

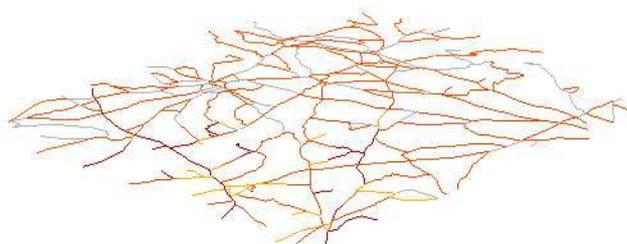


UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE



OPTIDENS : **Optimiser la répartition des densités de population pour des villes plus durables**

Septembre 2016



Responsables scientifiques

Cyrille Genre-Grandpierre

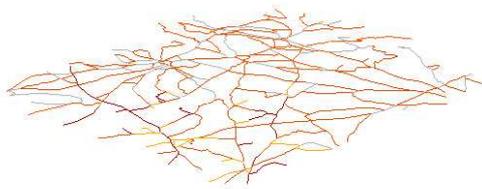
Philippe Michelon

Participants : Alena Melnikava, Sophia Bouchet, Zied Habtoul

PREDIT 4 groupe opérationnel n°6 *Politiques de transport*

Crise, Évolution des modes de vie, Mobilité et Politiques de Transport

[Subvention n°13-MT-GO6-3-CVS-003]



OPTIDENS :
Optimiser la répartition des densités de population pour des villes plus durables

Partenaires scientifiques



CNRS UMR ESPACE 7300

Avignon

Université d'Avignon

74 rue Louis Pasteur – Case n°19

84029 Avignon Cedex 1 – France

Téléphone : 33-(0)4 90 16 26 94

Contact :

cyrille.genre-grandpierre@univ-avignon.fr



Laboratoire d'informatique d'Avignon

Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

339 chemin des Meinajaries, Agroparc BP 1228,

84911 Avignon cedex 9

+33 (0)4 90 84 35 00

Contact : Philippe Michelon

philippe.michelon@univ-avignon.fr

Sommaire

1.	Objectifs du projet « Optidens : Optimiser la répartition des densités de population pour des villes plus durables »	6
1.1.	La ville contemporaine : un potentiel d'interactions sociales construit sur la base de la mobilité automobile	6
1.2.	La vitesse automobile, au cœur du fonctionnement urbain, remise en cause	8
1.3.	Quelles alternatives au potentiel d'interactions sociales basé sur la vitesse automobile ?	9
1.4.	Une forme urbaine en perpétuelle mutation.....	9
1.5.	<i>OPTIDENS</i> : un modèle de simulation pour trouver des formes urbaines permettant de répondre à des exigences, parfois contradictoires, de différentes catégories d'acteurs	12
2.	<i>Optidens</i> : modèle et solution informatique	15
2.1.	La logique du modèle <i>Optidens</i>	15
2.1.1.	Les données d'entrée	15
2.1.2.	Les attentes de l'utilisateur	16
2.1.3.	La fonction d'objectif	18
2.1.4.	La (re)localisation de la population, des emplois et autres aménités.....	19
2.2.	Le modèle <i>Optidens</i>	20
2.3.	Le logiciel <i>Optidens</i>	30
2.3.1.	Les données et paramètres nécessaires pour les simulations	30
2.3.2.	la visualisation des données et résultats.....	35
3.	Illustrations des possibilités d' <i>OPTIDENS</i>	39
3.1.	La zone d'étude.....	39
3.2.	Plus l'accessibilité à la population (PIS) souhaitée est forte, plus la vitesse des déplacements doit être élevée, mais sans proportionnalité	40
3.3.	Constructibilité des terrains et vitesse.....	44
3.4.	La densité locale	47
3.5.	La compacité.....	48
3.6.	L'accessibilité à l'emploi : un critère primordial.....	49
3.7.	Quand il n'est pas possible de tout avoir... ..	51
3.8.	L'utilisation d' <i>Optidens</i> pour construire une ville de la proximité pédestre	51
4.	Le modèle <i>Optidens</i> : perspectives à court et moyen terme.....	53
4.1.	Intégrer les contiguïtés entre types d'occupation du sol.....	53
4.2.	La temporalité de l'optimisation.....	54
4.3.	Quels impacts des optimisations réalisées sur le fonctionnement urbain, en particulier en termes de transport ?.....	55
5.	Valorisation.....	56

5.1. Publication et communications	56
5.2. La valorisation du logiciel	57
6. Conclusion	59
Bibliographie	57
Tables des matières	60
Tables des figures	62

Objectifs du projet « Optidens : Optimiser la répartition des densités de population pour des villes plus durables »

1.1. La ville contemporaine : un potentiel d'interactions sociales construit sur la base de la mobilité automobile

Fondamentalement, la ville peut s'appréhender comme un potentiel d'interactions sociales (PIS), c'est-à-dire comme un potentiel d'individus avec qui il est possible d'entrer en contact, au départ d'un lieu donné, en un temps donné avec un mode de transport donné (Genre-Grandpierre, Perrussel-Morin, 2008). La haute valeur de ce potentiel constitue l'essence même de la ville, ou plus exactement du mode de vie urbain, qui s'oppose à la ruralité où ce potentiel est plus faible.

L'agglomération des individus s'explique avant tout par l'intérêt qu'ils ont à vivre et à produire à proximité les uns des autres, c'est-à-dire par les avantages qu'apporte à chacun la facilité d'interaction avec les autres. Parmi les avantages liés à l'agglomération, on retrouve évidemment la limitation des coûts de transport, mais également, par exemple, la facilité d'appariement entre l'offre et la demande de travail qui est liée à la taille et à la variété du marché de l'emploi. « La ville comme produit involontaire d'interactions multiples et aisées entre des acteurs nombreux » (Pumain, Moriconi-Ebrard, 1997), représente donc avant tout un potentiel de co-présence qui constitue la principale des qualités urbaines, en permettant notamment l'émergence des économies d'agglomération et de l'innovation (Marshall 1890, Huriot, 1998). Ainsi, Prud'homme (2006) a par exemple pu montrer que la productivité des villes dépendait (avec une élasticité de 0.2) de la taille effective du marché de l'emploi (nombre d'emplois accessibles en 30 minutes), qui elle-même dépend de la taille totale du marché de l'emploi (population de la ville avec une élasticité de 1), de l'étalement urbain (avec une élasticité négative de -1.2) et de la vitesse des déplacements (élasticité de 1.6).

Le potentiel d'interactions sociales (PIS) n'est en réalité rien d'autre que la mesure de l'accessibilité à la population. Il dépend donc à la fois de la distribution de la population (sa plus ou moins grande densité), mais aussi des conditions de transport et plus particulièrement de la vitesse des déplacements. À distribution fixe de la population, plus la vitesse est élevée, plus le potentiel d'interactions sociales sera fort.

