



**Université catholique de Louvain - Institut de Géographie**

---

PLAN D'APPUI SCIENTIFIQUE A UNE POLITIQUE DE DEVELOPPEMENT DURABLE

**Programme fédéral « Mobilité durable »**

**VERS UNE MOBILITE DURABLE : EFFETS ECONOMIQUES ET SPATIAUX D'UN  
TRANSPORT DE MARCHANDISES EN AUGMENTATION  
MD/DD/01**

**TACHE C - PARTIE UCL  
ÉVALUATION SPATIALE DES RESEAUX DE TRANSPORT DE  
MARCHANDISES EN BELGIQUE  
MD/10/003**

**Juin 2001**

**CHERCHEUR : JEAN-PIERRE HERMIA  
PROMOTEUR : PROFESSEUR ISABELLE THOMAS**

SERVICES FEDERAUX DES AFFAIRES SCIENTIFIQUES, TECHNIQUES ET CULTURELLES

---

Institut de Géographie, Université catholique de Louvain. Adresse de contact : Place Louis Pasteur, 3, Bat. Mercator, 1348 Louvain-La-Neuve. Tél. 010/47.21.36, 010/47.42.23 e-mail. [isabelle@geog.ucl.ac.be](mailto:isabelle@geog.ucl.ac.be), [hermia@spri.ucl.ac.be](mailto:hermia@spri.ucl.ac.be)

## 1. Objectif principal et démarche adoptée

L'objectif général de cette recherche est le suivant : faire une évaluation spatiale de la forme des réseaux de transport de marchandises en Belgique. Cette évaluation est ici réalisée uniquement en terme physique de forme, de connectivité, mais aussi et surtout en terme d'accessibilité, et cela pour les différents types de réseaux (routes, voies navigables, chemins de fer). Les coûts strictement économiques, quant à eux, sont étudiés par l'équipe de l'UFSIA (Tâche C – Partie UFSIA).

Pour être proche de la réalité, une évaluation se doit de conjuguer une approche qualitative ainsi qu'une étude quantitative, c'est pourquoi nous avons opté, au sein de cette recherche, pour une approche conjointe. L'analyse de base sera quantitative, au travers d'indicateurs (indicateurs de forme, d'accessibilité...) rigoureux dont la construction mathématique est directement inspirée par la revue de la littérature que nous avons effectuée dans les domaines des réseaux de transport, de la forme des réseaux et des indicateurs d'accessibilité. Une approche plus analytique et interprétative s'ensuivra, sur base des principaux résultats obtenus d'après le calcul d'indicateurs synthétiques.

Au sein de ce programme ayant pour thème la mobilité durable, notre approche se veut volontairement spatiale, avec comme préoccupation majeure de mettre en évidence les inégalités existant au sein d'un territoire, la Belgique, notamment en terme d'accessibilité. De même, l'étude de la forme des réseaux est intrinsèquement liée aux caractéristiques de l'espace passé au crible. Bien que la Belgique s'inscrive fortement dans un contexte de mobilité internationale, l'espace étudié a dû être bien défini dès le début de la recherche, pour des raisons essentiellement pratiques, il a été strictement limité au territoire national belge.

En outre, le sujet même de l'évaluation spatiale, à savoir les réseaux de transport de marchandises, apparaissent comme étant plus proche d'un concept que d'une réalité appréhendée clairement par tous. S'agit-il de n'étudier que les caractéristiques des infrastructures – physiques et statiques – ou plutôt de rendre compte de l'aspect dynamique des réseaux, tels que leur(s) évolution(s) spatio-temporelle(s), leur dynamique interne, les flux de marchandises qu'ils accueillent, leur efficacité ou encore l'inéquité qui peut exister à travers ces approches ? A quel degré de précision l'évaluation spatiale doit-elle être réalisée ? Il est probable que le choix de celui-ci influencera les résultats à venir. Pour répondre à ces diverses questions et pour atteindre notre objectif principal, nous avons travaillé selon la démarche suivante.

La première étape consiste à préparer les données sur lesquelles nous travaillons, c'est-à-dire principalement les réseaux de transport de marchandises en Belgique. La section « Les réseaux de transport – Méthodologie » relate cette partie de notre recherche, nécessairement antérieure à tout calcul d'indicateurs. Outre le choix du type de digitalisation des réseaux, au vu de l'indisponibilité d'outils digitalisés construits à des fins proches de notre objectif, il est nécessaire de construire des réseaux digitalisés qui nous sont propres, à partir de ceux effectués par l'équipe de la FUCaM, digitalisations réalisées lors de la conception du software NODUS (F.U.Ca.M. – G.T.M., 1997).

La construction de réseaux ayant une structure simple - proche de celle du réseau topologique - permet en effet d'appliquer à ceux-ci un grand nombre d'indicateurs. Le choix des indicateurs est basé sur une revue de la littérature (Annexes, chapitre 6). Cette revue, nous avons tenté de la rendre la plus critique possible, de manière à ne sélectionner au sein de la littérature scientifique que les indicateurs qui nous semblent les plus adéquats pour une évaluation spatiale des réseaux de transport. La littérature se rapportant directement au sous-secteur des transports que constitue le transport de marchandises étant assez limitée tant en volume qu'en originalité, nous nous basons principalement sur les écrits scientifiques ayant trait aux indicateurs non spécifiques à ce sous-

secteur, pour ensuite éventuellement les ajuster aux caractères propres au sous-secteur du transport de marchandises.

Les réseaux de base construits et les différents indicateurs sélectionnés, il nous apparaît utile de compléter notre base de données, sur base notamment des enseignements que nous apportent la revue de la littérature. Ainsi, en partant d'un réseau proche d'un graphe topologique, nous y associons un ensemble de données, qui sont les attributs des nœuds et des arcs du réseau initial. Les caractéristiques des nœuds telles que leur population – s'il s'agit de noyaux habités – ou leur « statut administratif », les caractéristiques des arcs (routes, chemins de fer, voies d'eau), telles que la vitesse maximale autorisée sur ceux-ci, leur nombre de voies, le trafic moyen qu'ils supportent, la présence éventuelle de congestion ou encore une estimation de la distance-temps séparant chaque paire de nœuds voisins ; toutes ces caractéristiques sont évaluées pour chaque nœud et chaque arc des réseaux que nous avons « construits », et ensuite encodées comme des variables – ou attributs – au sein de matrices initialisables en logiciels de GIS ou en tableurs Excel.

Enfin, après avoir effectué ces étapes de préparation des données, nous pouvons passer à la réalisation proprement dite de notre objectif principal. Une première évaluation spatiale des réseaux de transport en Belgique se fait à l'aide des indicateurs précités, d'une part pour la forme des réseaux. Il s'agit là d'étudier les caractéristiques des réseaux de transport belges dans leur ensemble. Nous n'en parlerons que brièvement dans ce rapport car les résultats ne sont guère sensationnels. Les résultats sont détaillés en annexes (chapitre 4). La deuxième évaluation spatiale se fait à une échelle plus fine, celle des nœuds qui composent les réseaux étudiés. Cette évaluation se fait essentiellement en terme d'accessibilité relative, car nous pensons qu'il s'agit là d'un concept à forte connotation spatiale qui est essentiel à nos yeux comme au sein de la littérature scientifique. La notion d'accessibilité se rapporte dans un premier temps à des points distincts au sein d'un espace fini. L'analyse est poussée plus en avant en terme d'accessibilité, puisque les mêmes indicateurs sont calculés pour différentes configurations du réseau routier (Annexes, chapitre 5). Cela nous permet de mesurer l'impact que produit notamment la présence de congestion, des variations dans la vitesse moyenne pratiquée sur les routes, et donc de la distance-temps, ou encore l'effet - que peut produire sur l'accessibilité des nœuds - de l'achèvement de l'autoroute A8 reliant Bruxelles à Lille via Ath et Tournai.

Après ces différentes analyses, surtout en terme d'accessibilité des nœuds des réseaux, il nous est apparu important de relativiser les résultats obtenus, de manière à tenter de dégager l'essentiel de l'accessoire. En effet, les indices calculés au cours des différentes analyses ne révèlent qu'un nombre limité de changements, notamment en terme de hiérarchie de niveau d'accessibilité. A quoi cela peut-il être dû ? Au cours des différentes étapes qui ont formé cette recherche, nous avons été très conscients que les différents choix effectués ont eu un impact non négligeable sur le déroulement des étapes ultérieures. C'est dans cette logique de prise de conscience que nous jugeons essentiel de critiquer nos propres indices au sein d'une discussion interne, dont nous relatons dans ce rapport les principaux traits. Cela est relaté, dans les grandes lignes, dans la section « Discussion ».

Parallèlement à cette recherche ayant pour thème l'évaluation spatiale des réseaux de transport de marchandises, une autre recherche fut menée par l'équipe de l'UCL, financée partiellement par les SSTC. Elle a pour sujet la localisation des plate-formes de transbordement. Elle consiste notamment en la conception d'un modèle de localisation optimale des plate-formes de transbordement des marchandises. La meilleure manière de résumer le travail et de reproduire ci-dessous les résumés des deux articles publiés sur le sujet. Les articles dans leur totalité sont en Annexes (chapitre 7). Des essais d'applications ont été faits à l'échelle de la Belgique, mais c'est à une échelle plus vaste (telle l'Europe) que ce type de modèles trouve toute sa pertinence. De telles applications sont en cours, avec une attention toute particulière pour les implantations belges, et ce dans le cadre du doctorat de Pierre Arnold, financé actuellement par l'UCL.

ARNOLD P., THOMAS I. Localisation des centres de transbordement dans un système multi-réseaux : essai de formalisation. *L'Espace Géographique* **28** :3, 193-204.

Multimodality is a competitive alternative for the transportation of people or goods. One of the elements intervening in the search for competitiveness between modes, is the location of the transshipment centres, that is the places where the change of mode or transportation occurs. This paper discusses the problem in the scope of the location theory. Hence, the location of the transshipment facilities between transportation networks is defined as a discrete problem that aims at optimally locating facilities that make possible the transfer from one network to another with the objective of reducing total transportation costs. These costs are defined as the sum of the transshipment costs and the cost(s) associated the transportation mode(s) operating on each network ; these latter costs are a function of the distance on each network and on the transported volumes. An analytical solution is proposed and discussed. An example of application to freight transport in Belgium illustrates its usefulness.

ARNOLD P., MARCHAND H., PEETERS D., THOMAS I. Optimal location of intermodal transshipment facilities between transportation networks : formulation and extensions. *The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien* (accepted for publication).

Transshipment facilities are nodes on a network where a change occurs between modes of travel or between transportation networks. Their location is important in the competitiveness of multimodal transport. The aim of this paper is to discuss this type of location in the scope of location theory. The location of the transshipment facilities between networks is here defined as a discrete problem that locates facilities (technical equipments) enabling the transfer from one transportation network to another, and minimising total transportation costs. A mathematical formulation of the problem is proposed and discussed : it relies on integer linear programming. This formulations is quite flexible and enables several extensions that can be combined in order to represent several real-world planning situations.

## 2. Méthodologie

L'étude des caractéristiques des réseaux de transport de marchandises en Belgique nécessite au préalable une sélection des infrastructures de transport qui forment le sujet d'étude. Réseaux routiers, ferroviaires et des voies navigables sont pris en compte séparément, mais il nous semble utile de définir avec précision un fond de carte commun aux trois types de réseau, afin de pouvoir envisager leurs caractéristiques communes. Bien appréhender de tels réseaux ne peut se faire que s'ils ont une structure claire, voire dépouillée, c'est pourquoi les réseaux comprenant l'ensemble des voies de transport ont subi une simplification plus ou moins conséquente, selon les cas, afin de se rapprocher d'une structure topologique<sup>1</sup>.

### 2.1. Choix des réseaux

La Belgique se distingue des autres pays par une forte densité de population. Son relief, peu marqué, a de tout temps favorisé les déplacements par voies d'eau, ainsi que l'aménagement de nombreux canaux navigables. La révolution industrielle du 19<sup>ème</sup> siècle s'est accompagnée d'une

<sup>1</sup> La notion de structure topologique, comme la plupart des notions théoriques issues notamment de la théorie des graphes, sont partiellement définies dans le chapitre « Une revue de la littérature » (Annexes, chapitre 6).

densification du réseau routier déjà existant, et du développement des chemins de fer. De ce fait, le système actuel de voies de transport belges, dont l'héritage du passé est important, est particulièrement ramifié. Pour appréhender ses caractéristiques intrinsèques, il est difficile - voire impossible - de le jauger dans son entièreté, du fait de sa trop grande complexité. Une approche distincte des trois types de voies de transport (voies navigables, ferroviaires et routières) permet déjà d'accéder à une certaine forme de clarté.

D'un point de vue pratique, le nombre de digitalisations des réseaux de transport belges est en augmentation depuis une dizaine d'années, du fait notamment de la démocratisation des logiciels de GIS (Geographical Information System). Parmi ces différentes digitalisations, nous n'abordons dans ce rapport que celles auxquelles nous avons eu accès. Elles sont au nombre de trois, à savoir celles produites par la société Tele Atlas Belgium, celles rassemblées pour le Mobiliteitsplan Vlaanderen et celles produites pour la réalisation du software NODUS par la FUCaM. Dans cette recherche, nous avons essentiellement utilisé la digitalisation de la FUCaM (« NODUS »), pour des raisons pratiques que nous relatons en annexes (chapitre 3).

## 2.2. NODUS

Le « réseau NODUS<sup>2</sup> » est constitué d'un ensemble de fichiers, cartographiques et textes, dont les liens sont des nœuds et des arcs. Cependant, il est loin de contenir l'ensemble des voies de transport du pays, puisqu'il ne comporte que quelques 5.000 nœuds et 5.000 arcs. Ici, le réseau belge est partitionné en trois : réseau routier, ferroviaire et de voies navigables. Pour construire le réseau routier, les auteurs n'ont retenu que les routes numérotées, ce qui explique sa moindre complexité. Celle-ci constitue d'ailleurs l'atout majeur de ce réseau, et le rend de ce fait plus facilement traitable que les réseaux BELNET10 ou BELNET50.

La non prise en considération des routes non numérotées constitue une simplification selon un critère systématique, et permet donc d'utiliser ce réseau comme donnée scientifique valable, puisque ce critère nous semble raisonnable notamment en terme de trafic routier. Par la suite, nous utiliserons systématiquement la digitalisation réalisée par le GMT de la FUCaM comme représentation de base des réseaux de transport en Belgique.

## 2.3. Simplification des réseaux, choix des arcs et des nœuds

Pour appréhender les caractéristiques du réseau de transport belge en terme de forme, d'accessibilité ou encore d'efficience, il est nécessaire de simplifier les réseaux exhaustifs (BELNET10, BELNET50) en réseaux de type topologique afin de pouvoir utiliser les éléments de la théorie des graphes.

