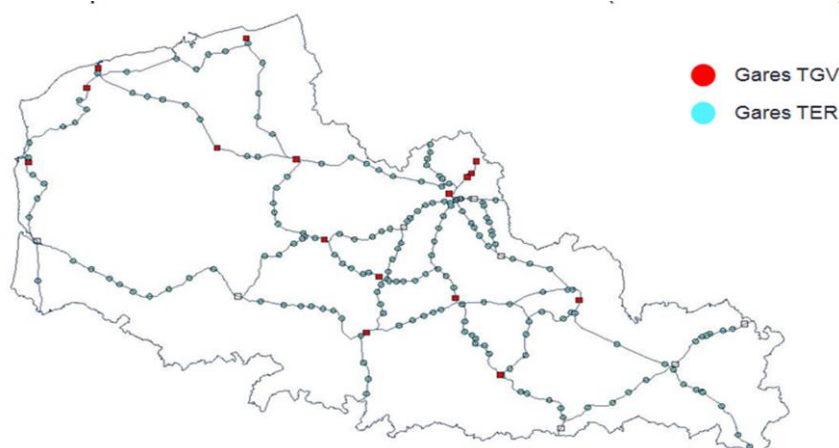


Figure 53: Réseau ferroviaire et gares du Nord-Pas-de-Calais.

ÉTAPE 2 – Sur la base d'une étude effectuée antérieurement à l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1 (Nedellec, 2010), a été réalisé un recensement de l'ensemble des typologies des gares ferroviaires régionales, caractérisées selon le type et le mode d'insertion dans le territoire urbain et selon le type de quartiers environnant chaque gare. En particulier, parmi les types de configurations spatiales définies dans l'étude précédente (*quartier intégré; bicéphale, morcelé, village rural*), compte tenu de l'ensemble du système urbain constitué par la gare et le quartier voisin, nous avons identifié trois types, plus susceptibles de recevoir des interventions visant à mettre en œuvre un modèle urbain de *Transit Oriented Development*. Il s'agit des typologies des gares considérées comme *intégrées, morcelées et bicéphales*.

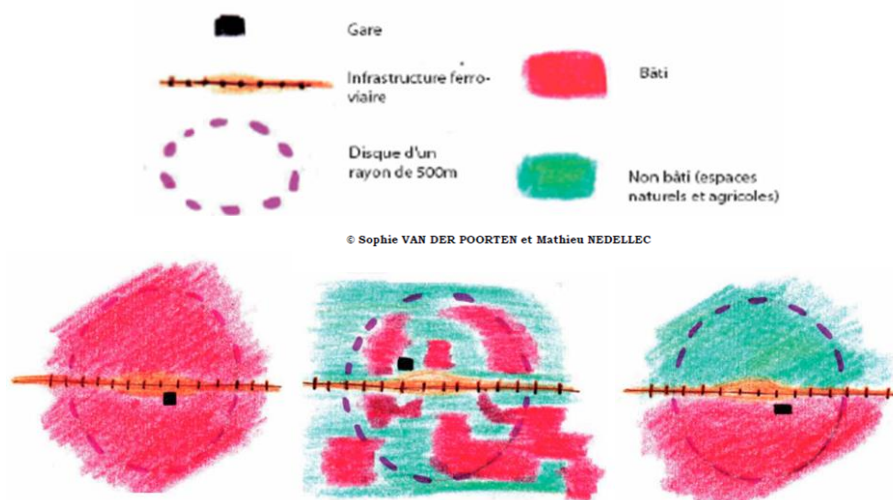


Figure 54: Typologies des quartiers de gare retenus (Nedellec, 2010).

ÉTAPE 3 - Sur la base d'une telle analyse, sur la carte du réseau ferroviaire régional ont été identifiés des corridors (axes) caractérisés par la présence des groupes de deux ou plus gares consécutives, qui répondent aux caractéristiques précédemment données et donc considérées comme représentatives des zones urbaines potentiellement capables d'accueillir des interventions de TOD.

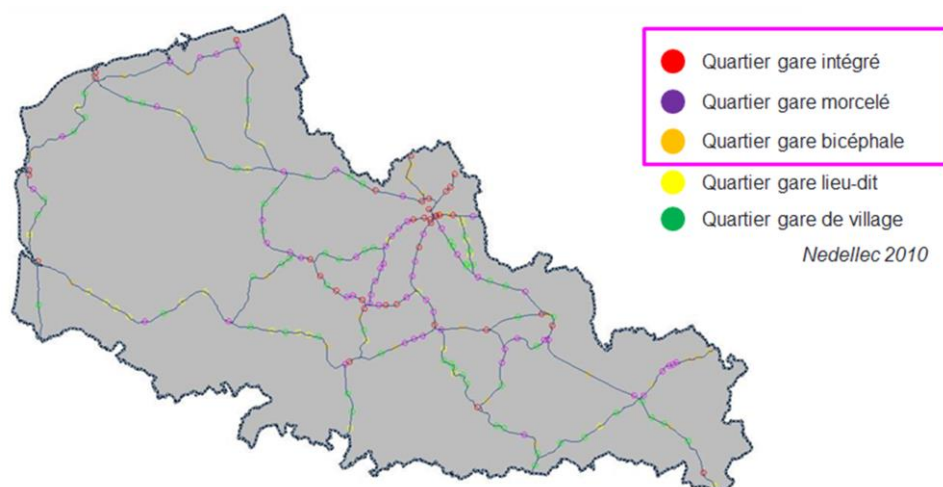


Figure 55: Classification du réseau ferroviaire régionale selon le type de quartier gare (F. Lo Feudo; 2014).

ÉTAPE 4 – Ensuite ont été sélectionnés 21 nœuds sur plusieurs corridors ferroviaires de la région, qui constituent l'ensemble des zones sur lesquelles ont été simulées les hypothèses de densification urbaines et d'amélioration progressive de l'offre de transport en commun, dans les scénarios de modélisation.