Jusqu'à l'ère de la mobilité facilitée et peu coûteuse, c'est-à-dire jusqu'à la généralisation de l'usage de l'automobile, la valeur du potentiel d'interactions dépendait essentiellement de la densité de population. Seule l'agglomération spatiale des individus permettait d'assurer un potentiel suffisant pour satisfaire les besoins des individus et de l'économie. C'était le temps de la ville dense et compacte, avec un seul centre maximisant les possibilités d'interactions. Avec la mobilité automobile, les qualités comparatives des lieux ont été fondamentalement

redistribuées au profit des zones moins denses. En effet, grâce à la vitesse automobile, avec un budget temps de transport quotidien fixe et constant de l'ordre d'une heure (cf. la loi de Zahavi, Talvitie, 1980), il est devenu possible d'obtenir un bon potentiel d'interactions sociales, tout en s'éloignant des zones denses. Le « capital spatial » des lieux en termes de possibilités d'interactions a été redistribué. Certaines « périphéries » (les mieux desservies) sont notamment devenues très attractives, puisque la vitesse des déplacements automobiles, due à la présence d'infrastructures routières rapides, leur confère un excellent potentiel d'interactions sans pour autant être denses et, qu'en outre, elles offrent d'autres attraits en termes de prix du foncier pour l'accession à la propriété, de calme, de qualité de vie, d'environnement, de paysage, etc. (Genre-Grandpierre, Perrusel, 2008). Le centre historique n'est alors plus qu'un des endroits où le potentiel d'interactions est fort. Il est en concurrence avec d'autres lieux pour lesquels le potentiel se construit non plus sur la densité et la proximité, mais avant tout sur la vitesse des déplacements, même si celle-ci ne parvient pas toujours à compenser les faibles densités.

Ainsi, la vitesse (automobile) est devenue le principal vecteur de l'accessibilité au détriment des structures spatiales, c'est-à-dire de la distribution des aménités et de la population. L'augmentation des vitesses des déplacements automobile depuis plus de 40 ans a été le fruit d'améliorations constantes du réseau routier : rectification et doublement des voies, augmentation de la connectivité, multiplication des ronds-points et rocares, etc. Globalement, ces travaux ont conduit à une hiérarchisation fonctionnelle croissante des tronçons par la vitesse, qui distingue les voies primaires, secondaires et tertiaires. Cette hiérarchisation, largement inspirée des thèses de Buchanan, s'est non seulement traduite par une augmentation générale de la vitesse des déplacements, mais aussi par une transformation de la logique même des interactions spatiales en favorisant, toutes choses égales par ailleurs, les interactions de longue portée au détriment de celles de courte portée (Genre-Grandpierre, 2007).

En effet, sur un réseau hiérarchisé par la vitesse, plus on va loin plus le réseau est efficace. L'explication de cette métrique rapide ou même « accélérante » tient au fait qu'un automobiliste, pour rejoindre sa destination, va chercher à s'extirper le plus rapidement possible des voies les plus lentes pour rejoindre les infrastructures les plus rapides afin de minimiser son temps total de trajet. Avec l'accroissement de la portée des trajets, la part du trajet effectuée sur les infrastructures rapides augmente en moyenne, ce qui se traduit par l'augmentation de son efficacité (d'une trentaine de km/h pour les trajets de moins de 5 kilomètres à plus de 55 km/h pour les trajets de plus de 40 km de portée, Genre-Grandpierre, 2007).

En raison de cette métrique accélérante des réseaux, l'accessibilité n'est donc pas strictement proportionnelle au temps de trajet. Relativement au rapport entre le nombre d'opportunités qui s'offrent à un individu et le temps de transport qu'il consent, chaque minute de plus passée

avec une automobile sur un réseau routier a ainsi une valeur en termes d'accessibilité supérieure aux minutes précédentes. Tout se passe comme si la métrique des réseaux poussait les individus à rester toujours un peu plus sur le réseau et donc à aller toujours un petit peu plus loin afin d'élargir leur choix sans pour autant payer cette décision par des temps de transport augmentant dans la même proportion.

Aussi, la métrique « accélérante » des réseaux routiers actuels peut donc être considérée comme un « moteur de l'étalement urbain » ou du moins comme une incitation à ne pas chercher à agencer ses lieux de vie selon des critères de proximité physique, et ce, quelle que soit la localisation du domicile puisque cette métrique est valable d'où que l'on parte et où que l'on aille. La limite à ce fonctionnement se trouve dans la valeur maximale que les individus accordent à leur budget temps de transport (entre 60 et 90 minutes en général, même si d'importantes exceptions existent, Joly, 2005).

1.2. La vitesse automobile, au cœur du fonctionnement urbain, remise en cause

Le problème est que ce fonctionnement des territoires urbains pour lequel la vitesse (automobile) est devenue le principal vecteur de l'accessibilité est aujourd'hui largement remis en cause. Se pose en effet tout d'abord un problème d'équité puisque les non-motorisés n'ont pas accès à une grande part des aménités urbaines (emplois, services, commerces) dans des territoires construits par et pour la voiture.

Par ailleurs, d'un point de vue plus spécifiquement transport, la métrique accélérante des réseaux rend difficile la possibilité d'équilibrer les niveaux d'offre des différents modes. En effet, contrairement à l'automobile, pour le vélo et la marche, l'accessibilité n'est au mieux que proportionnelle au temps de transport, car les vitesses sont relativement constantes quel que soit le type de voies empruntées. Quant au bus ou au tramway, la métrique accélérante peut exister, mais elle est le plus souvent peu marquée en raison de l'obligation de faire des arrêts réguliers qui limitent l'accroissement de l'efficacité avec la portée des trajets. La métrique actuelle des réseaux routiers revient donc à assurer la supériorité de l'automobile en termes d'efficacité dès lors que les trajets s'allongent.

Enfin, les baisses de densité (étalement) et la distanciation des lieux de vie permise par la vitesse s'accompagnent du phénomène de dépendance automobile (Dupuy, 1999) et posent d'importants problèmes environnementaux. L'augmentation des distances parcourues en modes mécanisés va en effet de pair avec une croissance des consommations d'énergies fossiles, des émissions de bruit ou encore de polluants (Nicolas *et al.*, 2001).

1.3. Quelles alternatives au potentiel d'interactions sociales basé sur la vitesse automobile ?

Si toutes ces externalités négatives de la ville automobile sont aujourd'hui relativement bien connues, même si le rôle de la hiérarchisation des réseaux est plus rarement pointé (Genre-Grandpierre, 2013), les alternatives aux territoires où l'accessibilité se construit essentiellement sur la vitesse automobile restent mal maîtrisées. Ainsi, la compacité et la densité sont le plus souvent vues comme la seule alternative crédible (notamment depuis les travaux de Newman et Kenworthy, 1989, largement discutés depuis, qui liaient forte densité à faible consommation de carburant et moindre dépendance automobile).

Parer la densité de toutes les vertus face à l'épouvantail que représente une dispersion urbaine généralisée, c'est oublier un peu vite que la densité, sous sa forme la plus simple caricaturée par la construction en hauteur, est assez largement rejetée par les populations qui justement vont chercher plus d'espace en périphérie. C'est oublier aussi que la densité et la compacité ne vont pas elles-mêmes sans poser des problèmes environnementaux, liés aux concentrations d'émissions de polluants ou encore aux îlots de chaleur (Breheny, 1992 ; Burton, 2000).