Pour mener à bien cette simplification, qui consiste à ne retenir qu'une partie de l'ensemble des nœuds et des arcs, il est indispensable de suivre un critère précis et constant de simplification. Dans la littérature traitant des réseaux de transport, la plupart des auteurs utilisent un *critère démographique* (dont notamment : Bruinsma et Rietveld, 1993, Spence et Linneker, 1994, Gutiérrez et Urbano, 1996, Chapelon, 1998). Leurs réseaux sont constitués des villes d'au moins *n* habitants et des arcs (routes, chemins de fer) les reliant. Nombre d'entre eux se rendent bien compte que ce critère est loin d'être optimal : la taille démographique des villes fluctue dans le temps, et leur délimitation dans l'espace est loin d'être chose facile.

---

<sup>2</sup> Nous désignons par « réseau Nodus » la digitalisation des réseaux de transport belges réalisée lors de la conception et de la réalisation du software NODUS.

Cela est d'autant plus vrai en Belgique, pays au tissu urbain très dense, dont la définition spatiale des agglomérations varie selon les auteurs. En effet, la sélection des villes de plus de  $n$  habitants pose directement le problème du choix de l'unité administrative à prendre en compte. En Belgique, seules les entités communales sont retenues dans un premier temps, ce qui soulève directement la question de la fusion des communes : les villes de Charleroi, de Liège ou de Antwerpen ont vu une grande partie de leur agglomération fusionner en une seule commune en 1977, alors que la Région de Bruxelles-capitale est toujours constituée de ses 19 communes non fusionnées et s'étale en pratique sur plus de 32 communes en termes morphologiques (Thomas, Tulkens, 2000). De même, les limites extérieures des aires urbaines belges sont délicates à fixer, tant les phénomènes d'ex-urbanisation (périurbanisation, rurbanisation) sont importants en Belgique. En conséquence, poser un seul critère de sélection des nœuds est loin d'être chose facile, et il nous paraît moins hasardeux d'opérer plusieurs simplifications distinctes au sein du réseau de transport belge, avec des critères précis mais distincts eux aussi, de manière à obtenir différentes constructions de réseaux, toutes aussi logiques et rigoureuses dans leur élaboration.

### **Simplifications exploratoires** (Annexes, chapitre 3)

Seul le réseau NODUS est utilisé comme réseau de base sur lequel portera le processus de simplification en vue d'obtenir un ensemble de données plus facilement traitables. Ont été envisagés séparément les systèmes de voies navigables, routiers et ferroviaires.

### **Simplifications systématiques**<sup>3</sup>

Dans un second temps, vu l'ampleur des procédures de simplification précédentes effectuées pour le réseau de voies navigables, nous avons effectué pour les autres types de réseaux (ferroviaire, routier) les simplifications que nous jugeons les plus efficaces. Elles sont exposées ci-dessous.

#### **Réseau ferroviaire**

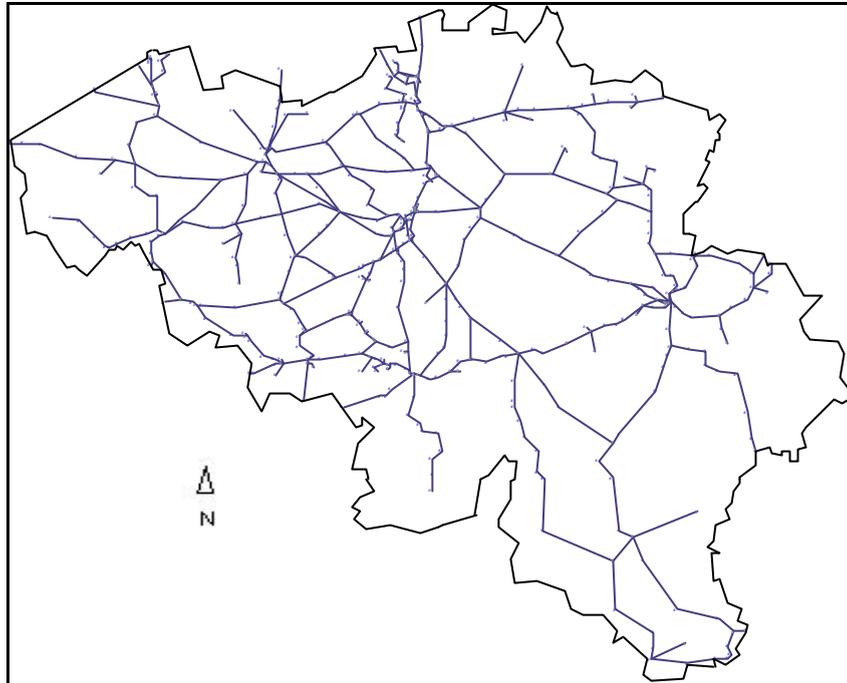
Le réseau ferroviaire belge est, dans le contexte européen, très ancien et particulièrement dense. En effet, il fut l'un des premiers réalisés dans le monde, suivant de peu le réseau anglais. Au 19<sup>ème</sup> siècle, ce réseau s'est constamment ramifié et densifié, passant de la ligne unique (Bruxelles-Malines au milieu du siècle) à un réseau assez complexe au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette densification s'est encore accrue jusqu'à l'aube de la Seconde Guerre mondiale, et cela principalement sous l'impulsion de compagnies privées qui œuvraient à l'essentiel des travaux de construction et d'entretien. Ainsi, dans les années trente, le réseau de chemins de fer belge atteint son apogée, et sa présence au sein de l'espace belge est relativement homogène, bien qu'elle soit déjà partiellement liée à la densité de population. Cependant, depuis la Seconde Guerre mondiale, le réseau ferroviaire belge ne cesse de se réduire spatialement, avec néanmoins quelques phases de construction, qui restent marginales. Cette phase de déclin touche principalement les zones rurales, où de nombreuses lignes de chemins de fer sont désaffectées (Ardenne, Hesbaye).

Il est toutefois important de souligner que la S.N.C.B. mène depuis quelques années une politique veillant à séparer spatialement le transport de personnes et le transport de marchandises. Pour cela, elle oriente préférentiellement les flux ferroviaires de marchandises sur des lignes moins « fréquentées » par sa clientèle de passagers, de manière à résorber les phénomènes d'encombrement des lignes par un des deux types de transport.

---

<sup>3</sup> Sont présentées ici les démarches les plus importantes de nos simplifications. Pour plus de précision, voir en Annexes, chapitre 3.

Le réseau ferroviaire digitalisé par la FUCaM comprend 491 nœuds et 552 arcs. Ainsi, NODUS reprend l'ensemble des voies de chemins de fer belges fréquentées en 1998, de même que toutes les gares IC, et une sélection des autres stations (figure 1).



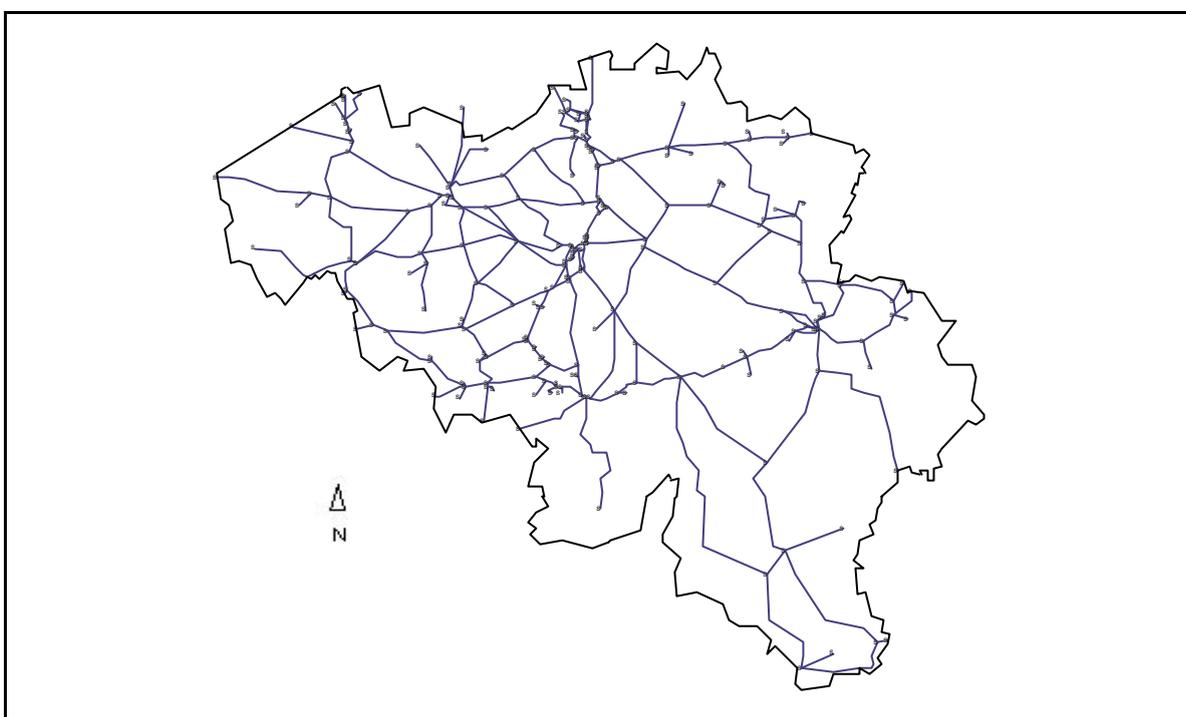
*Figure 1. Réseau NODUS de base – Chemins de fer (491 nœuds, 552 arcs).  
Source : FUCaM*

Ce réseau, assez ramifié, est plus dense dans sa partie orientale, et cela pour des raisons historiques : Hainaut et Flandre Orientale sont très denses en infrastructures ferroviaires. Ce réseau a comme caractéristique principale d'être polycentrique, avec un centre de premier ordre qui est Bruxelles. Comme nous le montre la figure, le réseau de chemins de fer est lié à la densité de population. C'est ainsi que la région flamande est généralement assez riche en infrastructures, de même que l'axe industriel wallon. Deux exceptions : le Hainaut, qui par son passé industriel très riche, fut rapidement doté d'un réseau ferroviaire extrêmement bien ramifié, et la Campine, dont le développement économique et industriel est assez récent (seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle) explique la faible desserte de son réseau ferroviaire. La Hesbaye francophone se distingue par son absence totale de voies de chemins de fer, hormis la ligne Bruxelles-Liège qui passe à Waremme. Les bassins industriels, tant les anciens (Hainaut, Liège, Bruxelles) que ceux qui ont encore connu un développement plus récent (Zeebrugge, extensions du port d'Antwerpen et de Gent) se caractérisent par une haute densité en infrastructures ferroviaires ; elles contiennent un nombre important de petites lignes de chemins de fer dont la plupart permet l'accès aux réseaux fluvial et maritime.

Nous avons procédé à une simplification systématique du réseau NODUS de base, en veillant à respecter des critères de simplifications rigoureux et constants. Nous intéressant au sein de notre projet au sous-secteur des transports qu'est le transport de marchandises, il nous a semblé judicieux de ne considérer que les infrastructures ferroviaires dont la vocation première est liée au transport de marchandises (Annexes, chapitre 3).

Dans le cadre de ce travail, ne garder comme nœuds que les gares IC ne nous semble pas un bon critère de simplification. En effet, les caractéristiques des gares IC, tant en fréquence qu'en répartition spatiale, sont nettement liées au transport des personnes. La simplification effectuée se

base un critère plus « objectif », en ce sens qu'il est détaché de toute considération de transport de personnes : seuls les nœuds au sens topologique sont retenus, c'est-à-dire les nœuds qui constituent des carrefours. Cela nous semble une simplification acceptable, car, outre le fait qu'elle soit très simple à réaliser, elle repose sur un critère scientifique fortement usité dans la littérature liant réseaux et théorie des graphes (cfr. Annexes, Chapitre 6). De plus, cette simplification permet de conserver l'ensemble des nœuds situés dans les régions industrielles et desservant les réseaux fluvial et maritime, nœuds aujourd'hui pour la plupart utilisés pour le transport des marchandises. D'autre part, les nœuds qui ne constituaient pas des nœuds au sens topologique du terme ont été éliminés. Les arcs, quant à eux, sont constitués des voies de chemins de fer reliant deux nœuds. Au cours du processus de simplification, les arcs du réseau NODUS de base ont été transformés de manière à ce qu'un et un seul arc soit compris entre deux nœuds topologiquement voisins. Ainsi, de nombreux arcs ont été « fusionnés », et leurs caractéristiques ont été modifiées en conséquence dans la base de données. Le réseau ferroviaire simplifié (figure 2) est constitué de 222 nœuds et de 281 arcs.



*Figure 2. Réseau NODUS simplifié – Chemins de fer.*  
Source : FUCaM

### Réseau routier

Le réseau routier belge, est, parmi les trois types de réseaux pris en compte dans cette étude, de loin le plus dense, le plus ramifié mais aussi le complexe. Sous l'occupation romaine, déjà, un réseau routier bien structuré avait été établi, et depuis, il n'a cessé de se développer. Comme le réseau fluvial, il a souvent suivi la localisation du peuplement humain, mais il l'a aussi profondément marqué. Il est indéniable que le développement d'axes routiers à voies rapides et d'autoroutes a permis le désenclavement de certaines sous-régions belges, en réduisant sensiblement le temps de parcours qui les séparaient des centres urbains majeurs. Ce désenclavement se traduit dans la réalité par un regain démographique, et souvent, par la relocalisation des sites d'intense activité économique, notamment au sein de zonings semi-industriels.