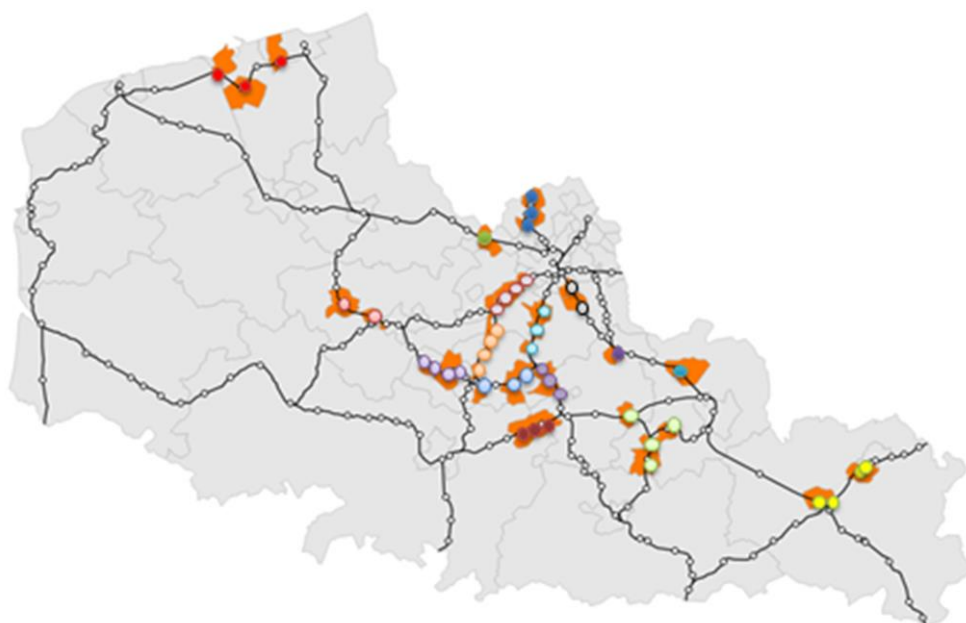


Figure 56: Les nœuds et corridors sélectionnés avec potentialité de TOD (F. Lo Feudo; 2014).

Armentieres	●
Fretin	○
Haubourdin	○
Lesquin	○
Seclin	○
Comines	●
Quesnoy-sur-Doule	●
Orchies	●
Saint Armand Les Eaux	●
Brébiere-Vitry-Corbehem	●
Lillers-Choques	○
Ostricourt	○
Dunkerque	●
Hénin Beaumont	○
Bauvin-Sanghin	●
Loos-Lievin-Bully	○
Santes-Wavrin	○
Phalempin-Libercourt	○
Hautmont	●
Aulnoye	●
Denain-Somain-Bouchain	●

Figure 57: Liste des nœuds et corridors sélectionnés avec potentialité de TOD.

Selon les données statistiques régionales disponibles et accessibles, il a été décidé de considérer dans le modèle la population sous forme de ménages et de la subdiviser en fonction de la catégorie socio-professionnelle et des revenus annuels moyens du chef de ménage. Sur la base des données fournies par l'INSEE, issue du dernier recensement officiel de la population en 2001 et des modifications ultérieures effectuées en 2009, ont donc été associées aux catégories socio-professionnelles retenues, des valeurs de revenus annuels moyens, pour être en mesure de créer trois macro-catégories socio-professionnelles : ménages hauts revenus, ménages moyens revenus, ménages bas revenus.

Pour chacune des catégories de population précédemment décrite, il a fallu créer des catégories de transport correspondantes, relatives aux motifs de déplacements

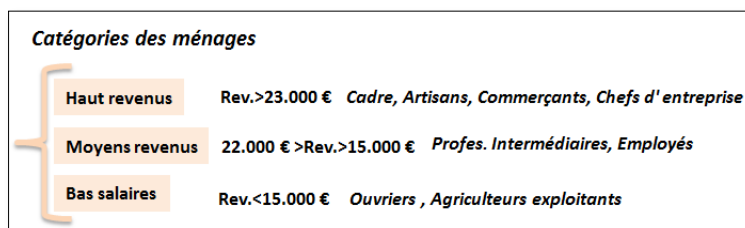


Figure 58: Classification socio-professionnelle et par revenus annuels moyens des catégories des ménages. (F. Lo Feudo, 2014)

domicile-travail et *domicile-service*. En outre, deux autres catégories de transport ont été créées pour être en mesure de définir la demande de transport externe (*déplacements avec l'origine ou la destination en dehors de la zone d'étude*) et le trafic routier de poids lourds circulant dans la région. Dans *Tranus*, pour chaque catégorie de transport, il faut définir plusieurs paramètres

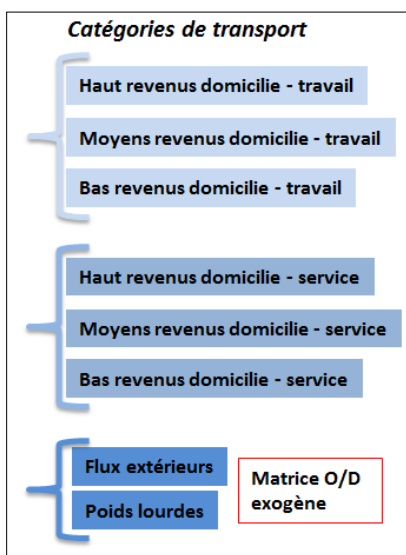


Figure 59: Définition des catégories de transport relatifs aux différents types et motifs de déplacements. (F. Lo Feudo, 2014)

relatifs aux préférences comportementales et aux habitudes de mobilité⁶⁹.

Pour le calcul des deux paramètres relatifs à la valeur du temps (*valeur du temps de déplacement* et *valeur du temps d'attente*), a été utilisée la technique proposée dans les documents fournis sur le manuel de *Tranus*, disponibles en ligne⁷⁰. Fondamentalement, pour chaque catégorie de population on définit le salaire annuel moyen et donc le salaire horaire et journalier moyen (en supposant 22 jours de travail par mois et 8 heures de travail par jour). A ce stade, le paramètre de la valeur du temps de déplacement est égal à 1/3 du salaire journalier moyen et la valeur du temps d'attente est égale à 2/3 du salaire journalier moyen

de chaque catégorie de demande. Si on se réfère, par contre, aux paramètres de *Max and Min*

⁶⁹ Value of Travel Time; Value of Waiting Time; % Vehicle Availability; Min Trip Generation Rate; Max Trip Generation Rate; Demand Elasticity; Modal Split Elasticity; Modal Choice Logit Scaling; Path Choice Elasticity; Path Choice Logit Scaling.

⁷⁰ www.modelistica.com

Trip Generation Rate, les valeurs initiales ont été fixées au début de la modélisation selon les indications présentes dans l'ERMD de 2009, en représentant le point de départ dans la procédure de calibration. Ensuite ces valeurs ont représenté deux des indicateurs les plus importants à *ajuster* dans la phase de calibration. Il faut en fait considérer que les valeurs estimées initialement sont référées à la totalité de déplacements effectués, pendant que le modèle *Tranus* considère exclusivement les déplacements interzonaux, en excluant de la modélisation tous les déplacements qui se déroulent à l'intérieur de chaque zone.