On le voit « il existe une forte contradiction entre une évaluation locale des effets environnementaux et une évaluation plus globale : éviter les concentrations trop fortes d'émissions de gaz et de nuisances sonores affectant les populations dans le centre conduirait à dédensifier la ville. Mais une telle dédensification qui aurait pour effet d'allonger les déplacements des habitants se traduirait par une augmentation des pollutions régionales et globales » (Dureau, Lévy, 2010).

1.4. Une forme urbaine en perpétuelle mutation

Face à ce « dilemme » se pose donc la question de savoir vers quelle forme urbaine aller ? Si la nécessité d'une certaine densification est aujourd'hui largement admise, qu'elle soit monocentrique ou polycentrique avec des pôles secondaires qui restructureraient une périphérie peu dense, reste la question du « comment densifier », précisément : quelle distribution de la population, du bâti, des emplois, des espaces libres, pour quelles externalités ?

Par ailleurs, en admettant que l'on connaisse la forme théorique urbaine optimale en termes de développement durable, resterait encore la question du comment l'obtenir, sachant qu'il est difficile d'envisager de faire table rase des villes actuelles. L'hystérésis des formes urbaines étant forte, on peut se demander s'il existe une réelle marge de manœuvre pour les aménageurs pour reformater la ville et aller vers un couple forme-fonctionnement plus durable.

Fort heureusement, si les réseaux urbains (tracé des routes notamment) sont marqués par une très forte hystérésis, c'est beaucoup moins le cas pour le bâti. Comme le note Bonnin¹, on peut détruire et reconstruire continuellement les bâtiments, en changer l'usage, la structure des rues reste elle très largement conservée. Cette pérennité provient du fait qu'un bâtiment est essentiellement « local », alors que la rue est « globale », faisant lien entre des lieux distants, faisant intervenir dans sa définition toutes les habitations qui la bordent et tous les occupants qui vivent le long de celle-ci, et même potentiellement tous les habitants de la ville qui sont susceptibles de l'emprunter, de par un besoin permanent de passage, ce qui rend son reformatage beaucoup plus difficile (Haussmann constitue à ce titre une sorte d'exception).



Source : www.morphocity.fr

Figure 1 Réutilisation du réseau viaire après le tsunami de Tohoku (Japon, 2011)

Au contraire du réseau de rues, le cadre bâti apparaît beaucoup moins marqué par l'hystérésis qu'on ne le suppose souvent. En reprenant largement les travaux d'Olivier Piron (2003), on peut distinguer deux processus généraux de mutations urbaines : l'extension (développement urbain le plus souvent au détriment des terres agricoles) et les sédimentations successives, c'est-à-dire les nouvelles utilisations de terrains déjà utilisés une première fois. Ces mutations peuvent être progressives (un pavillon devient du petit collectif, un atelier un immeuble). L'évolution se fait alors parcelle par parcelle, au gré des décisions des investisseurs privés ou publics. Elles peuvent aussi se faire par bonds : tel type d'urbanisation perd brutalement de sa pertinence et est réaffecté, tel secteur d'urbanisme lâche devient un centre secondaire dense. Se produit ici un changement de destination, de composition immobilière et souvent même de trame urbaine. Ces évolutions par sauts se font notamment quand la taille des problèmes immobiliers à résoudre est trop grande et que seules des opérations de grande ampleur (souvent publiques) peuvent alors espérer en venir à bout.

¹ P. Bonnin Morphogénèse du réseau des rues, www.morphocity.fr, consulté en janvier 2013.

Les facteurs d'évolution sont divers. À partir de la trame initiale, qui toujours a ses raisons initiales, les évolutions peuvent être dues :

- à l'obsolescence technique des bâtiments due aux exigences croissantes de la demande sociale (isolation, bruits, agencements des appartements, choix architecturaux datés, déficiences des services collectifs : eau, voirie...). Cette obsolescence peut même être orchestrée par les pouvoirs publics à travers la diffusion de nouvelles normes. La volonté d'aller vers des bâtiments à basse consommation s'inscrit dans cette rubrique. Nombreux sont les immeubles ou logements particuliers qui vont se trouver « dépassés » du fait des nouveaux standards en termes de consommation énergétique.
- certains types d'urbanisation (logements comme activités) devenus inacceptables pour des raisons d'hygiène, de sécurité ou de santé. Haussmann s'est ainsi attaqué à Paris à un vieux tissu sans lumière, ni hygiène. De même, le concept de logement indécent de la loi SRU n'est qu'une déclinaison de la volonté déjà ancienne de résorption de l'habitat insalubre.
- Évolution, en taille comme en structure, de l'agglomération qui fait perdre leur sens initial à certains secteurs. Par exemple, des zones industrielles ou logistiques, à l'origine hors de la ville, peuvent se retrouver imbriquées dans le tissu urbain qui les a rattrapées (c'est par exemple le fait de nombreux sites Seveso situés à présent en pleine zone d'habitat !).
- possibilités de meilleures utilisations du sol qui offrent d'importantes possibilités de plus-values (ex site industriel situé en milieu d'habitat dense, sites militaires ou religieux délaissés).

Il est important de préciser que dans un marché immobilier concurrentiel, les investissements (privés ou publics) réalisés pour améliorer les standards condamnent par ricochets les immeubles dont l'évolution exigée n'est ni techniquement possible, ni économiquement rentable, ce qui accélère leur obsolescence technique. La paupérisation de ces secteurs peut alors s'en trouver accélérée, l'obsolescence technique débouchant sur l'obsolescence, urbaine. Ainsi, les aides et nouvelles normes visant à produire des logements ou immeubles de bureaux moins gourmands énergétiquement parlant vont inmanquablement déclasser les logements et immeubles n'évoluant pas (notamment le périurbain le plus ancien que les privés ne rénoveront pas pour des raisons de coût et une absence de demande ce qui produira un effondrement de valeur), ce qui risque d'accélérer l'ampleur des mutations urbaines.

Dans ce processus du renouvellement urbain, les espaces résidentiels peuvent rester du logement en changeant ou pas de nature, notamment en termes de densité (cf les OPAH), évoluer vers des tissus plus mixtes sur le plan fonctionnel, ou encore devenir des zones d'activités (ex la barre des 400 logements « la muraille de Chine » à Saint Étienne, devenue

une zone d'activités orientée vers le domaine sanitaire et médical). Les espaces d'activités peuvent demeurer orientés vers l'activité, mais en changeant de domaines (ex la Friche de la Belle de Mai à Marseille qui s'est réorientée vers le secteur culturel), aller vers les loisirs (parc d'attractions) ou vers des tissus mixtes. Précisons que ce qui est vrai des terrains bâtis peut l'être des espaces de service comme les parkings, la voirie ou certains espaces non bâtis qui peuvent aussi entrer dans ces processus de perte de valeur qui induisent une nécessaire réflexion sur d'autres affectations.

Ainsi, sous une apparente stabilité, si l'on exclut l'évolution par extension qui est très « voyante », le tissu urbain est le cadre de très nombreuses mutations, réaffectations (un petit quart du tissu muterait ou serait rénové par génération). C'est sans doute dans ce processus perpétuel de mutation urbaine, à la fois progressif, continu et relativement rapide, que se situe la marge de manœuvre de l'aménagement pour faire face aux défis environnementaux et sociétaux.