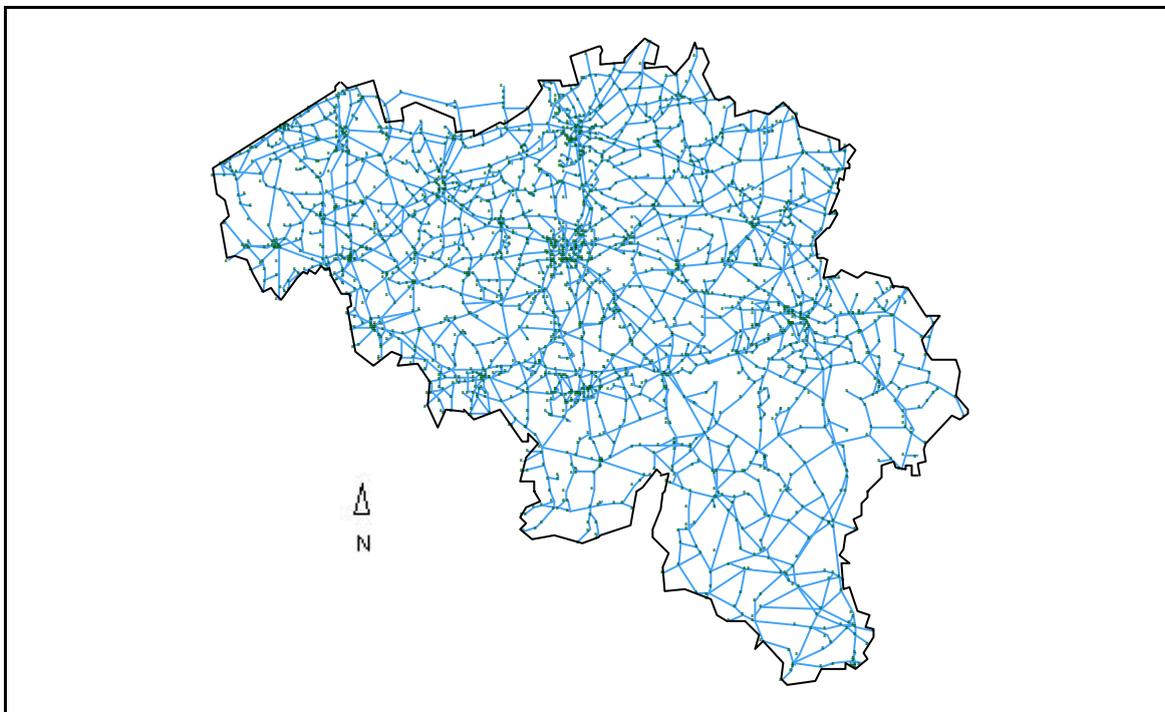
A l'origine fortement polarisé, le réseau routier est lié à la hiérarchie des villes belges, bien que l'impact du secteur industriel ait été déterminant, notamment au 19<sup>ème</sup> siècle. Son implantation dans l'espace belge est donc essentiellement lié à des facteurs historiques et économiques. Les contraintes physiques (relief,...) ont depuis toujours été moins marquantes sur son développement que sur celui des réseaux ferroviaires et de voies navigables. Cela explique en grande partie le fait que les infrastructures routières ont une densité élevée dans la quasi-totalité du territoire belge. Les centres urbains sont évidemment les zones de densité en infrastructures les plus élevées, bien que cette position de force s'estompe depuis quelques décennies avec l'homogénéisation de l'espace belge en terme d'infrastructures routières (construction de périphériques, surtout en région flamande, densification du réseau en région péri-urbaine, création d'autoroutes). Seules quelques sous-régions demeurent sous-équipées en infrastructures routières, et cela principalement pour des raisons historiques (Campine limbourgeoise) ou de faiblesse de peuplement (zones forestières de l'Ardenne).

Pour le réseau routier, qui a une structure spatiale plus complexe et plus dense que celle du réseau ferroviaire, nous avons construit une typologie des nœuds selon différents critères : démographique, administratif et socio-économique. Cela nous permet de mieux appréhender les caractéristiques des nœuds, c'est-à-dire des simples carrefours, mais aussi et surtout des agglomérations. L'objectif de cette caractérisation des nœuds est de permettre de justifier la simplification du réseau routier, effectuée par ailleurs selon un critère simple, rigoureux, et le plus constant possible au sein de l'espace belge.

Le réseau NODUS de base comporte 2291 nœuds et 3223 arcs, et reflète assez bien la complexité du réseau routier belge (figure 3).

*Figure 3. Réseau NODUS de base – Réseau routier (2291 nœuds, 3223 arcs).*

*Source : FUCaM*



La simplification que nous avons retenue et effectuée dans cette recherche est basée à la fois sur une sélection des arcs et une sélection des nœuds. Pour des raisons d'ordre pratique et matériel<sup>4</sup>, il nous semble impossible de garder l'ensemble des routes reprises dans la digitalisation NODUS. Ainsi, n'ont été gardées systématiquement que les routes de type 5, 6, 7 dans la nomenclature NODUS (Annexes, chapitre 3), ce qui correspond aux autoroutes, aux voies rapides et aux principales routes nationales. Les routes de type 1, 2, 3, 4, qui correspondent aux autres types de routes, ont été pour la plupart d'entre elles éliminées, du moins si elles ne reliaient pas directement des nœuds sélectionnés d'après les critères retenus.

La sélection des nœuds est plus complexe, et nous avons réalisé différentes simplifications, aucune n'étant parfaite, bien qu'une d'entre elles a finalement été retenue, étant jugée comme la plus acceptable. Après cette dernière, le réseau NODUS simplifié est constitué de 1609 arcs et de 1068 nœuds (figure 4), ce qui veut dire que plus de la moitié des arcs et près de 60 % des nœuds du réseau routier NODUS initial ont été éliminés au cours de la simplification retenue. Les nœuds systématiquement retenus le sont selon trois critères distincts : un premier d'ordre « administratif », un second d'ordre « démographique » et le troisième d'ordre « topologique ».

Premièrement, tous les nœuds correspondant au siège administratif des cantons administratifs ont été retenus. Le choix du canton administratif comme unité administrative systématiquement retenue est rare en Belgique, les préférences du monde scientifique se portant plus souvent sur la commune ou sur une autre unité (région, province, arrondissement). Ce choix fut guidé par un impératif simple : le nombre de nœuds total que pouvait contenir le réseau simplifié ne devait pas excéder un certain seuil maximal pour des raisons techniques, or si toutes les communes avaient été retenues, ce seuil aurait été dépassé car il y a un effet multiplicatif du nombre de nœuds.

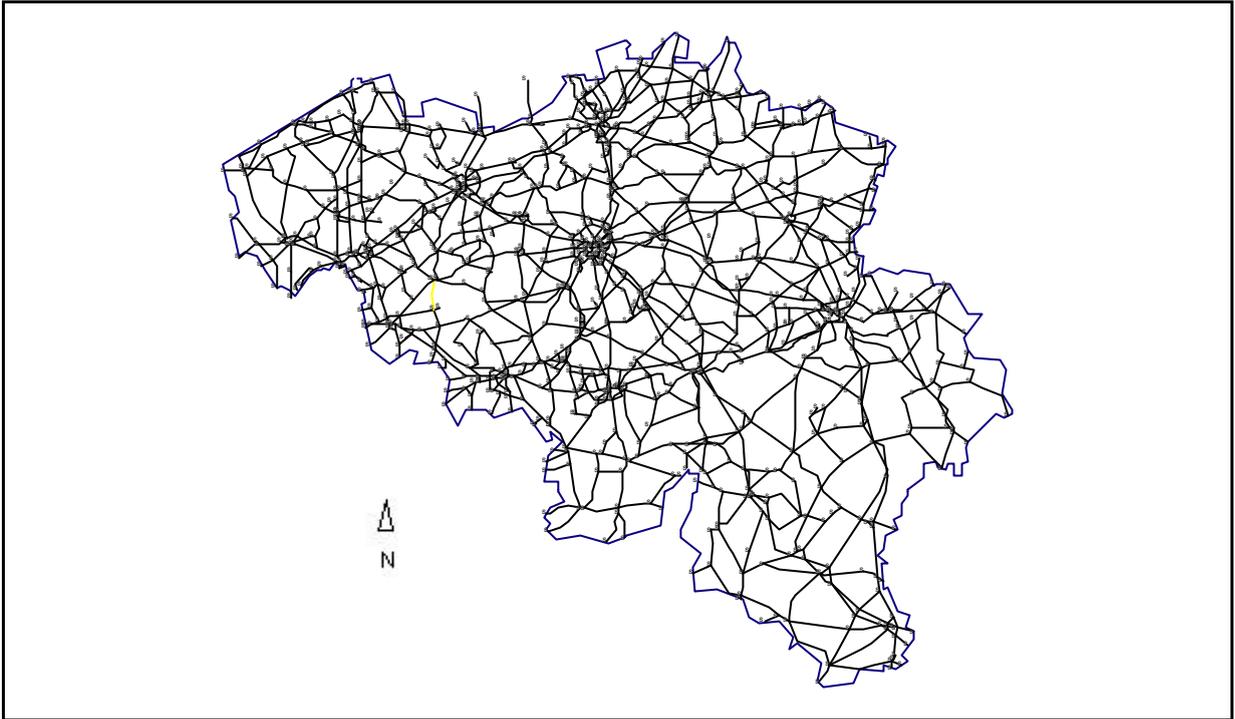
Ensuite, les nœuds ne correspondant pas au siège d'un canton administratif mais correspondant bien à celui d'une commune ont été envisagés selon leur effectif de population. Si celui-ci est supérieur au seuil retenu (20.000 habitants), le nœud est systématiquement retenu (Annexes, chapitre 3). Le choix de ce seuil peut paraître arbitraire, toutefois il correspond aux seuils généralement définis pour les études sur les réseaux de transport effectuées ces dernières années, pour un territoire de taille comparable à celle de la Belgique (Gutiérrez et Urbano, 1996).

Enfin, tous les nœuds permettant l'accès aux nœuds retenus selon les deux critères mentionnés ci-dessus sont également retenus, de même que ceux qui sont en contact direct avec les arcs retenus lors de la simplification systématique. Le réseau simplifié se compose dès lors de 1068 nœuds et de 1609 arcs.

Les opérations de simplification des réseaux NODUS de base constituent une étape assez importante de cette recherche. La partie la plus importante fut sans conteste les simplifications exploratoires, essentiellement effectuées sur le réseau de voies navigables car celui-ci avait une construction assez simple. Pour les réseaux ferroviaires et routiers, les étapes exploratoires ont été réduites, et une simplification plus systématique fut rapidement mise en œuvre. Elle s'est basée sur un critère « topologique » pour le réseau de chemins de fer, et sur des critères distincts (démographique, topologique, administratif, pratique) pour le réseau routier. Ces réseaux simplifiés, associés aux caractéristiques des nœuds et des arcs passés en revue au point 2.4., constituent la base de données sur laquelle sont calculés les indicateurs.

---

<sup>4</sup> Et cela principalement pour le calcul informatisé des différents indicateurs.



*Figure 4. Réseau NODUS simplifié – Réseau routier (1068 nœuds, 1609 arcs). Source : FUCaM*

## 2.4. Caractéristiques des nœuds et des arcs

### Variable démographique

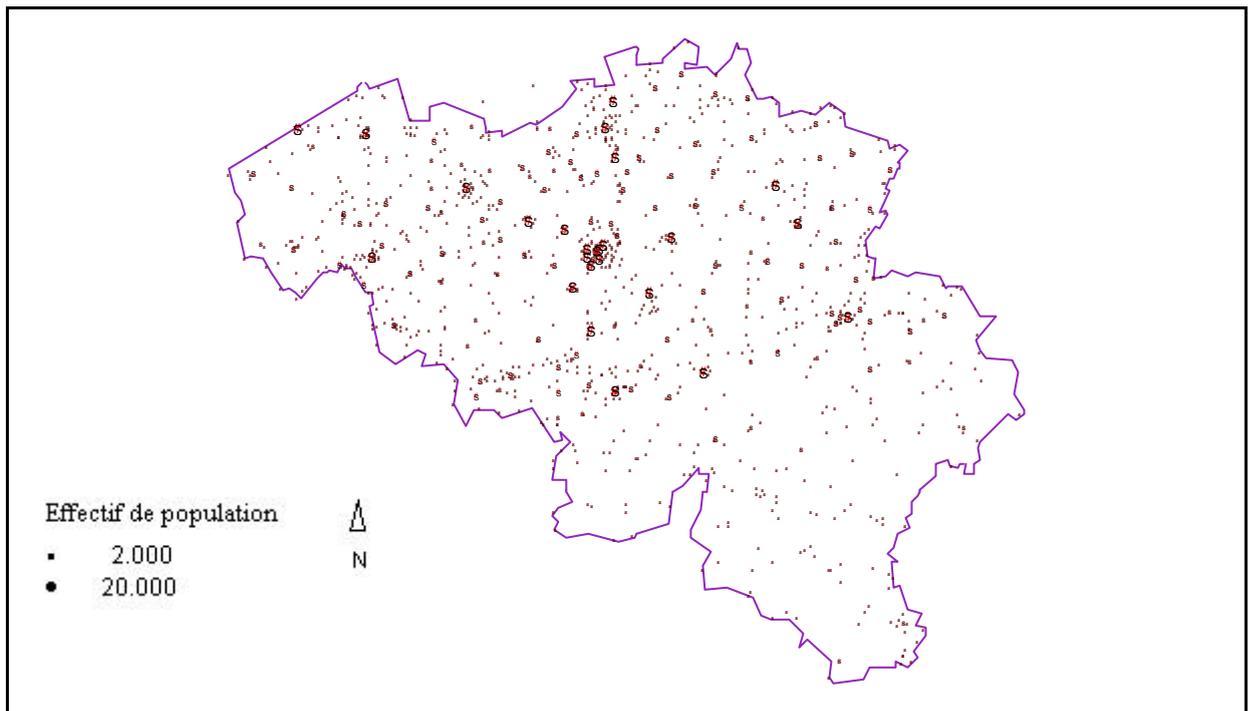
La plupart des auteurs s'intéressant aux réseaux de transport sélectionnent les nœuds de leurs réseaux selon un critère démographique des plus simples : le seuil de population. Ce critère a pour avantage de présenter une apparente uniformité au sein de territoires administratifs distincts. En effet, les entités de plus de  $n$  habitants sont sélectionnables partout dans le monde, puisque généralement le chiffre de population d'un lieu est l'une des variables les plus souvent répertoriées. Cependant, le problème est autre part : il réside en la définition de l'entité. Celle-ci varie très fortement dans le temps (fusion des communes) comme dans l'espace (différenciation dans l'appellation « commune »). En Belgique, l'unité territoriale la plus utilisée, notamment dans les études à composante spatiale, est sans conteste la commune. Depuis la fusion de 1977, le nombre de celles-ci a été réduit par 4 pour atteindre 589 pour tout le Royaume. Hélas, le processus de fusion n'a pas été uniforme. Bien qu'obéissant à des règles strictes (seuil minimum de population, respect de l'ancienne armature urbaine), il a épargné les 19 communes qui forment aujourd'hui la Région Bruxelloise, à l'inverse des autres centres urbains belges, composés pour la plupart d'une seule nouvelle commune (Antwerpen, Liège, Gent, Charleroi).

Caractériser les nœuds des différents réseaux de transport par la population des entités administratives (communes) auxquelles ils appartiennent constitue la première étape dans l'attribution de poids aux nœuds en question. Les différentes étapes de cette caractérisation sont relatées en annexes (chapitre 3). L'approche économique, quant à elle, est envisagée par l'équipe de l'UFSIA (cfr. Tâche C – Partie UFSIA).