Dans le modèle ont été créés 11 types de modes de transport (*Voiture, Bus urbain, Bus suburbain, Tramway, Metro, Train Régional, TGV, TGV Régional, Vélo, Piéton, Poids Lourdes/Camions*) et pour chacun le paramètre *Time Factor*, qui représente le temps de référence pour la modélisation, a été fixé à la valeur de 3, car on se réfère à l'heure de pointe et donc aux trois heures qui représentent normalement le pic de trafic pour les

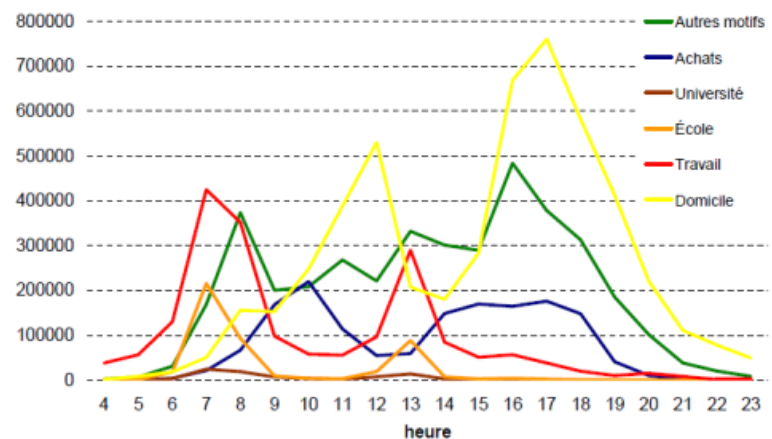


Figure 60: Volume de déplacements selon l'heure et le motif. (Conseil Régional NPDC, 2010)

déplacements du type domicile-travail (06h00-09h00). En ce qui concerne le calcul des paramètres relatifs au coût de l'énergie, a été utilisée la méthode de calcul proposée par le manuel mathématique de *Tranus* (sur le site internet de *Modelistica*⁷¹). Les paramètres de base utilisés dans cette méthode de calcul sont la consommation moyenne d'énergie par Km parcouru, selon les différents modes de transport et le coût d'énergie par unité de distance.

$$ce_o = [ed_o^{min} + (ed_o^{max} - ed_o^{min}) * \exp(-\delta^o V_o)] pe_o$$

ce_o Coût de l'énergie par unité de distance d'un véhicule de l'opérateur o

ed_o^{min} Consommation minimale d'énergie par unité de distance quand un véhicule d'un opérateur o voyage avec une vitesse à flux libre

ed_o^{max} Consommation maximale d'énergie par unité de distance quand un véhicule d'un opérateur o voyage avec une vitesse proche à 0

V_o Vitesse d'un véhicule de l'opérateur o , après une réduction de capacité

δ^o Paramètre qui règle la pente de la courbe de consommation d'énergie

pe_o Prix par unité d'énergie

Équation 1: Calcul du coût d'énergie (Modelistica, 2013).

A été également définie la matrice des coûts de transfert entre modes de transport (*operators*), qui représentent le coût monétaire des transferts et grâce à laquelle on peut par exemple

⁷¹ *ibidem*

représenter les politiques d'intégration tarifaire dans les services de transport en commun. Dans la figure suivante, les transferts qui portent le symbole *INF* ne sont pas permis dans le modèle, ceux qui portent le chiffre 0 sont à titre gratuit et ceux avec un chiffre différent de 0 prévoient un coût de transfert.

	1 Car	2 Bus Urbain	3 Bus Suburbs	4 Tramway	5 Metro	6 Train TER	7 Train TER GV	8 Train TGV	9 Bike	10 Walk	11 Trucks
1 Car	0	INF	INF	INF	INF	INF	INF	INF	INF	INF	INF
2 Bus Urbain	INF	0	1.45	0	0	1.5	1.8	1.8	INF	0	0
3 Bus Suburbs	INF	1.4	0	1.4	1.4	1.5	1.8	1.8	INF	0	0
4 Tramway	INF	0	1.45	0	0	1.5	1.8	1.8	0	0	0
5 Metro	INF	0	1.45	0	0	1.5	1.8	1.8	0	0	0
6 Train TER	INF	1.4	1.45	1.4	1.4	1.5	1.8	1.8	0	0	0
7 Train TER GV	INF	1.4	1.45	1.4	1.4	1.5	1.8	1.8	0	0	0
8 Train TGV	INF	1.4	1.45	1.4	1.4	1.5	1.8	1.8	0	0	0
9 Bike	INF	INF	INF	INF	INF	1.5	1.8	INF	0	INF	0
10 Walk	INF	1.4	1.45	1.4	1.4	1.5	1.8	1.8	INF	0	0
11 Trucks											0

Figure 61: Matrice qui représente les transferts entre opérateurs de transports dans le modèle.

Dans le modèle a été chargé l'ensemble de l'offre régionale des transports collectifs, c'est-à-dire l'ensemble des lignes de transport en commun actives en 2009 (période de référence du scénario de base). Ce sont les lignes ferroviaires régionales et nationales et les lignes de bus urbains et suburbains opérant dans la région, ainsi que les lignes urbaines de tramway (Lille et Valenciennes) et de métro automatique (VAL) de Lille. Les principaux paramètres à régler pour chaque ligne de transport en commun sont liés à la fréquence du service, à la vitesse de circulation et au tarif pour l'utilisateur (qui peut être en fonction de la distance ou du temps de déplacement). À cet égard, la fréquence moyenne a été calculée sur un jour de la semaine type pour le service ferroviaire (selon les horaires fournis par l'opérateur ferroviaire). Pour les lignes de bus urbains et suburbains et tous les autres opérateurs de transport en commun (tram et métro), la plus haute fréquence pendant les heures de pointe a été considérée comme celle de référence. En outre, pour chaque mode de transport capable de se déplacer sur un type particulier de *link* ou connecteur, doivent être également défini, la vitesse de circulation, le coût de consommation d'énergie par unité de distance et le paramètre de véhicules équivalents par rapport à la voiture (par exemple pour le bus ce dernier paramètre a été fixé à 2,5). Pour l'estimation de la vitesse de circulation, ont été utilisées les valeurs correspondant aux vitesses commerciales moyennes dans les situations de flux réels. Le paramètre de véhicules équivalents a été considéré égal à 2,5 pour les autobus et les camions, alors que pour les autres paramètres relatifs à la réduction de vitesse en situation de congestion, ont été utilisés ceux définis par défaut.