La question posée est donc de savoir comment planifier des territoires urbains gardant leurs qualités essentielles en termes de potentiel d'interactions sociales (condition nécessaire du développement économique, premier pilier du développement durable), mais qui soient aussi plus économes en énergie, moins agressifs pour l'environnement, notamment parce qu'ils permettent intrinsèquement un usage moindre de l'automobile (deuxième pilier) et plus justes eu égard aux questions d'accessibilité pour toutes les catégories de population (troisième pilier), en particulier les non-motorisés et les plus âgés ?

1.5. OPTIDENS : un modèle de simulation pour trouver des formes urbaines permettant de répondre à des exigences, parfois contradictoires, de différentes catégories d'acteurs

Les travaux portant sur la recherche de formes urbaines optimales en termes de durabilité prennent majoritairement deux directions majeures.

La première, dans une logique déductive, consiste à chercher des formes « optimales » ex nihilo, dans une perspective plus ou moins « utopique ». On peut par exemple tenter de savoir dans quelle mesure des formes fractales théoriques « pures » constituent un optimum à atteindre pour les territoires urbains (Frankhauser, Genre-Grandpierre, 1998 ; Cavailhes *et al.*, 2004). Puis, si on s'accorde sur le fait que les formes fractales constituent bien un optimum à atteindre, alors on peut dans un second temps faire de la fractalité une approche normative pour l'aménagement, c'est-à-dire édicter des règles en termes de développement urbain pour qu'il s'effectue en concordance avec un degré de fractalité fixé en amont. C'est par exemple l'approche du logiciel Mup-City développé au laboratoire Théma (<http://thema.univ-fcomte.fr/production/logiciels>) qui outre un principe fractal de développement résidentiel (les lieux choisis pour le développement urbain le sont de façon à garantir une dimension fractale

décidée en amont) intègre aussi neuf autres règles d'aménagement (accessibilité aux commerces et services, accessibilité aux infrastructures vertes et de loisir, proximité au réseau routier existant, non-fragmentation des espaces bâtis et non-bâtis). Ici les lieux choisis pour le développement urbain le sont donc selon des règles établies en amont.

La seconde, dans une logique inductive, vise à analyser des formes empiriques pour en mesurer les externalités, et in fine pouvoir les hiérarchiser en termes de durabilité (Newman Kenworthy, 1989 ; Breheny, 1992 ; Banister *et al.*, 1997, Camagni, Gibeli, 1997) et édicter des recommandations pour l'aménagement.

La logique du projet *Optidens*, s'écarte de ces deux approches. Elle consiste tout d'abord à prendre pour point de départ les formes urbaines existantes, dont on a pu constater qu'elles étaient dynamiques puisqu'elles s'étendent et mutent tout à la fois, ce qui représente une réelle opportunité pour, de proche en proche, remodeler ces territoires si tant est que l'on sache dans quelle direction tendre.

Il s'agit ensuite de formuler des « contraintes » et de voir s'il est possible, et à quelles conditions, notamment en termes de vitesse des déplacements, de construire des territoires urbains qui permettent de répondre à ces contraintes qui, parce qu'elles émanent d'acteurs différents, peuvent être contradictoires :

- contraintes des aménageurs, qui aspirent par exemple à plus de densité pour limiter la consommation foncière, réduire la longueur des réseaux techniques, créer les conditions adéquates pour le développement des transports publics et une moindre dépendance à l'automobile

versus

- celles des individus qui fuient la densité et ses externalités négatives (pollution, bruit, promiscuité, prix du foncier, manque d'accès à la « nature », etc.) sans pour autant vouloir renoncer à une bonne accessibilité aux aménités urbaines.

Systématiquement, nous cherchons la vitesse minimum des déplacements automobiles (ou le plus fort pourcentage de baisse des vitesses actuelles) qui permettent de vérifier toutes les contraintes. En effet, dans une perspective de lutte contre l'automobile, la baisse des vitesses apparaît comme une condition nécessaire, même si elle n'est pas suffisante (Wiel, 2002 ; Genre-Grandpierre, 2007). C'est cette articulation entre forme urbaine et vitesse des déplacements qui constitue un des aspects innovants et originaux de ce projet.

Concrètement, le projet vise donc à développer un outil informatique de simulation intitulé *Optidens* permettant de simuler des formes urbaines à partir des tissus actuels en relocalisant un ensemble d'aménités (population, emplois, commerces, etc.) de façon à répondre aux exigences définies en amont par l'utilisateur, tout minimisant la vitesse des déplacements automobiles dans une perspective de lutte contre la dépendance automobile (pour une ville

lente, mais accessible). En substance « dis-moi quelle ville tu veux et *Optidens* te dira si cela est possible et à quelle condition en termes de vitesse des déplacements ».

Optidens permet donc de trouver, si elles existent, les formes urbaines qui répondent à des exigences qui peuvent être contradictoires, et non de trouver les formes qui répondent à des critères fixés en amont (comme *Mup-City*). Dans un cas (*Optidens*) on dit ce que l'on veut mais pas comment l'obtenir (c'est le logiciel qui va trouver la solution), alors que dans l'autre (modèle à base de règles) on fixe des règles en amont et elles vont conditionner le développement de la ville. Autre différence, *Optidens* permet de travailler à bâti ou population donnée en relocalisant les activités, alors que les modèles à base de règles sont surtout axés sur le développement (où localiser les nouvelles constructions).

Pour ce rapport nous commencerons par décrire le modèle *Optidens*, sa logique, sa traduction informatique en présentant le logiciel développé et ses fonctionnalités, puis nous présentons, à titre d'illustration, quelques exemples de traitements réalisés.

2. *Optidens* : modèle et solution informatique

2.1. La logique du modèle *Optidens*

Optidens consiste à coupler un système d'information géographique et un modèle MIP (mixed-integer programming) qui est un outil largement utilisé dans les problèmes de localisation-allocation. L'origine remonte au « Quadratic assignment problem » (Koopmans, Beckmann, 1957) qui consiste à savoir comment localiser m activités dans un jeu de n localisations de façon à minimiser le coût d'affectation qui peut être du temps, de la distance ou de l'argent. Parmi les techniques possibles, nous utilisons la linéarisation (Gueye, Michelon, 2005, 2009).

L'utilisation d'*Optidens* requiert : des données décrivant le territoire de travail, de fixer un ensemble d'objectifs (contraintes) que l'on veut voir vérifiés par la forme simulée (en termes d'accessibilité notamment), de choisir la part du tissu urbain actuel qui est relocalisable (*i.e.* l'intensité de la dynamique urbaine) et de choisir une fonction d'objectif (minimiser la vitesse des déplacements automobile). Résoudre le problème signifie trouver les valeurs des variables de décisions (le nombre de personnes, d'emplois et autres aménités à localiser en chaque endroit et la vitesse des déplacements) de façon à satisfaire tous les objectifs assignés à la forme urbaine.