Dans une seconde étape, nous avons opté pour une autre caractérisation démographique des nœuds : les nœuds sont caractérisés par une variable correspondant à une fonction de l'effectif de la population de la commune à laquelle ils appartiennent (Annexes, chapitre 3). Cette variable, de construction empirique, tente de mieux approcher la répartition spatiale de la population au sein même de la commune.

Cependant, cette caractérisation ne nous satisfait pas non plus. Le nombre de nœuds pris en compte est inchangé. La représentativité des nœuds, toujours implicitement liée à la définition spatiale des territoires communaux, reste discutable. De plus, pour des raisons d'ordre pratique, seuls les cantons administratifs ont été systématiquement retenus lors de la simplification du réseau NODUS routier.

Nous calquant sur le processus de simplification, nous attribuons aux nœuds retenus une variable démographique correspondant à une fonction de la population du canton d'appartenance. Cette fonction est toute simple : si, au sein d'un canton administratif, une commune (autre que celle du siège administratif du canton) a un effectif de population de plus de 20.000 habitants, on retire de l'effectif de population total du canton cet effectif particulier, sinon, la totalité de la population du canton administratif est attribuée au nœud correspondant au siège administratif de celui-ci. En outre, pour les communes dont l'effectif de population dépasse 20.000 habitants et qui ne sont pas le siège administratif d'un canton, le nœud correspondant au siège administratif de la commune se voit attribuer de l'effectif de population de celle-ci (Annexes, chapitre 3).



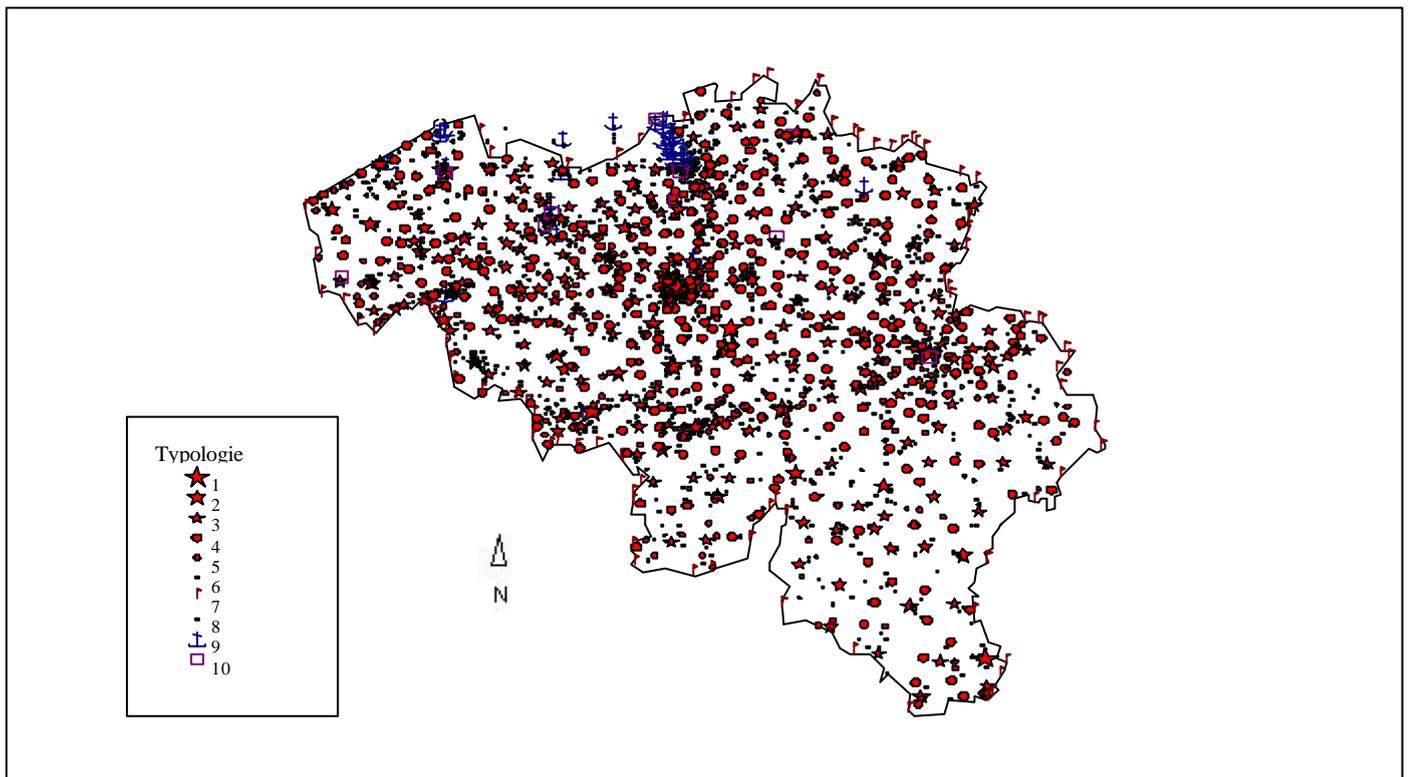
*Figure 5. Caractérisation des nœuds par une fonction de l'effectif de population du canton d'appartenance*  
Source : FUCaM

### **Positionnement « administratif » des nœuds**

Outre l'attribution aux différents nœuds du réseau simplifié d'une variable démographique, il apparaît utile de caractériser le positionnement « administratif » des nœuds. En effet, dans la littérature scientifique relative à l'étude quantitative des réseaux de transport, la sélection des

noëuds se fait régulièrement selon un critère administratif, que ce dernier soit clairement énoncé (Linneker et Spence, 1991, Murayama, 1994, Song, 1996, Brus, 1997, Gutiérrez et Gómez, 1999) ou voilé sous la forme d'une partition du territoire étudié en quartiers distincts (Morris, Dumble et Wigan, 1979). Le processus de simplification effectué au 2.3. fait d'ailleurs appel à un critère administratif : seuls les cantons administratifs sont retenus systématiquement dans un premier temps.

Pour mener à bien ce processus, nous avons attribué à chaque noëud du réseau NODUS initial une valeur déterminant le positionnement administratif de celui-ci, selon la typologie présentée au tableau 1 (Annexes, chapitre 3).



*Figure 6. Typologie « positionnement administratif » du réseau NODUS routier (non simplifié)*

*Source : FUCaM*

Cette typologie des noëuds (figure 6) mêle des aspects de positionnement au sein de la hiérarchie administrative belge (codes 1, 2, 3, 4, 5), de liens éventuels entre les différents types de réseau, via les terminaux (codes 9 et 10). Lors du processus de simplification du réseau NODUS routier, seuls les noëuds de codes 1, 2, 3 ont été systématiquement retenus. Par contre, les noëuds de codes 5 et 6 ont tous été éliminés. Pour les autres codes, seuls certains noëuds ont été retenus : les noëuds de code 4 ayant un effectif de population de plus de 20.000 habitants, ceux de code 7 dont l'accès a été retenu lors de la simplification par élimination des arcs, ceux de code 9 et 10 maintenus lors de la simplification des deux autres types de réseau (voies navigables et chemins de fer), et enfin ceux de code 8 dont l'existence s'avère encore nécessaire après élimination des arcs non retenus.

### **Autres caractéristiques des nœuds**

Au sein de la littérature scientifique, il n'est pas rare que les auteurs associent aux nœuds des réseaux de transport passés à la loupe d'autres caractéristiques propres à ceux-ci. Le type de variables caractérisant les nœuds dépend la plupart du temps de l'orientation de la recherche effectuée, qu'elle soit de type strictement économique, via les sites d'activité économique (Song, 1996), ou à composante multidisciplinaire (géomarketing, évaluation des services d'aides aux entreprises, aménagement et logistique, impacts environnementaux de nouvelles implantations, localisations diverses), via les sièges d'une organisation, de compagnies,... (voir notamment Bamford et Robinson, 1978). Dans le cadre de cette recherche orientée vers le transport de marchandises, nous faisons l'hypothèse selon laquelle pour un site (un nœud), l'activité économique directement concernée par le transport de marchandises, multi-sectorielle, est directement liée à l'effectif de population de ce site. Cette approximation, bien que grossière, satisfait de manière acceptable aux objectifs de la tâche qui nous incombe, puisque l'orientation de celle-ci est essentiellement spatiale, et non économique comme la recherche développée par l'autre équipe de la tâche C de ce projet « Vers une mobilité durable : effets économiques et spatiaux d'un transport de marchandises en augmentation ».

### **Caractéristiques des arcs**

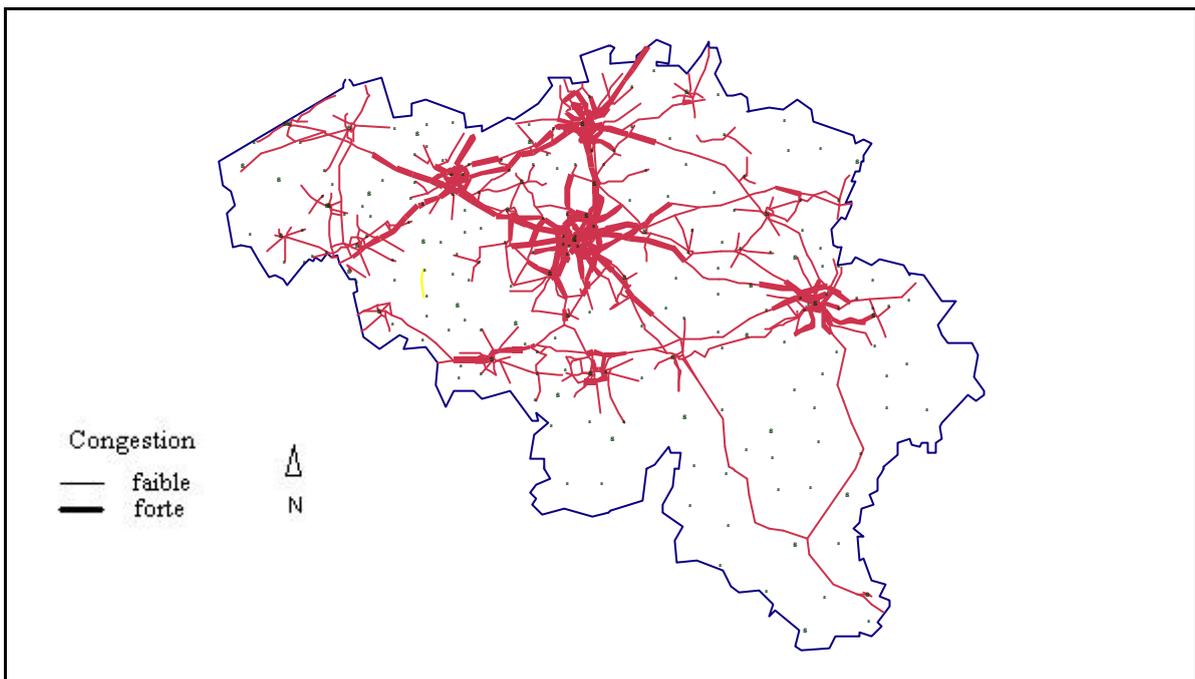
Au sein des digitalisations réalisées par la FUCaM lors de la construction du logiciel NODUS, aux arcs des différents types de réseau (voies navigables, chemins de fer, routes) sont associés certains attributs qui les caractérisent (Annexes, chapitre 3). Afin d'atteindre l'objectif principal de cette recherche, il nous semble nécessaire d'associer aux arcs du réseau routier des informations concernant la fréquentation journalière de ceux-ci, l'éventuelle présence de congestion sur les arcs, et enfin la perte quantitative de temps que celle-ci pourrait entraîner. Dans les paragraphes qui suivent, dans lesquels nous décrivons succinctement les variables créées en vue d'améliorer la base de données, la digitalisation dont il est question n'est pas le réseau NODUS initial, mais bien le réseau NODUS routier simplifié. Trois variables sont ainsi créées ou tout simplement ajoutées à la base de données. La première est une variable exprimant la congestion automobile, du point de vue théorique.

De nombreux auteurs se sont intéressés au problème crucial que constitue l'encombrement croissant des axes routiers (voir notamment Forkenbrock, 1999, Westlund, 1999, Rietveld, Zwart, van Wee, van den Hoorn, 1999). Lors de leurs études respectives portant sur le trafic, les réseaux de transport ou encore les coûts de transports, ils l'ont soit mesuré empiriquement, sur le terrain, soit ils l'ont estimé à l'aide d'indicateurs indirects (augmentation des temps de parcours, études d'incidences diverses, évaluation du retard au travail), soit ils ont construit une fonction se basant sur des hypothèses diverses, basée sur la théorie micro-économique et sur des données réelles. Dans le cadre de cette recherche, nous estimons la congestion automobile et son impact sur la distance-temps en construisant une fonction de congestion à deux composantes : une fonction théorique et des données réelles de trafic (Annexes, chapitre 3).

Outre cette fonction théorique, notre variable de congestion comporte aussi une composante issue de données réelles (Figures 14 à 16 en Annexes). Il s'agit des chiffres de trafic publiés par le Ministère Fédéral des Communications et de l'Infrastructure, lors du recensement de la circulation 1998. Ces chiffres n'ont pas tous été établis selon la même procédure. Aux abords des agglomérations, il s'agit des chiffres issus des comptages automatiques permanents sur le Ring de Bruxelles et les principales voies d'accès vers la Petite Ceinture, sur le Petit Ring d'Anvers y compris les tunnels en périphérie, sur la Grande Ceinture de Charleroi, sur le Ring de Gent et dans la périphérie de Liège. Ailleurs, les chiffres introduits dans notre base de données sont le résultat

des comptages automatiques permanents par compteurs à boucle, situés à des endroits fixes sur les autoroutes et sur les routes numérotées, ainsi que les résultats des comptages semi-permanents par compteurs à tube sur quelques routes numérotées.

La variable congestion (figure 7) est formée des deux variables présentées ci-dessus. Elle est essentiellement empirique, et ne cherche pas à mesurer précisément le phénomène complexe et volatile tant dans l'espace que dans le temps qu'est celui de la congestion automobile. Son objectif est d'essayer de quantifier l'impact que peut produire un tel phénomène sur le temps de parcours, et donc sur l'accessibilité. A cette fin, la variable construite nous semble assez acceptable, et elle introduit des changements non négligeables dans la hiérarchie des nœuds – du point de vue accessibilité - comme nous le percevons à la section 3 de ce rapport synthétique.