Opérateurs de transport	Typologies d'infrastructure de transport	Typologies de connexions	Lignes des transports en commun
VOITURE	Réseau ferroviaire régionale	Gares	Bus urbains
BUS URBAIN	Réseau ferroviaire à grande vitesse	Métro	Bus suburbains
BUS SUBURBAIN	Autoroutes	Tramway	Métro - VAL
TRAMWAY	Routes nationales	Zones internes	Tramway
METRO	Routes urbaines	Zones externes	TER
TER – Transport Express Régional	VAL - Véhicule Automatique Léger (Métro Lille)	Réseau ferroviaire - zones externes	TER-GV
TGV – Train Grande Vitesse	Tramway	Autoroutes – zones externes	TGV
TER-GV – Transport Express Régional Grande Vitesse			
Vélos			
Piétons			

Tableau 4: Typologies des données d'entrée dans le modèle relatives au système de transport.

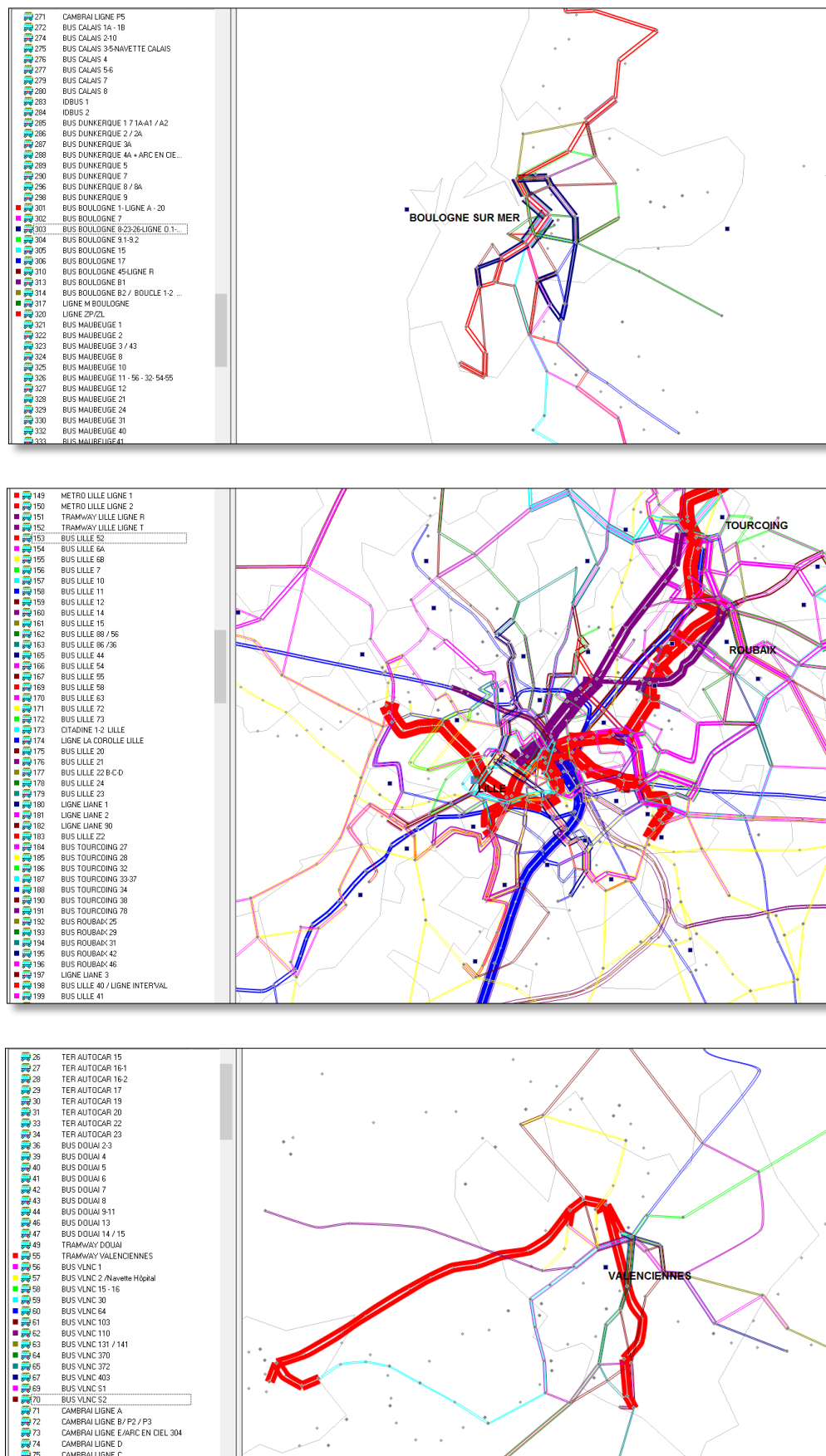


Figure 62: Exemples des représentations graphiques, dans le modèle, de l'offre de transport en commun dans les agglomérations urbaines de Boulogne sur Mer, Lille, Roubaix, Tourcoing et Valenciennes.

Par ailleurs des catégories correspondant aux différentes typologies de secteurs d'activités et d'usage des sols dans la zone d'étude, ont été définies dans le but de reproduire la structure du système résidentiel et des activités de la région. Ce travail a été réalisé à partir des bases de données fournies par le système SIGALE (Système d'Information Géographique (SIG) de la Région Nord-Pas-de-Calais) et en utilisant les données sur les dynamiques liées à l'emploi et aux activités productives de la région, fournies par l'INSEE. En particulier, par rapport aux secteurs productifs ont été introduits 2 secteurs d'activités *exogènes*⁷² (*secteur industriel et des constructions ; secteur agricole*), pour lesquels les ressources nécessaires à la production viennent de l'extérieur de la zone d'étude, et deux secteurs d'activités *endogènes*⁷³ ou *induits* (*tertiaire service et tertiaire public*), pour lesquels les ressources nécessaires à la production viennent des secteurs exogènes. En relation avec ces secteurs ont été introduites dans le modèle



Figure 63: Définition des secteurs d'activités relatifs aux différents secteurs productifs de la région. (F. Lo Feudo, 2014)

les données relatives au nombre d'emplois par secteurs d'activité et par zone du modèle.