2.1.1. *Les données d'entrée*

Dans *Optidens* la zone d'étude est divisée en cellules carrées (ici 500 * 500 mètres). Les centres de chaque cellule sont appelés les points de mesure. Des requêtes SIG permettent de qualifier le territoire actuel à l'échelle de la cellule en donnant la population, le nombre d'emplois, de commerces, etc. Population, emplois, commerces etc. seront appelés par la suite des « activités ». La collecte des données varie selon le nombre de critères à satisfaire. Par exemple, le nombre de commerces par cellule n'est nécessaire que si l'utilisateur intègre cette contrainte dans sa simulation en stipulant par exemple qu'il est nécessaire de trouver x commerces à moins de 15 minutes de chaque point de mesure.

Pour chaque cellule, on peut aussi préciser si elle est ou pas constructible eu égard aux documents d'urbanisme actuels et préciser quelles sont les vocations souhaitées pour chaque cellule (activité, logement, etc.).

On calcule par ailleurs, à l'aide d'un SIG et d'une base de données décrivant le réseau routier actuel, la matrice des distances temps et kilomètres en voiture entre tous les points de mesures (centres des cellules). Les distances temps sont calculées pour des conditions de circulations fluides en tenant compte des vitesses actuelles et des sens uniques.

Précisons que le choix de la taille de la cellule de base dépend de la qualité des données disponibles et de la précision attendue pour les relocalisations. Ainsi, il va de soi que plus ces cellules sont petites, plus les relocalisations seront précises, mais aussi que plus la solution sera complexe et par conséquent les temps de calcul longs.

Par ailleurs, la zone d'étude dans sa totalité ne correspond pas à la zone de travail à proprement parler. En effet, au centre de la zone d'étude, qui est celle pour laquelle les données décrivant le territoire actuel sont collectées, se trouve la zone dite de relocalisation, qui est la réelle zone de travail, c'est-à-dire la zone dans laquelle les relocalisations vont effectivement pouvoir s'opérer. Cette distinction est nécessaire pour éviter tout « effet de bord ». En effet, imaginons que la zone de travail corresponde au périmètre d'un SCOT et que l'on fixe comme contrainte que chaque point de mesure du SCOT doit atteindre un PIS (population accessible en 15 min) de 15 000 personnes. Pour les points situés en périphérie de la zone de travail, le calcul du PIS doit naturellement intégrer toute la population située à l'intérieur de l'isochrone 15 minutes, que celle-ci soit localisée ou pas dans le périmètre du Scot, afin d'éviter un « effet ile », trop courant en aménagement, où ce qui se passe dans les territoires voisins n'est pas pris en compte. Aussi, le périmètre de collecte des données, la zone d'étude, doit-il être plus étendu que celui de la zone de travail. Les relocalisations se font donc uniquement dans la zone de travail (qui correspond au périmètre institutionnel dans lequel l'aménageur peut exercer sa compétence), mais elles tiennent compte de ce qui est situé hors de cette zone de travail, même si l'aménageur ne peut directement agir dessus.

2.1.2. Les attentes de l'utilisateur

Une fois les données collectées à l'échelle de la cellule, l'utilisateur d'*Optidens* doit fixer les contraintes, qui sont objectifs à atteindre par la forme urbaine simulée.

Les contraintes liées à l'accessibilité.

On fixe :

- le niveau d'accessibilité à la population (potentiel d'interactions sociales : PIS), c'est-à-dire le nombre d'individus qui doivent être accessible en X_p minutes en voiture au départ des points de mesure après relocalisation (X étant fixé par l'utilisateur). Rappelons qu'une haute valeur de PIS est un des conditions d'émergence des économies d'agglomération et d'une vie sociale riche (et ce sans prendre en compte les possibilités offertes par les Technologies de l'Information et de la communication qui peuvent accroître le PIS lié aux interactions « réelles »)
- le niveau d'accessibilité à l'emploi, c'est-à-dire le nombre d'emplois qui doivent être accessibles en X_e minutes en voiture au départ des points de mesure après relocalisation (X_p et X_e pouvant être ou pas identiques)

- de la même manière, on fixe le niveau d'accessibilité aux commerces, aux services publics, etc. selon les contraintes que l'on souhaite prendre en compte. L'ajout d'activités et des contraintes associées ne pose aucun problème méthodologique, mais conduit à allonger les temps de calcul.

La contrainte de densité

On fixe le niveau maximum de densité locale, qui correspond à la densité de population mesurée dans un cercle de 1 000 mètres de rayon autour de chaque point de mesure. Ce rayon a été choisi de façon à avoir une vue de la densité qui soit plus large que celle de l'opération d'urbanisme (l'ilot), mais qui reste pour autant une mesure locale. Il est possible de faire varier ce rayon de mesure, pour avoir une densité plus locale (en diminuant la valeur du rayon) ou à l'inverse plus globale.

Une contrainte de densité peut aussi être posée pour les autres activités. On peut par exemple vouloir que la densité d'emplois dans un rayon de x mètres ne dépasse pas telle ou telle valeur.

La compacité

On fixe le niveau maximum de compacité qui correspond pour chaque cellule à la part de la surface au sol qui peut être construite (emprise au sol du bâti, quelle que soit sa nature). Ce paramètre, complémentaire de la densité, permet d'éviter de « remplir » totalement une cellule par de la surface bâtie. Il intervient pour satisfaire aux exigences d'espacement de la population, mais aussi à des problématiques environnementales (préservation de la biodiversité, problèmes de ruissellement, de ventilation des tissus urbains, etc.).

Il est important de préciser que les niveaux de contraintes peuvent être les mêmes pour tous les points de mesure (on est alors dans une logique d'égalité territoriale « pure ») ou pas. Fixer des niveaux d'accessibilité, de densité ou compacité différents par chaque point de mesure (ce qui se fait en rentrant un fichier donnant les numéros des points et les valeurs des contraintes correspondantes), peut correspondre à la volonté de « privilégier » telle ou telle zone, par exemple dans le cas où on souhaiterait que la forme simulée reprenne une partie de la forme actuelle (en préservant par exemple un centre avec des accessibilités et densités plus élevées).

Par ailleurs, il est aussi possible de façon optionnelle de fixer le nombre minimum et/ou maximum d'individus ou d'emplois ou commerces, etc. qui peuvent être localisés dans une cellule. Le nombre minimum d'emplois permet d'éviter que le processus de relocalisation ne « vide » entièrement certaines cellules, mais aussi de promouvoir, si les minimums sont élevés, certaines localisations (par exemple proches des infrastructures de transport public

actuelles pour en favoriser l'usage). Le maximum permet à l'inverse d'éviter que le modèle ne localise tout dans la même cellule.

En caricaturant, on pourrait dire :

- que les seuils d'accessibilité correspondent à la fois aux exigences des planificateurs et des individus qui peuvent respectivement souhaiter une ville accessible comme condition du développement économique et une ville accessible comme condition du bien-être.
- que les seuils maximums de densité locale et la compacité correspondent aux exigences des individus qui refusent des niveaux de densité trop élevés autour de leur domicile et trop de compacité, en souhaitant par exemple la présence d'espaces verts dans un environnement proche.
- que les seuils minimums de densité permettent de satisfaire les aménageurs, qui souhaitent optimiser l'usage de la ressource foncière en favorisant un urbanisme dense.