*Figure 7. Représentation des arcs selon la fonction de congestion*

Ce chapitre relatif à la méthodologie et à la constitution de notre base de données ne traduit pas totalement la part importante qu'ont prises ses différentes étapes – choix de la digitalisation, choix du processus de simplification, simplification des différents réseaux, amélioration de la base de données – au sein de notre recherche. Néanmoins, ces étapes n'ont pas été inutiles, car elles nous ont permis de cerner et de sonder en profondeur le domaine des réseaux, qu'ils soient de transport ou non.

### 3. Résultats

Dans ce rapport, nous ne relatons que les principaux résultats en terme d'accessibilité. Nous n'abordons que très brièvement l'étude des réseaux dans leur ensemble (forme des réseaux). Cet aspect de notre recherche constitue un chapitre peu développé (Annexes, chapitre 4). L'étude de la forme, notamment, n'a été envisagée qu'à l'échelle du territoire belge dans son ensemble. Les indices d'accessibilité nodale, quant à eux, sont passés à la loupe. Ils sont par ailleurs largement discutés au chapitre suivant.

Pour faire une bonne évaluation spatiale des réseaux de transport de marchandises, il nous a semblé utile d'utiliser des indicateurs mesurant certains concepts fréquemment utilisés dans le

domaine des transports. Parmi les concepts particulièrement « à la mode », celui d'accessibilité nous a semblé très intéressant car il possède une importante composante spatiale. Le choix des indicateurs utilisés s'est fait sur base d'une revue de la littérature assez minutieuse, dont l'essentiel est relaté en Annexes (chapitre 6), que nous avons effectuée dans les domaines des réseaux de transport, mais aussi de la forme des réseaux et des indicateurs d'accessibilité. Au sein de ce programme ayant pour thème la mobilité durable, notre approche se veut volontairement spatiale, avec comme préoccupation majeure de mettre en évidence les inégalités existant au sein d'un territoire, la Belgique, notamment en terme d'accessibilité. De même, l'étude menée sur la forme des réseaux (Annexes, chapitre 4) est intrinsèquement liée aux caractéristiques de l'espace passé au crible.

La construction de réseaux ayant une structure simple – proche de celle du réseau topologique – permet d'appliquer à ceux-ci un grand nombre d'indicateurs. Le choix des indicateurs est basé sur une revue de la littérature que nous avons tentée de rendre la plus critique possible, de manière à ne sélectionner au sein de la littérature scientifique que les indicateurs qui nous semblent les plus adéquats pour une évaluation spatiale des réseaux de transport. La littérature se rapportant directement au sous-secteur des transports que constitue le transport de marchandises étant assez limitée tant en volume qu'en originalité, nous nous basons principalement sur les écrits scientifiques ayant trait aux indicateurs non spécifiques à ce sous-secteur, pour ensuite éventuellement les ajuster aux caractères propres au sous-secteur du transport de marchandises.

Les indicateurs d'accessibilité utilisés dans la littérature spécifique aux réseaux de transport ont des formes différentes, et selon l'aspect que privilégie l'auteur, une signification différente. Nous avons pensé au terme de la revue de la littérature que les indicateurs les mieux adaptés aux objectifs poursuivis dans cette recherche sont les indicateurs d'accessibilité nodale de type gravitaire. Ceux-ci ont une construction assez simple, et la valeur de l'indice d'accessibilité pour un nœud dépend essentiellement du poids des nœuds du réseau et des « distances » les séparant les uns des autres.

Ainsi, nous avons toujours utilisé la même formulation générale lors du calcul des indices d'accessibilité. Seuls les paramètres de ceux-ci ont été modifiés, de manière à appréhender l'importance relative de ces paramètres au sein de la formulation générale, qui est la suivante :

$$A_i = \frac{\sum_j f(d_{ij}) \cdot f(P_j)}{n \sum_j f(P_j)} \quad [1]$$

$A_i$  est la mesure quantitative de l'accessibilité nodale du nœud  $i$

$j$  est un nœud quelconque du réseau étudié

$f(d_{ij})$  est une fonction de la distance entre le nœud  $i$ , dont on mesure l'accessibilité nodale, et le nœud  $j$ , nœud quelconque appartenant au réseau de transport étudié. On parle fréquemment, dans la littérature anglo-saxonne, de l'impédance (*impedance*). Plus qu'une distance, cette fonction correspond d'avantage au frein que produit la distance (ou le temps) sur l'interaction entre nœuds d'un champs spatial.

$f(P_j)$  est une fonction du poids relatif du nœud  $j$ , nœud appartenant au réseau de transport étudié.

$n$  est le nombre total de nœuds que comprend le réseau de transport étudié.

$P_j$  est le poids du nœud  $j$  appartenant au réseau étudié.

Cette formulation de l'indice d'accessibilité est une réécriture des indices de type gravitaire construits par différents auteurs (Annexes, chapitre 6). De ce fait, elle se rapproche de la formulation de l'interaction spatiale existant entre les différents lieux de l'espace. Ainsi, l'accessibilité entre différents nœuds (ou entre un nœud et tous les autres) peut être considérée comme une forme d'interaction spatiale.

Nous avons successivement calculé ce type d'indices d'accessibilité pour les réseaux de voies navigables, ferroviaire et routier. Des modifications des paramètres, principalement du poids assigné aux nœuds et de l'impédance relative aux arcs, ont été apportées. Seuls les résultats les plus originaux sont repris dans les paragraphes qui suivent.

### 3.1. Réseau de voies navigables

Le réseau de voies navigables retenu pour le calcul des indices est basé sur la digitalisation effectuée par la FUCaM lors de la réalisation de NODUS. Il contient 146 nœuds et 166 arcs. Le poids affecté à chacun des nœuds est une estimation de la population environnante (Annexes, chapitre 3 et 5). Quant à l'impédance prise en compte pour les différents calculs, il s'agit de la distance kilométrique séparant les nœuds topologiquement voisins. Différentes analyses des résultats ont été effectuées pour tenter d'appréhender la (les) hiérarchie(s) de niveau d'accessibilité pour ce type de réseau.

L'analyse menée à l'échelle du Royaume et celle des indices d'accessibilité donne les résultats suivants. Le réseau de voies navigables est relativement bien développé en Belgique. Il est adapté au relief dont il est fortement dépendant. Outre des voies d'eau naturellement navigables ou aménagées spécialement en ce sens, il comporte un nombre non-négligeable de canaux. Les indices d'accessibilité obtenus sur base du « réseau - graphe » retenu montrent que c'est en Région flamande que les nœuds du réseau de voies navigables sont les plus accessibles (figure 8<sup>5</sup>), et plus particulièrement dans un triangle délimité par Antwerpen, Mechelen et Dendermonde. Plus généralement, c'est tout le bas du bassin de l'Escaut qui est fortement accessible, ainsi que la partie occidentale du Canal Albert. Cela était prévisible au vu de la forte concentration des infrastructures de voies d'eau dans ces zones.

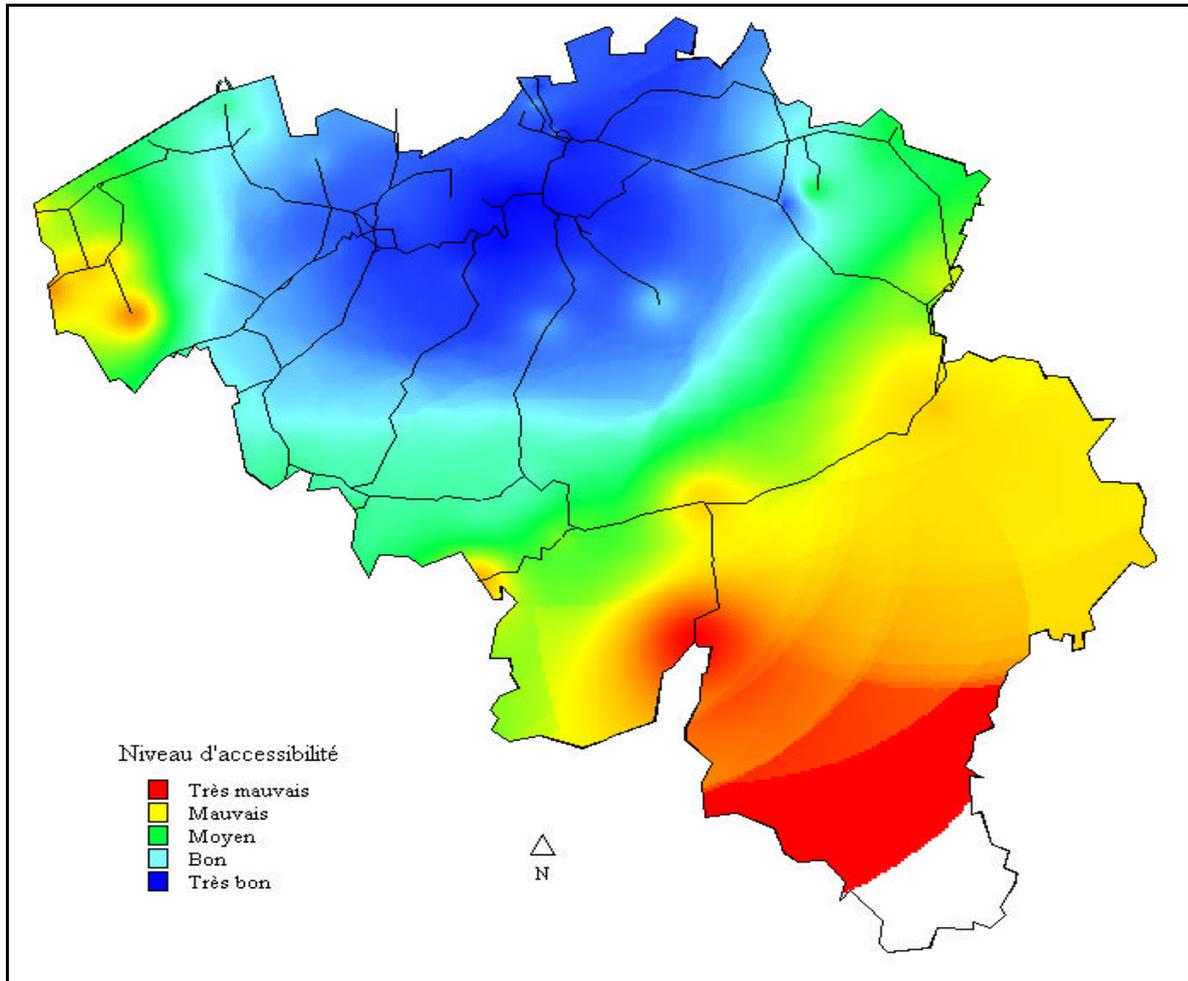
L'introduction dans les procédures de calcul d'indices de variation de poids des nœuds (fonction de la population ou de l'activité économique selon les cas), de même que l'élimination de certains nœuds du réseau, jugés topologiquement inutiles, ne modifient pas la hiérarchie des nœuds en matière d'accessibilité. Nous avons donc pu établir différentes hiérarchies de nœuds, classés selon le niveau de leur indice d'accessibilité. Ensuite, nous comparons le positionnement d'un même nœud au sein des différents classements. Le coefficient de corrélation de Spearman (C), coefficient de corrélation classique appliqué aux rangs au sein des différentes hiérarchies, établies selon les valeurs des indices calculés d'après la formule [1] mais dont on a fait varier les paramètres ; ces coefficients varient entre 0.98 et 1.00 selon les paires de classements comparés deux à deux (Annexes, chapitre 5). Ces variations effectuées au sein de la formulation de base n'ont donc qu'une influence très limitée, voire nulle<sup>6</sup>. La hiérarchie de niveaux d'accessibilité semble donc « figée » dans l'espace.

<sup>5</sup> Les figures 8 et suivantes peuvent être qualifiées de « pseudo carte d'iso-accessibilité ». Elle représente dans l'espace cartographié belge des plages pixelisées de coloration continue. Travaillant essentiellement par interpolation linéaire, cela donne une bonne approximation visuelle de la diversité des niveaux d'accessibilité au sein de l'espace belge.

La cartographie par plages de coloration continue est une des options du logiciel de cartographie MAPINFO. La coloration continue en plages distinctes se fait par interpolation linéaire des résultats des indices d'accessibilité du réseau en question.

<sup>6</sup> Dans le cas où  $C = 1.00$ .

Il est possible, voire probable que cette « inertie » observées au sein des différentes hiérarchies est due au fait que le réseau de voies navigables est loin d'être homogènement distribué au sein de l'espace belge. De grandes différences de densité existent en terme d'infrastructure de voies d'eau : la région flamande est beaucoup plus dense en voies d'eau navigables que la région wallonne. De ce fait, quel que soit le poids affecté aux différents nœuds, ou l'impédance attribuée aux différents arcs, de nettes différences de niveau d'accessibilité sont une constante pour ce type de réseau.