Enfin par rapport à l'occupation du sol ont été identifiées 6 typologies principales

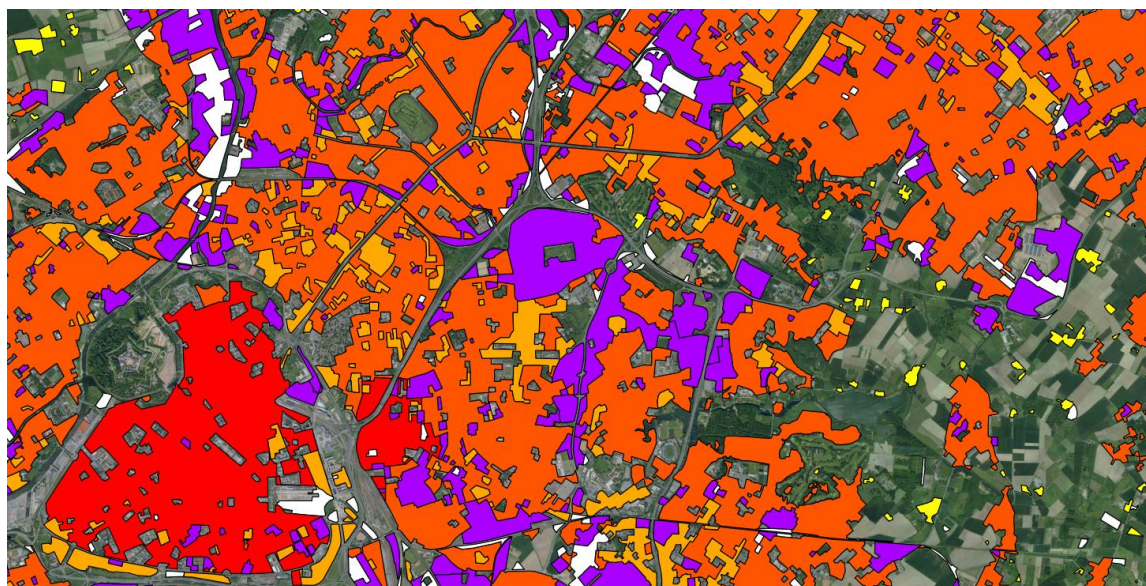
d'usages du sol, correspondant à la quasi-totalité des surfaces urbanisées de la région Nord-Pas-de-Calais, à l'exception des établissements hospitaliers et scolaires et des infrastructures de transports.

Les typologies qui ont été choisies sont les suivantes: *terrain résidentiel; terrain urbain continu dense ou mixte; terrains résidentiels collectifs; terrains résidentiels isolés; terrains en zones d'activités; espaces en friche et à bâtir; terrain TOD*. Plus en détail, dans le cas des secteurs *résidentiel, collectifs, isolés et d'activités*, ont été définis deux sous-secteurs correspondants à l'échelle *urbaine et rurale* ; caractérisés donc par des densités d'occupation des sols différentes pour une même typologie d'usage. Bien évidemment, même dans ce cas, le choix des types d'usages des sols insérés dans le modèle est dû aussi à la disponibilité des données et à la

⁷² "The location of exogenous production does not depend on the internal logic implicit in the model. Instead depends on elements not modelled or external to the system. Exogenous production is not subject to the spatial and sectorial distribution procedures of the model. It is a given input, to be added to endogenous, induced production." (Modelistica, 2013)

⁷³ "Induced production is production generated by internal or external demands. It is allocated to zones with the spatial and sectorial distribution model. The growth of induced production depends on the growth of those sectors that demand it." (Modelistica, 2013)

nécessité de simplifier autant que possible la réalité contenue dans le modèle, tout en essayant de reproduire au mieux la réalité observée.



Typologies d'usage du sol :

Urbain continue dense/mixte

Zones d'Activité

Résidentiel

Résidentiel Isolé

Résidentiel collectif

Espace en Friche

Figure 64: Représentation graphique des différentes typologies d'usages du sol considérées dans la modélisation : le cas de la métropole lilloise. (F. Lo Feudo, 2014)

Pour ces secteurs qui représentent les différents types d'usage des sols, les données relatives à la superficie disponible de chaque type de terrain ont été chargées à l'intérieur du modèle, pour chaque zone. Ont été également calculés les prix des sols par unité de surface, pour chaque type d'utilisation des sols et pour chacune des zones du modèle. Ils ont ensuite été insérés dans la section appropriée de *Tranus*.

Pour le calcul du prix du sol a été appliquée une procédure selon laquelle, à partir du prix de vente moyen (par unité de surface), on fournit le prix correspondant au paiement mensuel d'une hypothèque ou d'un emprunt sur le montant total du prix de vente de la surface. Dans *Tranus*, pour reproduire les dynamiques économiques particulières liées aux marchés immobiliers et fonciers, est préférable d'utiliser le prix de location par unité de surface que les prix de vente⁷⁴.

“Dans les données économiques, pour chaque secteur d'usage du sol et zone de développement, vous devez entrer un prix du sol. Les prix des sols doivent être exprimés en unités correspondant à la période de votre modèle de Tranus. Par exemple, si votre modèle représente l'heure de pointe

⁷⁴ En particulier, la fonction *Excel* utilisé pour effectuer cette conversion des prix est la fonction *VPM*, dans laquelle doit être défini le taux d'intérêts, la durée du prêt et la valeur actuelle et future de la tranche mensuelle.

ou un journée, alors vous exprimez les prix des sols en termes de valeur locative mensuelle équivalente” (B. Morton, 2009)⁷⁵

Dans le détail, l’estimation des prix fonciers relatifs aux typologies d’usages du sol considérées dans le modèle a été effectuée en utilisant, comme source principale, les données fournies par le site internet *www.meilleursagents.com*. Il s’agit de la base de données immobilières des notaires, disponible gratuitement en ligne, relative aux actes de mutations, aux opérations foncières et immobilières d’aménagement, réalisées et enregistrées par l’ensemble des études notariales de France. La base de données du site *meilleursagents* concerne les prix de vente au m² pour les typologies immobilières des maisons et des appartements. Pour traduire ces données en prix fonciers, nous avons défini des hypothèses de conversion, en fonction des surfaces moyennes des logements, des parcelles et des densités moyennes d’occupation des sols par typologie d’usage. La difficulté principale dans un enjeu d’usage du sol consiste à mettre en correspondance des données de surface de plancher (*floor-space*) et des données de surface de sol (*land-space*). En particulier, à partir d’une valeur de densité moyenne de nombre de logements par hectare, issue de la littérature spécialisée et par des indications fournies par l’INSEE, pour chaque typologie d’usage du sol la valeur totale de surface occupée par les différentes typologies immobilières a été calculée. Ensuite, à partir du rapport entre surface moyenne du logement (maison ou appartement) et surface totale occupée dans la parcelle type, une valeur équivalente à un coefficient d’occupation du sol a été calculée pour les différentes typologies d’usages considérées dans le modèle. Ce coefficient multiplié par le prix estimé fourni par la base de données des notaires (*meilleursagents*), établit donc le prix de vente d’une unité de surface de sol pour chaque zone considérée dans le modèle, à partir d’une donnée initiale qui était un prix de vente par unité de surface de plancher. La dernière étape pour obtenir des données relatives aux prix foncières à entrer dans le modèle *Tranus*, est la conversion du prix de vente foncière, en prix de location par unité de surface, en utilisant le logiciel *Excel*, et la méthode de calcul décrit précédemment (fonction VPM).