2.1.3. La fonction d'objectif

Optidens cherche à localiser les individus, les emplois, commerces, etc. de façon à vérifier toutes les attentes de l'utilisateur tout en minimisant la vitesse des déplacements automobiles. Comme expliqué en introduction, il s'agit en effet d'atteindre une ville accessible, mais pour laquelle l'accessibilité ne se construit pas sur la vitesse ce qui, à terme, conduit à la dépendance automobile et à ses externalités négatives. Plus la vitesse automobile est réduite, plus cela laisse la possibilité pour une véritable concurrence modale.

Envisager conjointement forme urbaine – accessibilité et vitesse conséquente constitue le point fort du modèle *Optidens* par rapport à d'autres types de modélisation (modèles Luti par exemple, Simmonds *et al.*, 1999, Antoni, 2010) où le plus souvent on cherche à simuler les effets de changements des conditions de transport, ou des mobilités sur la forme urbaine à l'image du modèle Mobisim par exemple (<http://thema.univ-fcomte.fr/mobisim/>) qui est « une plateforme de simulation pour l'étude prospective de l'impact des mobilités quotidiennes et résidentielles sur le développement, l'étalement et l'aménagement urbains des agglomérations françaises et européennes .

Par rapport à l'objectif d'*Optidens* qui est de trouver la vitesse minimum permettant à une forme urbaine de vérifier certaines contraintes deux options existent :

- *Optidens* choisit dans un ensemble discret de vitesses la valeur la plus basse qui permet de vérifier les attentes. La vitesse sera alors homogène sur l'ensemble du territoire. Précisons que la vitesse choisie ne signifie pas qu'il est nécessaire en tout lieu de circuler à cette vitesse pour que toutes les exigences soient satisfaites, mais que l'on est certain qu'avec cette vitesse toutes les exigences seront satisfaites pour tous les points

de mesure (c'est donc la vitesse pour le pire des cas). À partir des résultats de la simulation, il est possible de retrouver pour chaque point la vitesse minimum requise.

- *Optidens* cherche le pourcentage de changement (augmentation ou diminution) à appliquer aux vitesses actuelles des tronçons pour vérifier les attentes. Par exemple 90% signifient que l'on peut diminuer les vitesses actuelles de tous les tronçons de 10% et qu'avec les localisations choisies par le modèle toutes les attentes seront vérifiées. À l'inverse, 110% signifient qu'il est nécessaire d'augmenter les vitesses de 10%. Cette option préserve donc la hiérarchie des tronçons en termes de vitesses, contrairement à la première pour laquelle tous les tronçons auront la même vitesse.

Dans une dernière version d'*Optidens* ont été introduites des possibilités nouvelles eu égard à la fonction d'objectif. Ainsi, l'objectif initial d'*Optidens* qui est de trouver la vitesse minimale permettant de vérifier les contraintes a été « inversé ». On fixe alors la vitesse (les vitesses actuelles par exemple) et l'objectif consiste alors à trouver, via les relocalisations, soit le PIS maximum, soit la densité maximale.

2.1.4. La (re)localisation de la population, des emplois et autres aménités

Une fois les données décrivant le territoire actuel et les contraintes précisées, le modèle d'optimisation va (re)localiser les aménités de façon à satisfaire les contraintes.

Trois options existent :

- dans la première, toutes les aménités (population, emplois, etc.) sont considérées comme relocalisables. Cette option revient donc à considérer qu'il est possible de faire « table rase » des structures actuelles
- dans la deuxième, on définit le pourcentage des aménités actuelles que l'on considère relocalisables. Cette option est plus proche de la réalité, puisqu'il est difficile de considérer, à l'échelle de l'élaboration d'un SCOT par exemple, que l'on peut changer de fond en comble la forme urbaine. Plus le pourcentage de relocalisation est important, plus cela revient à considérer que la dynamique urbaine va être forte.

La première option, bien que plus théorique, s'avère néanmoins très intéressante pour s'extraire des formes urbaines actuelles, et explorer librement tous les possibles et ainsi élargir le catalogue habituel des formes urbaines. Pour ces deux premières options, il s'agit bien de relocaliser les aménités. Cela revient donc à considérer que le territoire se reformate, mais qu'il ne croît pas ni ne décroît.

- La troisième option permet au contraire d'intégrer la dynamique du territoire en reformatage, mais aussi en croissance ou décroissance. On fixe alors le nombre d'habitants, d'emplois, commerces, etc. que comptera le territoire à un horizon temporel

donné (ces valeurs peuvent être plus grandes ou plus petites que les valeurs actuelles). Le logiciel peut alors pour satisfaire les contraintes :

- comme pour la première option (re)localiser toutes les aménités (les actuelles + celles qui vont s'ajouter, par exemple si la population s'accroît)
- comme pour la deuxième option n'en relocaliser qu'une part (fixée par l'utilisateur)
- relocaliser uniquement les aménités qui s'ajoutent entre la situation actuelle et la situation future

Ces (re)localisations peuvent se faire n'importe où dans la zone de travail, pour autant qu'elles respectent les contraintes fixées (par exemple population minimum et maximum par cellule), ou se faire uniquement dans les zones que l'on considère comme constructibles. On limite alors au sein même de la zone de travail, la surface dans laquelle les relocalisations peuvent avoir lieu. Cette option permet d'intégrer les contraintes d'urbanisme (zone de protection, zones soumises aux risques, etc.).

2.2. Le modèle *Optidens*

Informatiquement *Optidens* consiste à résoudre un problème d'optimisation combinatoire non trivial en raison de la multiplicité des contraintes considérées et du fait que la plupart des critères sont spatiaux. L'aspect combinatoire trouve son essence dans la multiplicité des possibilités offertes pour le « rebâti » de chaque parcelle sujette à mutation.

L'objectif a été de développer un modèle mathématique qui permette de rendre générique l'approche (c'est-à-dire indépendante des données qui pourront ainsi être changées pour pouvoir tester divers scénarios et diverses régions géographiques). Ce modèle permet également à terme d'élargir le champ des possibilités et des critères considérés dans la planification. Il est constitué par des variables de décision, dont on cherche la valeur, des données, des équations ou inéquations, appelées contraintes et régissant les rapports entre données et variables, ainsi que par une fonction objectif. La résolution du modèle consiste à trouver une valeur à chacune des variables de décision de telle sorte que toutes les contraintes soient satisfaites et la fonction objectif minimisée.

Pour généraliser notre approche et rendre le modèle un peu plus compact, nous allons ajouter la notion de caractéristique aux concepts de points de mesure et d'activités vus plus haut. Une caractéristique est une grandeur que l'on souhaite maintenir, diminuer ou augmenter (selon les cas). La densité de population et la densité en espaces verts sont par exemple des caractéristiques que l'on veut, pour l'une, limiter et, pour l'autre, que l'on souhaite être au-dessus d'un niveau donné. Il est à noter qu'une activité et une caractéristique peuvent être

liées entre elles. C'est notamment le cas du PIS et de la densité qui dépendent tous deux de la population résidant dans les différentes zones.