*Figure 8. Carte d'iso-accessibilité, réseau de voies navigables.*

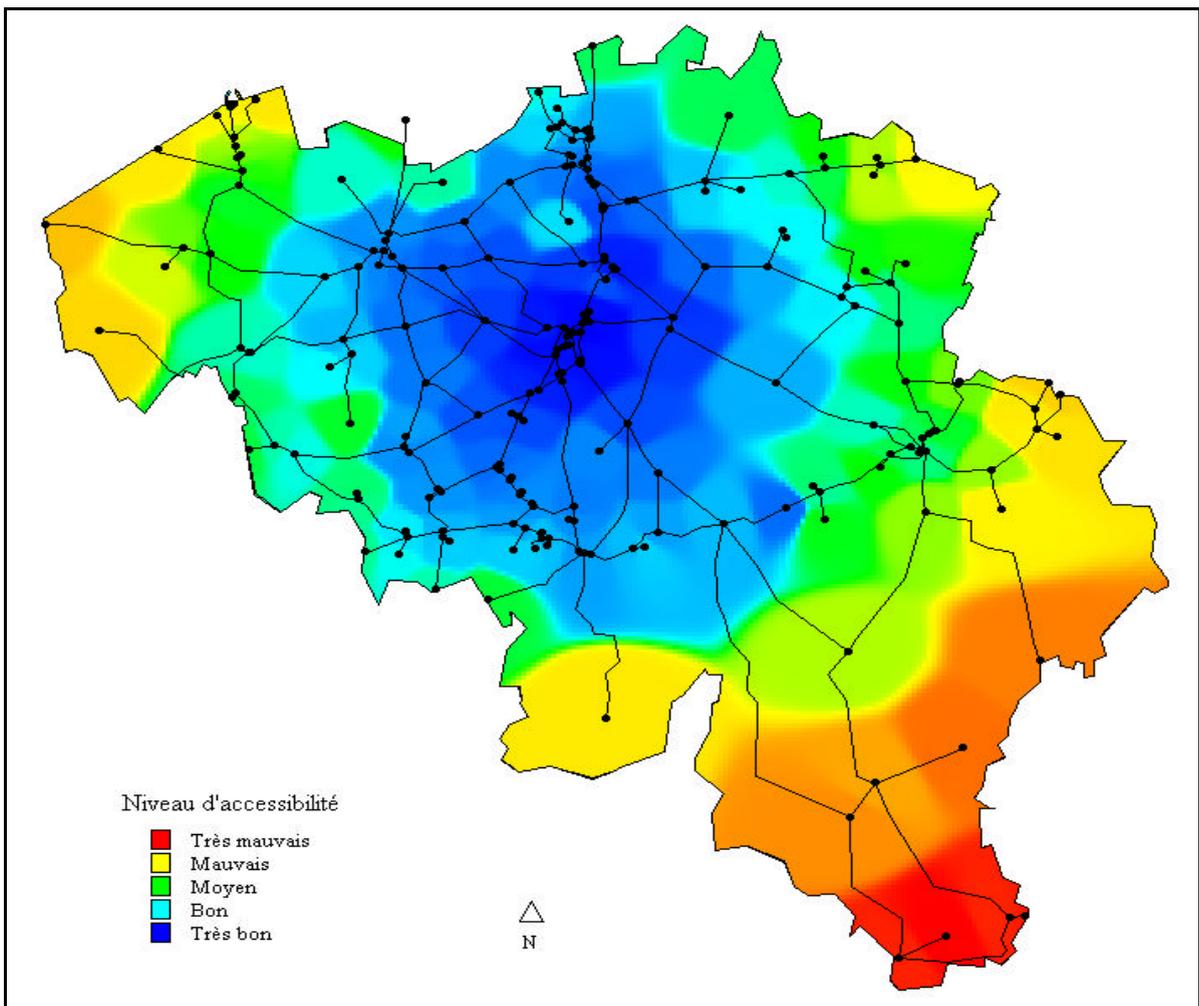
### 3.2. Réseau ferroviaire

La même procédure d'analyse a été effectuée sur le réseau ferroviaire belge. La digitalisation basée sur le réseau NODUS (FUCaM) contient, après simplification, 491 nœuds et 552 arcs. Les indices d'accessibilité obtenus sur base du « réseau - graphe » retenu montrent que c'est la zone située directement au nord de Bruxelles, comprise entre Bruxelles, Aalst, Dendermonde, Mechelen et Leuven, qui contient les nœuds les plus accessibles, comme l'illustre la figure 9.

Il est intéressant de remarquer que, par rapport à celle du réseau de voies navigables (figure 8), l'accessibilité se nivelle en courbes centrifuges, le centre étant occupé par un point situé au nord-ouest de Bruxelles. La zone la plus accessible du réseau ferroviaire est assez proche de celle du

réseau de voies navigables, cependant, elle se situe plus près du centre de gravité<sup>7</sup> du territoire belge.

L'introduction dans les procédures de calcul d'indices de différents poids des nœuds ou de capacité des voies de chemin de fer modifie légèrement la hiérarchie établie en matière d'accessibilité. Ainsi, l'accroissement du poids des nœuds, qui peut traduire une volonté de mieux prendre en compte l'importance des activités économiques, tend à diminuer relativement l'accessibilité des nœuds situés en Hainaut et à renforcer celle des nœuds localisés en Campine (Annexes, chapitre 5). C'est d'ailleurs dans cette direction que tend la politique de la SNCB en terme de fréquence de train de voyageurs puisqu'elle favorise ces derniers au détriment de liaisons situées au sud du sillon Sambre-et-Meuse, nettement plus coûteuses (et moins rentables).



*Figure 9. Carte d'iso-accessibilité, réseau ferroviaire.*

Le coefficient de corrélation de Spearman, simple coefficient de corrélation classique appliqué aux rangs au sein des différentes hiérarchies, établies selon les valeurs des indices calculés d'après la formule [1] mais dont on a fait varier les paramètres ; ces coefficients varient entre 0.94 et 1.00 selon les paires de classements comparés deux à deux (Annexes, chapitre 5). Ces variations effectuées au sein de la formulation de base n'ont donc qu'une influence très limitée, voire nulle (C

<sup>7</sup> Centre de gravité localisé sans tenir aucunement compte de poids ou de population, qui se situe en Brabant wallon. On peut donc parler d'un centre de gravité physique.

= 1.00). Cependant, cette influence est, du moins dans certains cas, plus importante qu'en ce qui concerne le réseau de voies navigables.

Le réseau ferroviaire est indéniablement mieux réparti dans l'espace belge que ne l'est celui de voies navigables. Moins directement contraint par le relief, il est aussi bien développé le long de l'axe sambro-mosan. Quels que soit les paramètres introduits dans la formule de l'indice d'accessibilité, les nœuds les plus accessibles restent inévitablement les nœuds situés dans l'agglomération bruxelloise ou dans sa périphérie nord. De même, les nœuds les moins accessibles sont, dans toutes les hiérarchies effectuées, les villes de l'extrémité sud du pays (Arlon, Virton).

D'autres indicateurs ont été calculés pour le réseau ferroviaire, telle que la distance maximale (Annexes, chapitre 5). Ces indicateurs, de construction (trop) simple, tendent à mener aux mêmes constatations qu'avec les indicateurs d'accessibilité basés sur la formule [1]. La seule différence réside dans le fait que la zone d'accessibilité maximale se déplace légèrement vers le sud, pour atteindre la frange sud de l'agglomération bruxelloise. Cela est probablement dû au fait que ces indices ne contiennent dans leur construction aucun élément quant au(x) poids des nœuds. De ce fait, la zone d'accessibilité maximale se déplace « naturellement » vers le centre de gravité physique du pays, situé en Brabant wallon.

### 3.3. Réseau routier

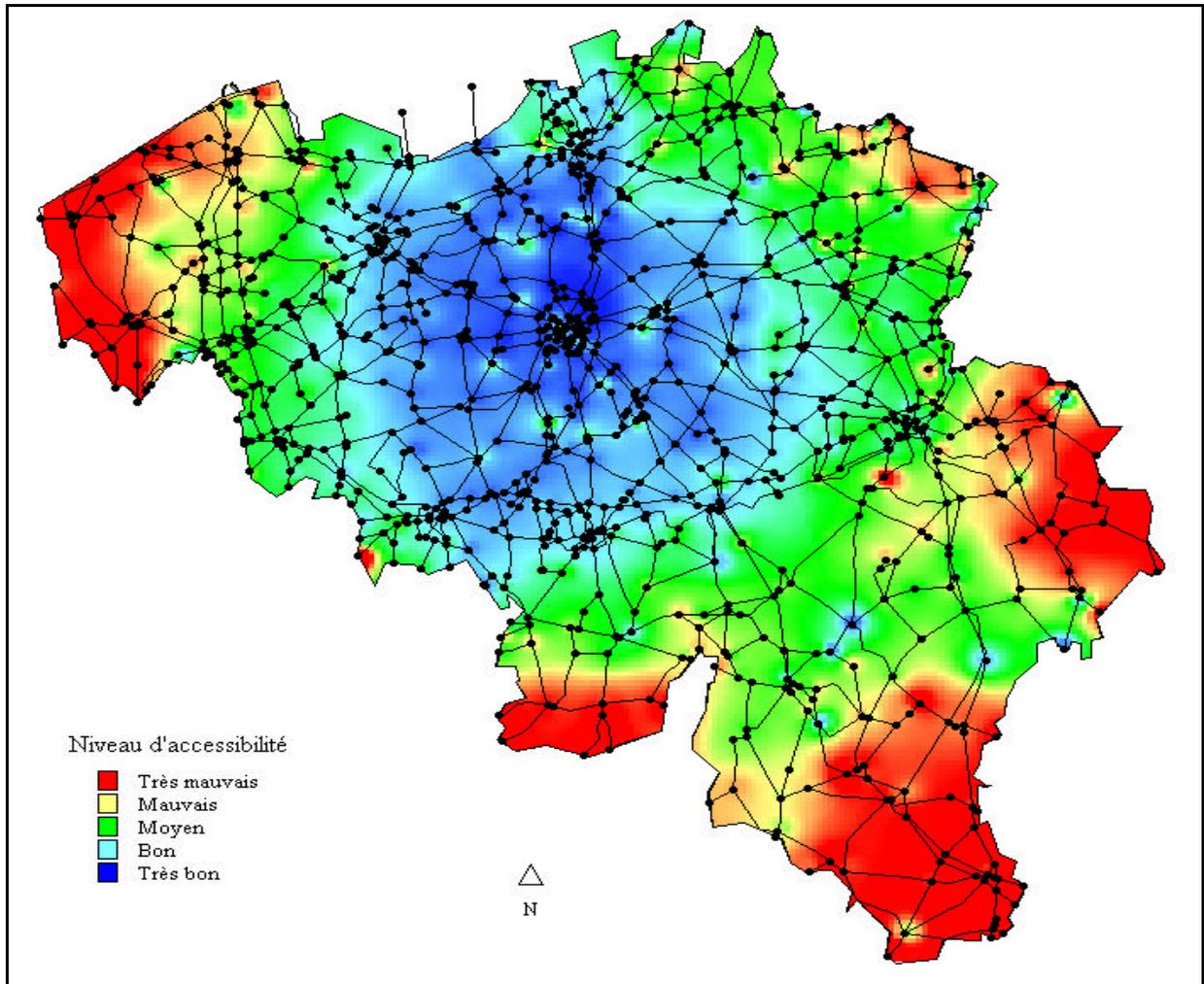
Comme pour le réseau ferroviaire, le réseau routier utilisé dans cette recherche est issu d'une simplification systématique de la digitalisation effectuée par le FUCaM. Il comporte 1609 arcs et 1068 nœuds, et il reflète assez bien la complexité du réseau routier dans sa réalité.

Le réseau routier belge est très dense et comprend un réseau autoroutier important et fortement fréquenté. La densité des infrastructures, bien que plus importante au nord du sillon Sambre-et-Meuse, est relativement homogène, surtout lorsqu'on la compare à celle des réseaux de voies navigables et de voies de chemin de fer. Les indices d'accessibilité obtenus sur base du « réseau - graphe » retenu montrent que ce sont les nœuds de la partie nord de l'agglomération bruxelloise (Grimbergen, Vilvoorde, Schaerbeek), du sud de l'agglomération anversoise (Kontich, Boom), et de la région comprise entre les deux agglomérations précitées (Mechelen, Zemst) qui sont les plus accessibles. A l'opposé de la hiérarchie, on retrouve les nœuds de l'extrême sud du pays (Virton, Messancy, Arlon), les moins accessibles du réseau routier. Ils sont précédés de nœuds de Flandre Occidentale (Vleteren, Poperinge).

Plus généralement, les niveaux d'accessibilité semblent suivre des cercles concentriques (figure 10), dont le centre est occupé par Bruxelles, cette fois-ci. Les analyses, tant quantitatives que qualitatives, menées dans cette recherche pour tenter de décortiquer la hiérarchie établie en terme de niveau d'accessibilité (Annexes, chapitre 5) renforcent cette idée de cercles concentriques. Cependant, dans certaines zones du pays, les différentes courbes d'iso-accessibilité sont beaucoup plus proches qu'ailleurs.

C'est le cas notamment en province d'Antwerpen, où d'importantes différences d'accessibilité existent entre les nœuds situés au sud-ouest de la province (Boom, Mechelen, Puurs) et ceux situés dans l'extrémité nord-ouest de cette même province (Hoogstraten, Turnhout). Cela s'explique de deux manières : d'une part le réseau est relativement peu développé en Campine, et cela principalement pour des raisons historiques, et d'autre part, la Campine est relativement moins densément peuplée que le reste de la province. Ces deux facteurs agissent doublement sur le calcul des indices d'accessibilité : le niveau d'accessibilité tend à être plus faible, le numérateur de la formulation tend à être plus élevé qu'ailleurs puisque les distances à atteindre sont plus élevées

(zone elle-même peu dense) et les populations à «atteindre » à partir des nœuds en question est plus importante (zone elle-même moins densément peuplée).



*Figure 10. Carte d'iso-accessibilité, réseau routier.*

L'introduction dans les procédures de calcul d'indices de variation de poids des nœuds, de vitesse moyenne de roulage, et de facteurs tentant d'approcher le processus complexe et difficilement modélisable de congestion automobile modifie légèrement la hiérarchie établie en matière d'accessibilité (Annexes, chapitre 5). Les coefficients de corrélation de Spearman varient dans ce cas-ci entre 0.88 et 1.00, ce qui est quand même plus varié que pour les deux autres types de réseaux.

Ainsi, en renforçant le poids des nœuds, tous les nœuds de l'agglomération bruxelloise (et plus particulièrement Schaerbeek, Molenbeek-Saint-Jean, Bruxelles-ville et Saint-Gilles) voient leur position s'élever dans la hiérarchie des nœuds. Il en va de même pour toute une série de nœuds compris entre Bruxelles et Gent (Aalst, Wetteren, Asse). Par contre, les nœuds de la région de Leuven et de Waremme perdent des places dans la même hiérarchie.

De même, en augmentant l'écart relatif de vitesse moyenne des différents types de routes (depuis l'autoroute jusqu'à la route provinciale), la hiérarchie en ressort modifiée. Dans ce cas, ce sont surtout les nœuds situés en périphérie des agglomérations et à proximité des autoroutes, qui voient leur position s'élever : Zaventem, Meise pour l'agglomération bruxelloise, Ans et Herstal pour

l'agglomération liégeoise, Mortsel et Zandhoven pour la région anversoise, Leuven, Waremmes, Gosselies. Par contre, de nombreux nœuds situés à l'écart des axes autoroutiers (Oudenaarde, Geraardsbergen, Sint-Truiden, Soignies, Philippeville, La Roche-en-Ardenne ou encore Tielt) voient leur accessibilité relative diminuer, de même que des nœuds situés au cœur des agglomérations urbaines (Antwerpen, Bruxelles-ville, Saint-Josse-Ten-Node, Liège). Ces changements dans la hiérarchie s'accroissent dès lors que la congestion est prise en compte : Bruxelles-ville passe ainsi de la 12<sup>ème</sup> à la 24<sup>ème</sup> position en terme d'accessibilité dans un réseau routier comprenant près de 250 nœuds repris dans les différents classements.

Enfin, les effets de l'achèvement de l'autoroute A8, reliant Bruxelles à Lille via Tournai, sont évalués en terme d'accessibilité routière. De légères modifications dans la hiérarchie sont observées grâce au calcul des différents indices. Ainsi, les nœuds situés à proximité du tronçon achevé au début de l'année 2000 (Ath, Lessines, Leuze en Hainaut et surtout Frasnes-lez-Anvaing) voient leur position s'élever de 1 à 5 places dans la hiérarchie, et cela est d'autant plus marqué que l'écart relatif de vitesse moyenne des différents types de routes est accentué, ce qui semble assez logique.