⁷⁵ Extrait d’une discussion sur les stratégies de calibration sur le forum en ligne du logiciel *Tranus* : [https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!searchin/tranus/About\\$20demand\\$20function/tranus/gPEA15FDvA/qOOHghNNcJMj](https://groups.google.com/forum/?fromgroups#!searchin/tranus/About$20demand$20function/tranus/gPEA15FDvA/qOOHghNNcJMj)

Typologie d'usage du sol	Typologie immobilière	Densité [log/ha]	A - Surface moyenne de plancher [m ²]	B – Surface de sol occupé [m ²]	Coefficient d'occupation du sol [A/B]
Résidentiel isolé	Maison	15	150	667	0.23
Résidentiel collectif	Appartement	60	64	167	0.38
Urbain continu dense/mixte	Maison	120	104	83	1.25
	Appartement		64		0.76
Résidentiel	Maison	100	100	100	1.00
	Appartement		60		0.60

Tableau 5: Calcul du coefficient d'occupation du sol pour les typologies immobilières et typologies d'usages du sol.

$$\text{Prix de vente "meilleurs agents"} * \left[\frac{A}{B} \right] = \text{Prix de vente par unité de surface occupée au sol}$$

Équation 2: Calcul pour la conversion depuis le prix de vente par unité de surface du logement au prix de vente par unité de surface au sol.

La section *Intersector* représente enfin le cœur du modèle, en tant que module d'interface entre le module transport et le module usage du sol. En effet elle permet de définir toutes les relations et interactions entre les différents secteurs économiques et d'usage des sols.

Dans le cas de la simulation *Tranus* pour la région du Nord-Pas-de-Calais, le modèle a donc été conçu de sorte que les secteurs peuvent interagir de la façon suivante:

- Les secteurs d'activités peuvent «consommer» de la main d'œuvre, composée par les catégories d'emplois, classées par salaire moyen et catégories socio-professionnelles, ainsi que certains types de sols. En générant dans le modèle, respectivement les flux de type *domicile-travail* et les dynamiques de choix de localisation des activités;
- Les catégories de populations (ménages) peuvent à leur tour «consommer» les secteurs d'activités endogènes (tertiaire) et certains types de sols (terrains résidentiels). En générant dans le modèle, respectivement les flux de type *domicile-service* et les dynamiques de choix de localisation résidentielle des ménages.

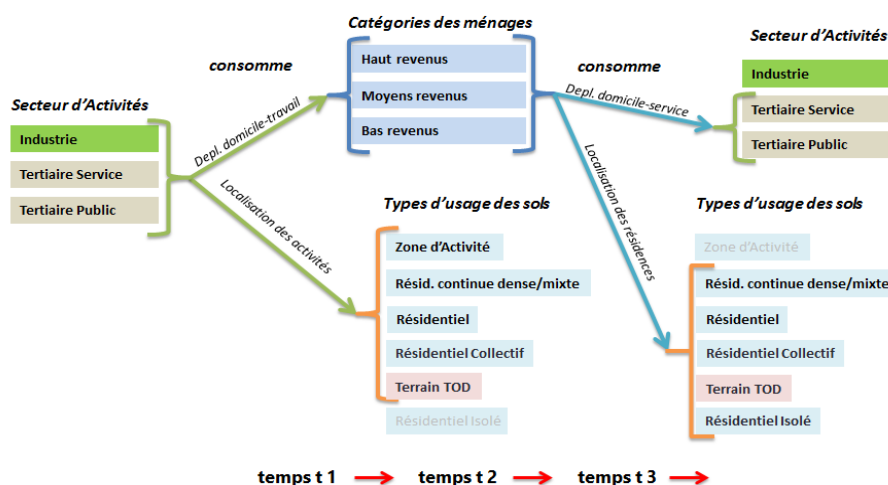


Figure 65: Représentation des interactions entre les secteurs d'activités, des ménages et d'usage des sols dans le modèle de simulation *Tranus* pour le Nord-Pas-de-Calais.

« La quantité d'inputs qu'une unité de production d'un secteur exige d'un autre secteur est déterminée par une fonction de demande. Le modèle *Tranus* inclut comme options: une demande fixe (l'équivalent de coefficients techniques dans un modèle d'entrée-sortie), une demande variable (élastique) et la possibilité de spécifier des substituts. Le sol est l'exemple typique d'un substitut, quand différents types de sol sont présents dans le système, comme les sols à basse densité, à haute densité, industrielle, commerciale, etc. » (Modelistica, 2013).

La fonction de demande qui dans *Tranus* règle la relation entre consommation et prix et donc entre offre et demande, est la suivante :

$$a_i^{mn} = \min^{mn} + (\max^{mn} - \min^{mn}) * \exp(-\delta^{mn} U_i^n)$$

a_i^{mn}	Quantité de production du secteur <i>n</i> demandée par une unité du secteur <i>m</i> dans la zone <i>i</i>
$\min^{mn}$	Quantité minimale de <i>n</i> demandée par une unité de production de <i>m</i>
$\max^{mn}$	Quantité maximale de <i>n</i> demandée par une unité de production de <i>m</i>
δ^{mn}	Paramètre d'élasticité de <i>m</i> en relation avec le coût de l'input <i>n</i>
U_i^n	Désutilité de consommation de <i>n</i> en <i>i</i>

Équation 3: Forme générale de la fonction de demande en *Tranus*.

Les secteurs « transportables » qui peuvent être consommés aussi hors de leur zone de production sont réglés par des fonctions de demande de type inélastiques. À partir des valeurs totales de production, pour chaque catégorie d'emplois et de population créés dans le modèle, on peut calculer les coefficients qui représentent la quantité de demande consommée pour chaque unité de production d'un secteur endogène ou induit dans le modèle.