Ces différentes notions permettent d'introduire le modèle. Nous définissons tout d'abord de façon plus formelle que précédemment les données, les variables de décision, la fonction objectif et les contraintes.

Description des données

Le territoire est divisé en cellules carrées, dont certaines (ou toutes) contiennent des points de mesure, et nous considérons un ensemble d'activités et de caractéristiques. Nous noterons :

- Z , l'ensemble des zones,

- P , l'ensemble des points de mesure ($P \subset Z$),

- A , l'ensemble des activités,
- C , l'ensemble des caractéristiques,

- $C_A \subset C$ l'ensemble des caractéristiques « pures », c'est-à-dire ne correspondant

à aucune activité,

- $G_p \subset Z$, la zone géographique associée à $p \in P$ pour le calcul des

caractéristiques,

- S_z , la surface totale de la zone $z \in Z$,

- s_a , la surface élémentaire occupée par une unité de l'activité $a \in A$,
- s_c , la surface élémentaire occupée par une unité de la caractéristique $c \in C$,
- $\underline{\sigma}_{a,p}$ et $\overline{\sigma}_{a,p}$ les niveaux minimal et maximal (respectivement), d'activité $a \in A$

A requis comme étant accessible dans une durée donnée par l'utilisateur à

partir du point de mesure $p \in P$,

- $\underline{\sigma}_{c,p}$ et $\overline{\sigma}_{c,p}$, les niveaux minimal et maximal (respectivement) requis pour la caractéristique $c \in C$ en ce qui concerne le point de mesure $p \in P$.

Par ailleurs, nous supposons également connaître :

- le nombre total d'unités t_a à satisfaire à la fin de la période de planification

pour $a \in \bar{A}$, $\bar{A} \subset A$ étant un sous-ensemble d'activités. Ceci est

particulièrement important pour l'activité population,

- un ensemble discrétisé V de vitesses possibles,

— des quantités binaires $\delta_{p,z,v}$ égales à 1 si la vitesse $v \in V$ permet de joindre la

zone $z \in Z$ à partir du point de mesure $p \in P$ dans la quantité de temps

impartie par l'utilisateur et 0 sinon. Ces quantités doivent donc être pré-calculées.

Les variables de décision

Les variables de décision correspondent réellement aux décisions que doit prendre un éventuel planificateur. Elles concernent donc :

- $Q_{a,z}$ la quantité d'activité $a \in A$ que l'on va placer dans la zone $z \in Z$.

Ces variables sont naturellement contraintes d'être positives ou nulles.

Suivant les besoins, on peut de plus définir pour chacune d'entre elles une borne supérieure et une borne inférieure que l'on désignera respectivement par $\underline{q}_{a,z}$ et $\overline{q}_{a,z}$.

Cela permet d'interdire (par exemple pour cause de plan local d'urbanisme) le placement d'une activité sur une zone en posant $\underline{q}_{a,z} = \overline{q}_{a,z} = 0$, de prendre également en compte la présence d'une activité sur une zone que l'on ne souhaite pas diminuer (définir la borne inférieure de la variable à la quantité correspondante), de considérer qu'il est des zones que l'on ne peut modifier (fixer la borne inférieure et la borne supérieure égales à la quantité souhaitée), de limiter le nombre d'unités de l'activité sur une zone particulière (fixer la borne supérieure de la variable à la limite souhaitée), etc.

- $Q_{c,z}$ la quantité de la caractéristique $c \in C$ que l'on va placer dans la zone $z \in Z$.

Comme précédemment, ces variables peuvent être bornées pour prendre en compte certaines situations. De plus, ainsi que souligné plus haut, il existe des liens entre certaines caractéristiques et certaines activités, notamment entre la densité de population et le PIS qui dépendent tous deux de la population décidée par le modèle sur les zones. Dans ce cas, nous ajouterons une contrainte artificielle (mais permettant de préserver sa

lisibilité au modèle) $Q_{a,z} = Q_{c,z}$ si $a \in A$ et $c \in C$ sont dépendantes du même choix.

Nous considérons que ces variables sont continues, c'est-à-dire qu'elles peuvent prendre n'importe quelle valeur réelle (entre leurs bornes), même s'il est probable que de les limiter à des valeurs entières serait plus lisible pour un planificateur. Néanmoins, le degré de difficulté induit par des variables entières est extrêmement important, alors que la différence induite, dans la solution, par une valeur réelle et son arrondissement, est parfaitement négligeable.

Le modèle nécessite cependant l'introduction de variables binaires : le choix de la vitesse, que, à ce stade, on considère homogène sur l'ensemble du réseau, implique de définir :

$x_v = 1$ si on choisit la vitesse $v \in V$ sur l'ensemble du réseau routier, $x_v = 0$ sinon.

Les données et variables définies ci-dessus nous permettent maintenant de présenter le modèle.

Fonction objectif et contraintes

Nous souhaitons minimiser la vitesse de déplacement sur l'ensemble du réseau, c'est-à-dire que nous cherchons (en respectant les contraintes définies plus bas) à atteindre le :

$$\min \sum_{v \in V} v x_v \quad (1)$$

Les contraintes du problème quant à elles s'expriment de la manière suivante.

- Il faut choisir une et une seule vitesse dans l'ensemble discret V

$$\sum_{v \in V} x_v = 1 \quad (2)$$

- Pour chaque point de mesure $p \in P$ et chaque activité $a \in A$, nous devons respecter les

niveaux minimal et maximal d'accessibilité souhaités par l'utilisateur

$$\underline{\sigma}_{c,p} \leq \sum_{z \in Z} \delta_{p,z,v} x_v Q_{a,z} \leq \overline{\sigma}_{c,p} \quad (3)$$

- Pour chaque point de mesure $p \in P$ et chaque caractéristique $c \in C$, nous devons respecter

les niveaux minimal et maximal souhaités par l'utilisateur

$$\underline{\sigma}_{c,p} \leq \sum_{z \in G_p} Q_{c,z} \leq \overline{\sigma}_{c,p} \quad (4)$$

- Pour chaque zone $z \in Z$, on ne peut affecter plus d'activité et de caractéristiques qu'il n'y

a de surface disponible

$$\sum_{a \in A} S_a Q_{a,z} + \sum_{c \in C_A} S_c Q_{c,z} \leq S_z \quad (5)$$

- Pour chaque activité $a \in \bar{A}$ pour laquelle un niveau est requis à la fin de la planification, on doit respecter ce niveau

$$\sum_{z \in Z} Q_{a,z} = t_a \quad (6)$$

- Les variables doivent rester à l'intérieur de leurs limites

$$\underline{q}_{a,z} \leq Q_{a,z} \leq \overline{q}_{a,z} \quad (7)$$

$$\underline{q}_{c,z} \leq Q_{c,z} \leq \overline{q}_{c,z} \quad (8)$$

- Enfin, pour tout couple (a, c) activité-caractéristique liées à une même quantité et toute zone $z \in Z$

$$Q_{a,z} = Q_{c,z} \quad (9)$$

Résolution

L'optimisation de la répartition des densités en fonction de la vitesse (homogène dans le modèle ci-dessus) passe par la résolution d'un problème à variables mixtes (i.e. contenant à la fois des variables entières et des variables continues) non-linéaire (et, plus précisément, quadratique) puisque les contraintes (3) contiennent un produit de variables de décisions. Les problèmes à variables mixtes et quadratiques sont en pratique extrêmement difficiles à résoudre. Une des techniques communément utilisées pour les résoudre consiste à linéariser les produits de variables par l'ajout de variables et de contraintes (voir, par exemple, Gueye-Michelon, 2009). Une première méthode de résolution a consisté à créer le problème linéaire correspondant et à la résoudre à l'aide d'un logiciel commercial (CPLEX). Il s'est avéré que les temps de calcul, encore dans la limite du raisonnable, étaient tout de même très importants (de l'ordre d'une quinzaine d'heures) et rendaient fastidieuse l'exploration de plusieurs scénarios.