### 3.4. Intégration des réseaux

Pour atteindre notre objectif de faire une évaluation globale des réseaux de transport en Belgique, il est apparu judicieux de construire un réseau 'fictif' contenant les trois réseaux évalués précédemment. Ce réseau 'intégré' a l'intérêt de se rapprocher du système de transport belge dans son ensemble.

Des indices d'accessibilité sont calculés pour l'ensemble des nœuds que contient ce réseau intégré. La littérature scientifique étant assez discrète quant à des mesures d'accessibilité incluant plusieurs types de réseaux, nous sommes conscients que les indices proposés ici sont tout à fait exploratoires, et qu'ils loin d'être sans faille. Ils sont calculés sur base des indices d'accessibilité caractérisant chacun des nœuds au sein des trois types de réseau. Des facteurs de pondération sont introduits pour quantifier l'importance relative de chacun des trois types de réseau. Signalons que les indices initiaux ont subi une transformation mathématique afin de les rendre opérationnellement comparables. 16 indicateurs d'accessibilité sont calculés pour chacun des 1433 nœuds de ce réseau 'intégré'. Les facteurs de pondération sont les suivants (en pourcentage de l'importance accordée à chacun des types de réseaux initiaux) :

L'examen des 16 cartes illustrant ces divers indicateurs ne révèle que très peu de différences (Annexes, figures 23 à 38 ; le système de transport belge est fortement structuré et cela s'en ressent au moyen de l'approche quantitative que nous avons adoptée. La non prise en compte de points extérieurs à la Belgique renforce la très nette structuration en cercles concentriques de l'accessibilité qui caractérise les réseaux belges. Une utilisation plus importante des transports non-routiers (chemins de fer, voies navigables) avantagerait très nettement la Flandre, comme le montrent les indicateurs 12 et 13.

*Tableau 1. Facteurs de pondération des trois types de réseaux pour les 16 indicateurs calculés pour le réseau intégré (la neuvième configuration est la plus proche de la situation actuelle en Belgique en terme de répartition de l'importance accordée à chacun des trois types).*

<b>Indicateurs d'accessibilité</b>	<b>Réseau routier</b>	<b>Réseau ferroviaire</b>	<b>Voies navigables</b>
1	33	33	33
2	40	30	30
3	50	25	25
4	60	20	20
5	80	10	10
6	90	5	5
7	85	10	5
8	75	20	5
<b>9</b>	<b>88</b>	<b>10</b>	<b>2</b>
10	80	15	5
11	72	20	8
12	64	25	11
13	56	30	14
14	0	0	100
15	0	100	0
16	100	0	0

### 3.5. Relations entre indicateurs d'accessibilité

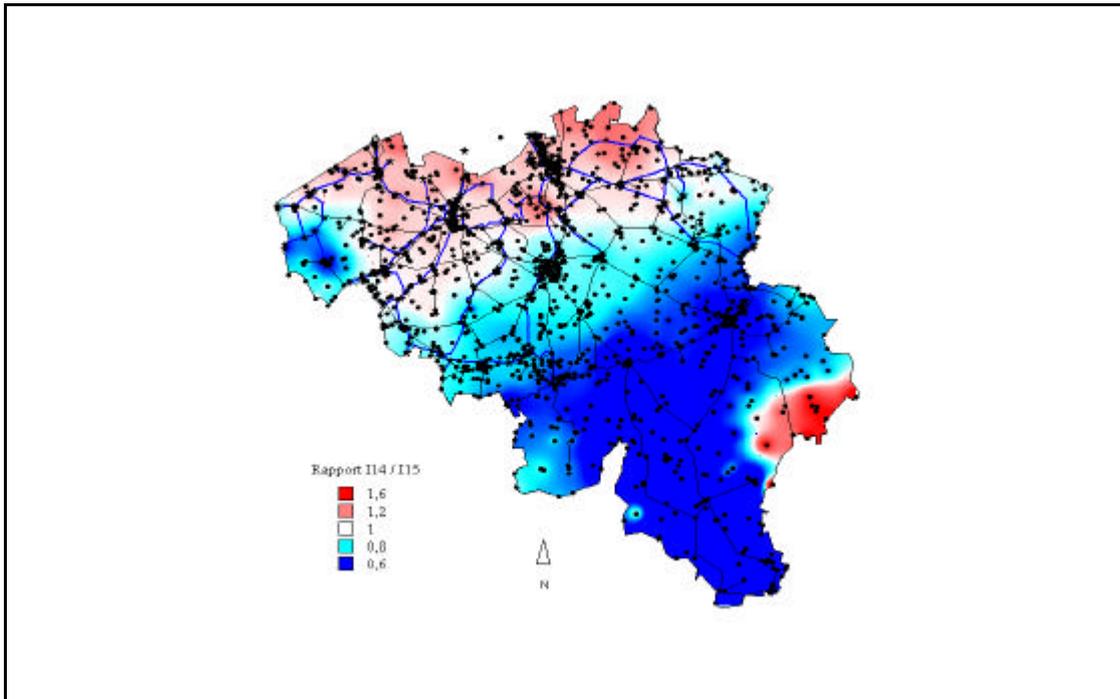
La cartographie des 16 indicateurs d'accessibilité ne laisse entrevoir que très peu de différences en terme de niveau d'accessibilité pour les 1433 nœuds du réseau intégré. Afin de mieux percevoir ces différences, et de déceler la localisation des nœuds plus ou moins avantagés par tel ou tel indicateur, nous pensons qu'il est utile de comparer la valeur de différents indicateurs pour chaque nœud. La comparaison se fait notamment avec l'indicateur 9, qui se rapproche le mieux de la situation actuelle en Belgique en terme d'importance relative des trois types de transport.

#### Réseaux ferroviaire et de voies navigables

Le calcul du simple rapport entre les indicateurs 14 et 15, soit les indicateurs dont les facteurs de pondération sont de respectivement 100% pour le réseau de voies navigables et 100 % pour le réseau ferroviaire, permet de localiser les points de l'espace belge dont les accessibilités relatives sont les plus différentes. La figure 11 montre que c'est dans la moitié nord de la Flandre que les nœuds sont les plus accessibles au sein du réseau de voies navigables, comparativement à leur niveau d'accessibilité au sein du réseau ferroviaire. Se détache également la région de Sankt-Vith, pour laquelle cette « sur-accessibilité » au réseau de voies navigables n'est qu'un leurre lié au calcul des indices : ces nœuds ont des valeurs extrêmement faibles pour les deux indicateurs, mais les valeurs de l'indice 15 sont encore plus faibles que celles de l'indice 14. Globalement, c'est la Wallonie qui est caractérisée par une « sur-accessibilité » relative au réseau ferroviaire.

La distribution spatiale de ce rapport est fortement liée à celle de l'indice 14 (voies navigables), ce qui semble logique puisque l'indice 15 (r. ferroviaire) est plus homogènement répartie au sein du Royaume.

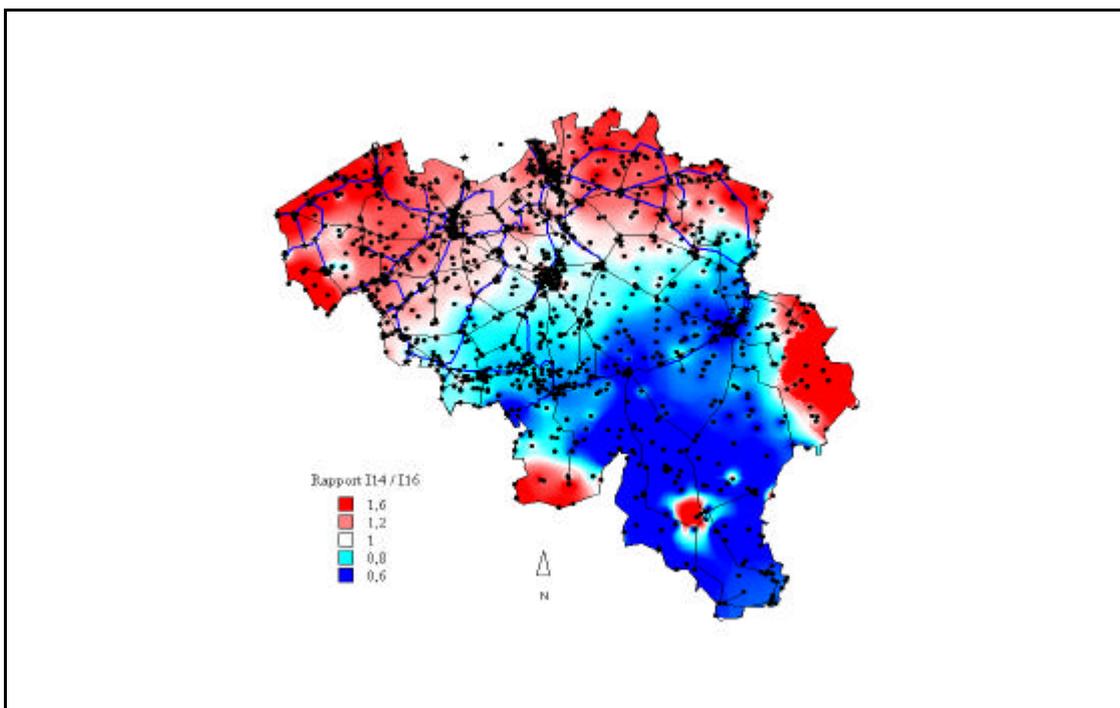
*Figure 11. Rapport entre les indicateurs 14 et 15.*



#### Réseaux routier et de voies navigables

Le calcul et la cartographie du rapport entre les indicateurs 14 et 16, soit les indicateurs dont les facteurs de pondération sont de respectivement 100% pour le réseau de voies navigables et 100 % pour le réseau routier, laisse entrevoir le même schéma spatial que le rapport précédent (figure 12). Ici aussi, la distribution spatiale est fortement liée à celle de l'indice 14 (voies navigables). La Flandre, nettement plus accessible en terme de voies navigables, se détache nettement.

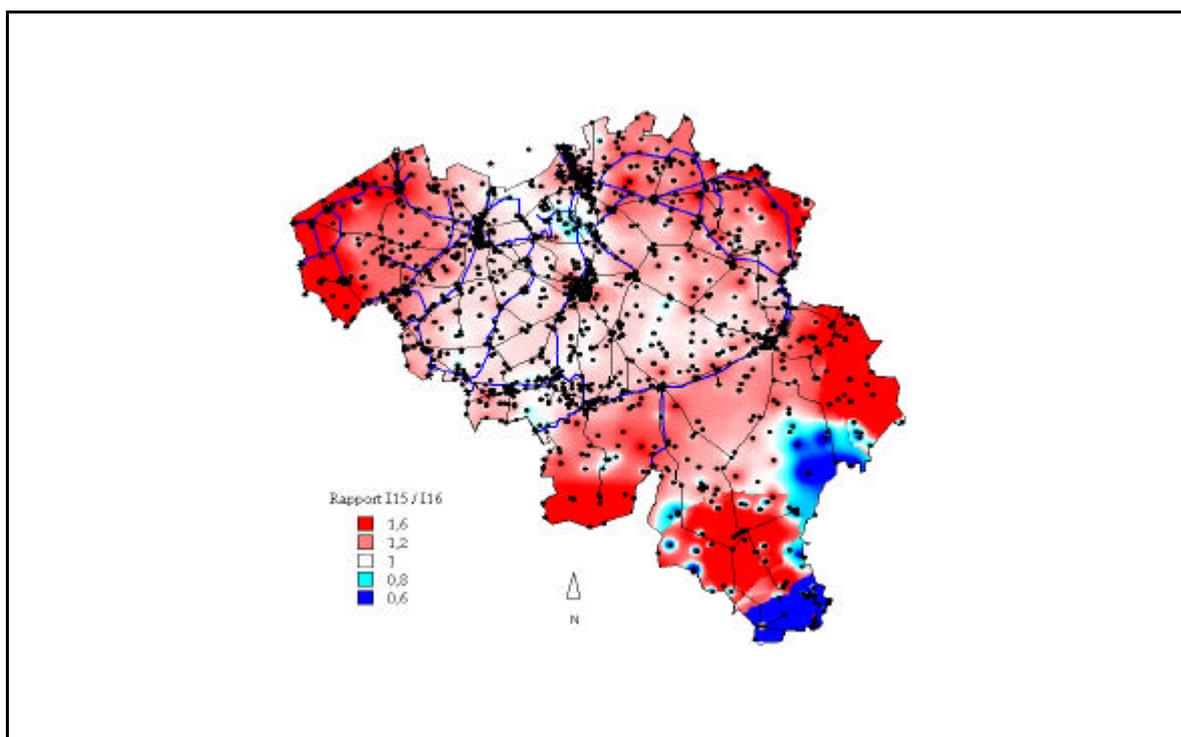
*Figure 12. Rapport entre les indices 14 et 16.*



## Réseaux ferroviaire et routier

Le calcul et la cartographie du rapport entre les indicateurs 15 et 16, soit les indicateurs dont les facteurs de pondération sont de respectivement 100% pour le réseau ferroviaire et 100 % pour le réseau routier, fait apparaître une répartition spatiale différente de celles qui caractérisent les deux rapports précédents (figure 13). Le centre du pays se distingue par des valeurs proches de 1, soit par des accessibilités relatives assez proches pour les deux types de réseau. Par contre, la plupart des régions périphériques – Flandre occidentale, région verviétoise - , à quelques exceptions près, ont des valeurs supérieures à l'unité. Ces régions, bien qu'excentrées, bénéficient d'une bonne desserte ferroviaire, et, partant, de valeurs relativement plus élevées pour l'indice 15 que pour l'indice 16. Il en est de même pour les centres des plus grandes agglomérations (Bruxelles, Antwerpen), particulièrement accessibles en terme de réseau ferroviaire. Par contre, divers noyaux du sud et de l'est de la province du Luxembourg, ainsi que de la région de Puurs-Boom, ont des valeurs d'accessibilité nettement plus élevées pour le réseau routier que pour le réseau ferroviaire. Cela s'explique par le relatif isolement de ces régions par rapport au réseau ferroviaire (Luxembourg) ou par la « sur-accessibilité » relative du réseau routier (Puurs et Boom, noyaux qui font partie du peloton en terme d'accessibilité routière).