Production totale dans le modèle	INDUSTRIE/ COSTRUCTIONS	AGRICULTURE	Tertiaire Service	Tertiaire Public	Ménages Hauts Revenus	Ménages Moyens Revenus	Ménages Bas Revenus
Scénario A - 2009	Nb emplois	Nb emplois	Nb emplois	Nb emplois			
	328297	26544	623798	502763	190369	415379	365322

Tableau 6: Production totale des ménages et emplois dans le scénario de base du 2009.

La procédure pour effectuer ce calcul utilise la fonction *solve* d'*Excel* et permet de déterminer les coefficients intersectoriels de la fonction de demande. Ces paramètres sont donc générés sur *Excel* et ensuite multipliés par la production totale du secteur de demande consommée par la catégorie générique. On parvient à une estimation correcte quand on obtient comme résultat les valeurs totales de production correspondantes aux valeurs d'entrées. Ce calcul permet de générer, par conséquent, les valeurs unitaires des salariés "consommés" pour chaque unité de production et pour chaque secteur d'activités.

	INDUSTRIE/ CONSTRUCTIONS	AGRICULTURE	Tertiaire Service	Tertiaire Public	Ménages hauts Revenus	Ménages Moyens Revenus	Ménages Bas Revenus	Générés	Donnés	Differ.
INDUSTRIE/ CONSTRUCTIONS										
AGRICULTURE										
Tertiaire Service					0.346983755	0.757107330	0.665868915	623798	623798	0
Tertiaire Public					0.279658789	0.610206433	0.536670930	502763	502763	0
Ménages hauts Revenus	0.083288109	0.006734144	0.158255956	0.127549686				190369	190369	0
Ménages Moyens Revenus	0.181731959	0.014693686	0.345309378	0.278309290				415379	415379	0
Ménages Bas Revenus	0.159831582	0.012922961	0.303696413	0.244770454				365322	365322	0

Tableau 7: Calcul des coefficients intersectoriels à travers la fonction *solve*.

Par contre pour estimer les paramètres de la fonction de demande des différents secteurs « *non transportables* » du modèle (c'est-à-dire les secteurs qui sont consommés exclusivement dans leur zone de production et pour lesquels la distribution de la demande se modifie en fonction du prix), réglés par une fonction de demande de type *élastique*, il faut estimer le paramètre d'élasticité qui définit par exemple la relation entre l'évolution du prix foncier et la consommation des sols. Pour chaque type d'usage du sol doivent, en outre, être définies les quantités maximales et minimales de surfaces consommées en moyenne, par chaque catégorie de demande (de population ou d'activité économique). Il s'agit d'estimer en fait des valeurs de consommation du sol par unité de population et d'emplois et donc d'introduire dans le modèle des indicateurs qui seront sous la forme de *surface/habitant* par type de sol (donc l'inverse de la densité).

Pour arriver à l'estimation de ces valeurs, la quantité moyenne de surface de sols résidentiels et productifs occupés, relative à chaque

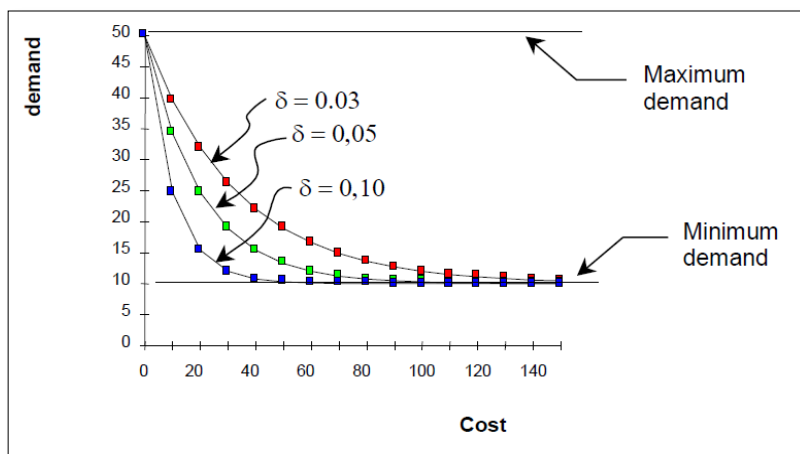


Figure 66: Exemples de fonctions de demande avec des différentes valeurs d'élasticité δ (Modelistica, 2013).

catégorie de demande, ainsi aussi la densité des logements et des activités (pour chaque zone du modèle), doivent être pris en compte afin d'obtenir des valeurs qui puissent reproduire le plus possibles la réalité effectivement observée. Pour effectuer ce type de calcul, une méthode a été créée dans le cadre de cette de thèse. La méthode se base sur l'explicitation des rapports de densité entre les différentes catégories de demande, consommatrices de chaque type de sol. À travers cette méthode, il a été possible d'estimer les paramètres min^{mn} et max^{mn} de la fonction

de demande, relatifs à chaque catégorie d'usage du sol, lesquels représentent essentiellement l'inverse d'une densité. En annexe à cette thèse est la procédure de calcul détaillée et exhaustive est consultable.

Tous ces indicateurs qui sont bien évidemment estimés en fonction de la situation présente dans le scénario de référence peuvent, pendant le processus de calibration du module *land use* en *Tranus*, subir des ajustements et des corrections (surtout par rapport à la *distance* entre quantité minimale et maximale d'input demandée et aux pénalités relatives aux différentes substituts), qui sont effectuées à travers un travail très fin de « *trial et error* », qui permet d'arriver à obtenir la convergence du modèle et à reproduire les données observées.

5.3. Conclusions

Dans ce chapitre nous avons introduit les principes à la base de la technique de modélisation intégrée d'usage du sol et des transports. Il s'agit d'un outil pour la représentation du fonctionnement du territoire, en fonction des dynamiques liées aux transports, à la localisation des ménages, des emplois et des activités dans l'espace et aux évolutions du marché foncier et immobilier. On parvient de ce fait à modéliser les interactions entre transport et usage du sol, sur des horizons temporels projetés et à modéliser les relations entre offre et demande relatives aux services de transport et au fonctionnement socio-économique de la zone d'étude, en fonction notamment des niveaux d'accessibilité, des coûts de transport, des comportements de mobilité et de localisation ainsi que des prix fonciers et immobiliers. À différence des modèles de type classique où les données d'usage du sol sont entrées de manière exogène, dans les modèles MUST ou LUTI les données sur l'usage du sol sont directement générées en fonction des niveaux d'accessibilité et des coûts de transport, ainsi que d'autres paramètres spécifiques relatifs aux comportements dans les choix de localisation. Cette technique de modélisation est basée sur l'intégration de plusieurs théories, dont celle des interactions spatiales de Lowry, celle de la maximisation de l'entropie, celle de la microéconomie urbaine de Von Thünen, celle des utilités aléatoires de McFadden et celle des modèles économétriques *d'entrées-sorties* de Leontief. Elle représente une aide à la résolution des questions des aménageurs et des urbanistes, en permettant une analyse globale et inclusive des dynamiques de fonctionnement dans les terrains d'études. Dans le même temps la grande complexité relative à la conception, à la mise en œuvre et à la calibration et la nécessité d'une approche multi-échelle et multidisciplinaire, ainsi que d'une expertise spécialisée, posent un problème d'ingénierie, de compétence et de temporalité dans l'application des MUST, ainsi que de capacité de reproductibilité et de partage des objectifs de modélisation entre décideurs et modélisateurs. On observe donc également l'importante fonction pédagogique des MUST qui peuvent représenter un moyen pour faciliter la rencontre et la compréhension réciproque entre le monde de la recherche et les acteurs de la sphère décisionnelle.