*Figure 13. Rapport entre les indices 15 et 16*

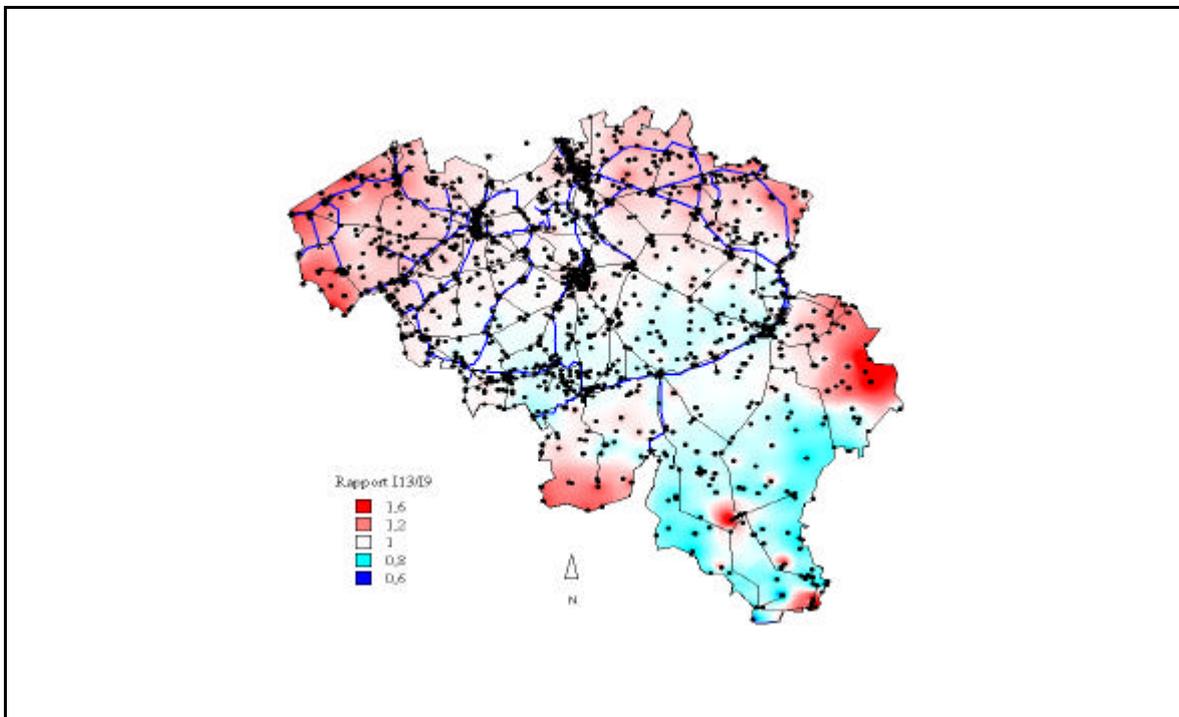


## Situation actuelle et perspectives

Enfin, le calcul et la cartographie du rapport entre les indices 13 et 9 permet d'envisager l'effet, en terme d'accessibilité relative, d'un accroissement de la part relative du transport ferroviaire et par voies navigables (figure 14). Globalement, c'est la Flandre qui bénéficierait d'une tendance à la croissance de la part des ces deux modes de transport, alors que l'axe Sambro-mosan et l'Ardenne seraient désavantagés. Quelques spécificités plus locales caractérisent la distribution spatiale de ce rapport au sein de l'espace belge, dont notamment la bonne position du Westhoek et de la

Campine, bien desservis par le réseau de voies navigables. Remarquons que de nouveau, la bonne position des Cantons de l'est ou du Thiérache est à attribuer à la construction des indicateurs et la faiblesse des valeurs d'accessibilité dans ces lieux, plus qu'à une réelle meilleure accessibilité.

*Figure 14. Rapport entre les indices 13 et 9*



En guise de conclusion, il est à constater que, même si elles sont minimales, il existe de réelles différences en terme de valeurs d'accessibilité lorsqu'on compare plusieurs indicateurs. Bien que fortement concentrique, la structure des niveaux d'accessibilité se déplace plus ou moins franchement vers le nord du pays à mesure que l'on accroît la part relative des chemins de fer, et, à fortiori, des voies navigables, ce dernier mode de transport étant particulièrement centré sur la Flandre. Cet accroissement relatif pourrait suivre la réalité, si diverses politiques sont menées afin d'augmenter la part relative des modes de transport autres que routier, ce dernier concentrant aujourd'hui l'essentiel des transports de marchandises en Belgique.

#### 4. Discussion

L'utilisation de différents indicateurs d'accessibilité, dont un aperçu des résultats quantitatifs est relaté à la section 3 de ce rapport, nous a amené à nous interroger sur la pertinence scientifique de tels indicateurs. En effet, il nous semble important de pouvoir répondre aux questions que sont : avons-nous utilisé une méthode appropriée aux objectifs que nous nous étions assignés ? La démarche adoptée au cours de cette recherche est-elle cohérente ? Le choix des différents indicateurs utilisés et/ou construits était-il pertinent ? D'une manière générale, les résultats, guère étonnants, auxquels nous sommes parvenus et que nous avons abordés dans le chapitre 3 sont-ils réellement le reflet de ce qui se passe sur le terrain ? Sont-ils applicables et/ou palpables dans une réalité toujours plus complexe ? C'est à cet ensemble composite d'interrogations que nous tentons de répondre dans cette section.

Tout d'abord, il est essentiel de revenir sur l'objectif initial de cette recherche : faire une évaluation spatiale des réseaux physiques de transport de marchandises en Belgique. Nous commençons cette discussion par décortiquer cet objectif.

Une *évaluation spatiale*... Dès le début de cette recherche, nous avons nettement orienté notre démarche pour privilégier l'aspect spatial. Ainsi, ce n'est pas tant les facteurs économiques, qui, il est vrai dominant largement les différentes études menées sur le thème des réseaux de transport, mais plutôt les différences existant au sein d'un territoire donné, à savoir l'espace belge, sur lesquelles nous avons souhaité mettre l'accent. C'est pourquoi le concept d'accessibilité semblait particulièrement approprié : l'accessibilité est à l'analyse spatiale ce que l'équité est à l'analyse économique (West, 1996).

Ce concept d'accessibilité semble, du moins au premier abord, facile à comprendre et, logiquement, devrait l'être aussi lorsqu'il s'agit de le quantifier. Hélas, c'est loin d'être le cas... Les indices d'accessibilité calculés en se calquant sur la formulation [1] ne reflètent qu'une des nombreuses facettes de ce concept d'une complexité peu perceptible au début de notre recherche.

Il est évident que calculer des niveaux d'accessibilité en se limitant strictement aux frontières du Royaume introduit un biais évident. Ainsi, calculer l'accessibilité d'un port tel que celui d'Antwerpen sans prendre en compte aucun nœud extérieur à la Belgique réduit inévitablement le niveau de l'accessibilité calculée. Cela correspond-il même à une réalité quelle qu'elle soit ? Et pourtant, cette limitation trouve son origine dans la démarche adoptée. En effet, se limiter au territoire belge introduit un biais, mais nous en sommes conscients. Dans le cas contraire, quels nœuds aurions-nous dû également prendre en compte dans notre recherche ? Les nœuds et les arcs se situant dans un périmètre fixe de 20, de 50 ou de 100 kilomètres ? Tous les nœuds appartenant aux pays voisins (en ce compris l'Angleterre ?) ? Les nœuds relativement importants en terme d'activité économique ? Quel(s) seuil(s) aurions-nous dû fixer ? A une époque où le terme « mondialisation » est utilisé à tort et à travers, ces choix auraient-ils été judicieux ? D'accord, le biais introduit par la limitation spatiale de notre aire d'étude n'est pas négligeable, mais les biais amenés par d'autres choix, plus ou moins arbitraires, n'auraient-ils pas été au moins aussi importants ?

Une autre interrogation est soulevée par l'utilisation même de l'indice d'accessibilité formulé en [1]. Il s'agit d'un indicateur statique, nodal et dépendant essentiellement de deux paramètres, par ailleurs tout à fait discutables dans leur choix comme dans leur validité. Il est évident qu'un des objectifs sous-jacents de ce projet intitulé « effets économiques et spatiaux d'un transport de marchandises en augmentation », s'inscrivant dans une politique de développement durable, est de faire une évaluation dans le temps. Le terme même de durabilité implique une dimension temporelle importante. Cela n'a pas été pris en compte dans notre étude, et pourtant, cela aurait été très utile.

Ainsi, l'introduction dans nos calculs de paramètres tels que la congestion automobile (section 2) est certes nécessaire à nos yeux, mais il aurait été plus efficace, dans une perspective de durabilité, d'envisager l'évolution du phénomène de congestion automobile. Celui tend à s'accroître, mais le fait-il à vitesse constante et partout de la même manière ? Il est probable que non. Et pourtant, la prise en compte de ce phénomène, même sans dimension temporelle, nous a fait sentir qu'il influençait le niveau d'accessibilité, notamment en bouleversant la hiérarchie bien établie entre centres urbains, zones périurbaines et zones rurales. On le constate d'ailleurs dans la réalité, où de nombreuses délocalisations tendent à accroître le rôle d'employeur que constituent les pôles périurbains.

Un autre biais introduit dans cette recherche, et dont nous sommes également conscients, est celui créé par l'approximation de l'activité économique par la population des différents nœuds. Cela

constitue un choix dans la démarche adoptée, et cela, principalement, pour des raisons de facilités pratiques. Choissant de mesurer l'accessibilité d'un nombre discret et fini de points au sein de l'espace belge, points retenus notamment selon des critères dits administratifs, il nous semblait logique de rester dans la même approche. Par ailleurs, l'équipe de l'UFSIA réalisant l'autre partie de la tâche C de ce projet s'est quant à elle principalement attachée à l'accessibilité des zones d'activités économiques, leur approche étant beaucoup moins spatiale qu'économique.

Le choix même de simplifier le réseau réel en un réseau 'topologique' est discutable. Lors du processus de simplification évoqué à la section 2, nous avons éliminé un ensemble de nœuds et d'arcs des différents réseaux étudiés. Inévitablement, cela a induit une perte d'information et un biais sur le résultat des niveaux d'accessibilité. De même, l'utilisation d'une représentation simplifiée de la réalité ('NODUS') comme digitalisation de base est critiquable.

Le fait de ne mesurer que l'accessibilité des nœuds est aussi un frein à une bonne évaluation spatiale. Pour être plus complets, nous aurions peut-être dû estimer l'accessibilité de l'espace continu, ou même des différents arcs qui constituent les différents réseaux. La cartographie en coloration continue permet de remédier – grossièrement – à ce biais en permettant d'approcher une vision continue de l'espace.

Enfin, nous nous devons d'insister sur le fait que les indicateurs utilisés dans notre recherche n'ont pas été conçus spécifiquement pour le sous-secteur des transports que constitue le transport de marchandises. La littérature scientifique étant assez pauvre en la matière, nous avons jugé comme pertinents des indicateurs construits à d'autres fins, mais dont l'objectif final était toujours d'estimer l'accessibilité nodale d'un ensemble de points.

L'approche développée dans notre recherche est donc essentiellement de type topologique ; l'utilisation de différents indicateurs a permis d'appréhender la structure des réseaux de transports belges, sièges de flux divers et notamment de congestion automobile. Les résultats obtenus sont à mettre en relation avec les conclusions auxquelles est arrivée l'équipe de l'UFSIA, dont l'angle d'approche était plus orienté vers l'économie.

En outre, il est évident que nos conclusions sont à envisager en terme d'aménagement du territoire : toute nouvelle infrastructure de transport aura nécessairement un impact quelconque sur l'accessibilité des points de l'espace belge, même s'il est limité. Ainsi, les indicateurs proposés dans le présent rapport peuvent constituer un outil pour maîtriser l'adjonction de lieux ou de choix modaux sur le développement régional. Enfin, la mobilité durable peut être prônée, et même mesurable en terme d'interaction spatiale au sein de l'espace belge.

## Références

- BAMFORD C., ROBINSON H., 1978. *Geography of Transport*. Macdonald and Evans.
- BRUINSMA F., RIETVELD P., 1993. Urban Agglomerations in European Infrastructure Networks. *Urban Studies*, 30, 6, pp. 919-934.
- BRUS D., 1997. De bereikbaarheidsmethode voor een betere beoordeling van transportinfrastructuur in Nederland en Duitsland. *Tijdschrift vervoerswetenschap*, 3, pp. 213-240.
- CHAPELON L., 1998. Evaluation des projets autoroutiers : vers une plus grande complémentarité des indicateurs d'accessibilité. Approche par analyse des détours imposés et des itinéraires empruntés. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n° 33, pp. 11-40.
- CHESNAIS M., 1991. *Réseaux en évolution*. Paradigme, Caen.
- DUMBLE P., MORRIS J., WIGAN M., 1979. Accessibility Indicators for Transport Planning. *Transportation Research A*, 13A, pp. 91-109.
- DUPUY G., STRANSKY V., 1996. Cities and highway networks in Europe. *Journal of Transport Geography*, 4, 2, pp. 107-121.
- FORKENBROCK D., 1999. External costs of intercity truck freight transportation. *Transportation Research Part A*, 33, pp. 505-526.
- GUTIERREZ J., URBANO P., 1996. Accessibility in the European Union : the impact of the trans-European road network. *Journal of Transport Geography*, 4, 1, pp. 15-25.
- GUTIERREZ J., GOMEZ G., 1999. The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility : the case of Madrid's M-40. *Journal of Transport Geography*, 7, pp. 1-15.
- LINNEKER B., SPENCE N., 1991. An Accessibility Analysis of the Impact of the M25 London Orbital Motorway on Britain. *Regional Studies*, 26, 1, pp. 31-47.
- MURAYAMA Y., 1994. The impact of railways on accessibility in the Japanese urban system. *Journal of Transport Geography*, 2, 2, pp. 87-100.
- RIETVELD P., ZWART B., VAN WEE B., VAN DEN HOORN T., 1999. On the relationship between travel time and travel distance of commuters. *The Annals of Regional Science*, 33, pp. 269-287.
- SONG S., 1996. Some Tests of Alternative Accessibility Measures : A Population Density Approach. *Land Economics*, 72 (4), pp. 474-482.
- SPENCE N., LINNEKER B., 1994. Evolution of the motorway network and changing levels of accessibility in Great Britain. *Journal of Transport Geography*, 2, 4, pp. 247-264.
- THOMAS I., 2000. Measuring the shape of the transportation network, in *Transportation Networks and the Optimal Location of Human Activities : A Numerical Geography Approach*, Thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur, inédite, UCL (forthcoming Edward Elgar Edt.).
- WEST D., 1996. *Introduction to Graph Theory*. Prentice Hall, London, 512 p.