Le logiciel de simulation intégrée *Tranus* a été cependant choisi dans le cadre de cette recherche de doctorat, parce que considéré comme le plus adapté pour analyser et évaluer l'applicabilité des politiques de *Transit Oriented Development* sur le territoire du Nord-Pas-de-Calais. *Tranus* est un modèle d'économie spatiale, basé sur un modèle *logit* emboîté multinomial et sur le modèle spatial *d'entrées-sorties*, qui considère l'espace comme une surface à consommer (ou occuper) et également comme un ensemble des distances à franchir, pour passer d'une fonction à une autre du territoire. Il englobe une approche basée sur l'équilibre général entre la demande

et l'offre (de transport et d'usage du sol), en fonction des facteurs d'équilibre du temps et du prix, en arrivant à reproduire le mécanisme de compétition propre du marché foncier et immobilier et, dans le même temps, les dynamiques liées à la mobilité, en simulant dans le temps l'évolution de l'intégration entre transport et usage du sol. Le modèle *Tranus* est constitué par des zones, des catégories de transport et de population et par des secteurs d'activités. Le mécanisme de localisation et de distribution des ménages et des emplois dans l'espace suit le principe de la minimisation du coût généralisé d'implantation et donc de la maximisation de la fonction d'utilité. La fonction d'utilité inclut donc à la fois les coûts généralisés de transport et le coût de localisation et, en plus, le modèle peut tenir compte de contraintes de capacités du réseau de transport et des phénomènes de congestion. Il permet ainsi de reproduire les flux économiques entre les secteurs d'activités et de les transformer en flux de transport. Ensuite l'algorithme du modèle calcule les coûts et les désutilités de transport qui vont influencer sur le modèle des activités dans les temps de simulation successifs, en reproduisant ainsi un système de boucles de rétroaction. En utilisant le logiciel *Tranus* on peut donc étudier les effets relatifs à l'introduction d'une nouvelle infrastructure ou d'une ligne de transport en commun, mais également les effets liés à des changements dans les politiques d'usage du sol (p.ex. opérations de renouvellement urbain ou de densification) et les caractéristiques du marché foncier et immobilier.

Dans la suite du chapitre on illustre : les principes à la base du processus de calibration du logiciel *Tranus*. Par calibration on entend la capacité du modèle à reproduire les données observées avec une erreur et un niveau de précision suffisamment acceptable. Dans *Tranus* le processus de calibration n'est pas totalement automatisé et nécessite un travail lourd et minutieux d'*essais* et *erreurs* par le modélisateur. La calibration est achevée à travers un processus itératif, pendant lequel le modèle ajoute ou soustrait aux prix de référence du scénario de base des quantités appelés *prix d'ajustements*, en s'arrêtant une fois que le modèle converge. D'autres paramètres et indicateurs peuvent aussi nécessiter un ajustement et être calibrés. Il s'agit de facteurs difficilement définissables de manière empirique (sinon à travers des campagnes d'entretiens auprès des usagers), qui touchent les comportements de mobilité, le choix de localisation et les fonctions de demande relatives à la consommation de sol (notamment les paramètres de substitution qui définissent la préférence de choix entre les différentes possibilités de localisation dans l'espace). En conclusion, dans ce chapitre, nous avons exposé les hypothèses de base, les données, la structure générale et la démarche d'implémentation du modèle *Tranus* pour la région Nord-Pas-de-Calais. Le travail de modélisation a donc consisté en la définition du zonage, et la définition de catégories des ménages, d'emplois, d'activités productives et des types d'usage du sol ; dans le chargement des

toutes les données relatives à l'offre physique et opérationnelle de transport (infrastructures et services), et ensuite dans la conception et l'implémentation des trois différents scénarios alternatifs de développement territorial régional avec un horizon temporel fixé à 2025. Un scénario "*au fil de l'eau*" est mis en œuvre, pour disposer d'un aperçu de l'évolution du système intégré régional, en ne supposant aucun changement dans les politiques futures de transports et d'usage des sols. Ce scénario sera également utile pour disposer de résultats comparables avec ceux du scénario consacré à la simulation des politiques de TOD. Deux autres scénarios sont en fait également mis en œuvre, avec des hypothèses de développement urbain orienté vers les transports en commun et vers le rail (TOD), sur des nœuds et corridors ferroviaires sélectionnés sur la base du niveau d'insertion urbaine des quartiers de gare considérés, à travers des interventions de densification urbaine et d'amélioration progressive de l'offre de transports collectifs. Dans le troisième scénario, en plus des hypothèses de TOD introduites dans le deuxième scénario, ont été ajoutées plusieurs interventions d'une politique d'amélioration du fonctionnement du système de transport, telles qu'elles figurent dans le Schéma Régional de Transport et de la Mobilité du Nord-Pas-de-Calais. Cette région, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, est caractérisée par le rôle attractif de l'aire métropolitaine de Lille, par son caractère transfrontalier et par la présence de plusieurs aires urbaines attractives dans la partie centrale ainsi que par des disparités régionales persistantes (de niveau social et économique) localisées surtout dans l'ancien bassin minier et dans certaines zones côtières.

La présence d'un système ferroviaire régional, bien structuré et avec des niveaux élevés d'efficacité et de qualité de service, considéré comme un élément clé du développement dans les plans stratégiques régionaux, nous a conduit à l'hypothèse d'un plan de développement régional structuré principalement sur le réseau ferroviaire. L'infrastructure ferroviaire régionale existante est en effet considérée, dans les documents de planification stratégique régionale, comme l'élément sur lequel fonder et construire le futur développement régional, en suivant des principes de durabilité et de croissance économique, qui devraient être porteurs d'une meilleure qualité de vie.