Nous avons alors opté par une technique basée sur l'observation de la structure du problème et en particulier sur la cause de non-linéarité. Celle-ci provient en effet des variables binaires associées aux vitesses et il en résulte que leur fixation rend le problème linéaire. Ainsi, nous avons choisi de résoudre le problème ci-dessus en résolvant une succession de problèmes linéaires, à variables continues, obtenus en fixant successivement les vitesses aux valeurs définies par l'ensemble V et ceci par ordre croissant. Tant que le problème correspondant

n'est pas réalisable (*i.e.* lorsqu'il n'existe aucune valeur pour les variables $Q_{a,z}$ et $Q_{c,z}$ permettant de satisfaire l'ensemble des contraintes), nous passons à la vitesse supérieure. Le processus s'arrête dès qu'une solution est trouvée, bien sûr, la dernière vitesse testée est optimale. Avec cette technique les temps de calcul ont été considérablement réduits.

Variante du modèle pour l'option pourcentage d'augmentation ou diminution des vitesses actuelles

Le problème ci-dessus présente l'inconvénient de ne considérer qu'une seule vitesse pour l'ensemble du réseau routier. Il s'agit certes d'une mesure (et non pas de la vitesse de déplacement réellement mise en pratique) mais, néanmoins, il est préférable de pouvoir considérer différentes vitesses selon les différents types d'axe routier. Pour cela, nous nous sommes intéressés à un ratio homogène de réduction des vitesses actuellement existantes. Ainsi, si le ratio de réduction homogène calculé est de 80%, tous les tronçons de route de la zone verront leur vitesse limitée à 80% de leur vitesse maximale autorisée actuellement.

Le problème à résoudre pour trouver ce ratio est en réalité tout à fait similaire à celui décrit ci-dessus : il suffit de considérer un ensemble de ratio discrétisé, de définir des variables binaires $x_r = 1$ si le ratio r est choisi, de remplacer $\delta_{p,z,v}$ par $\delta_{p,z,r}$ qui sera pré-calculé et qui vaudra 1 si la zone z est accessible dans le temps imparti à partir du point de mesure p si le ratio r est choisi. La technique de résolution reste la même, par essais successifs des ratios.

L'intégration du taux de relocalisation dans le modèle

Afin de mieux correspondre à la réalité de la planification urbaine on introduit une contrainte supplémentaire, qui limite les quantités d'activités relocalisables par rapport à la situation actuelle. Plus ce taux de relocalisation sera faible, plus la solution sera « crédible » et réalisable concrètement.

Soit r_a , le taux maximal de relocalisation pour chaque activité $a \in A$.

La contrainte est alors la suivante :

$$\frac{\sum_{z \in Z} x - abs_{z,a}}{2t_a} \leq r_a \quad \forall_a \quad (10)$$

Ou, $x - abs_{z,a}$ est la valeur absolue de relocalisation pour chaque cellule $z \in Z$ et

chaque activité $a \in A$

On introduit également une contrainte afin de vérifier la valeur $x - abs_{z,a}$. Ces contraintes sont chargées de contrôler le taux de relocalisation.

La valeur $x - abs_{z,a}$ peut prendre une valeur plus grande que la valeur absolue de relocalisation, mais ne peut pas dépasser le taux de changement. $x - abs_{z,a}$:

$$\overline{q_{a,z}} - (q_{a,z} + Q_{a,z}) \leq x - abs_{z,a} \quad \forall_z \forall_a \quad (11a)$$

$$-(\overline{q_{a,z}} - (q_{a,z} + Q_{a,z})) \leq x - abs_{z,a} \quad \forall_z \forall_a \quad (11b)$$

2.3. Le logiciel *Optidens*

Le logiciel *Optidens* a été développé pour une utilisation ergonomique et pour laisser la possibilité d'une large diffusion de l'outil. Aussi, il s'appuie sur des logiciels libres. QGIS en ce qui concerne la composante SIG et sur le logiciel CBC pour la partie Optimisation. Si le logiciel CPLEX, utilisé de prime abord pour l'optimisation, s'avère plus performant que CBC, il présente l'inconvénient d'être payant et très onéreux limitant ainsi de fait la diffusion possible d'*Optidens*. Aussi, l'effort a été fait afin de proposer un logiciel s'appuyant uniquement sur des solutions libres.

Le développement de l'outil a été réalisé en Python en utilisant l'API PyQt pour l'implémentation des différents composants graphiques et l'API PyQgis pour l'implémentation des fonctionnalités de visualisation des résultats et la génération des cartes.

2.3.1. Les données et paramètres nécessaires pour les simulations

La logique du logiciel est la suivante :

- l'utilisateur commence par rentrer des paramètres sur la zone d'étude :
 - o le dossier dans lequel le projet sera créé,

- un shape file (fichier de forme, qui est un format standard du domaine de la géomatique) qui représente la zone de réaffectation (relocation zone),
- un shape file donnant l'extension et résolution de la grille pour laquelle les données vont être collectées,
- un shape file des points de mesure qui peuvent correspondre à tous les centres des cellules de la grille, ou à des points sélectionnés préalablement et stockés dans le shape file. (measurements points),
- la surface de chaque cellule de la grille (paramètre utilisé numériquement par le modèle).

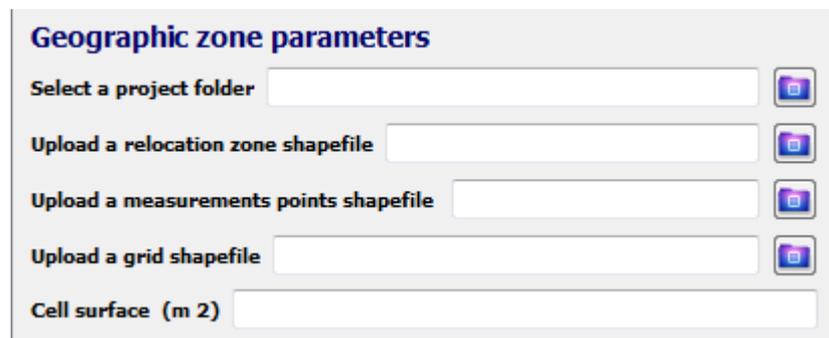


Figure 2 Fenêtre d'Optidens 1

- puis il indique la mode d'optimisation en choisissant s'il veut obtenir la vitesse minimale permettant de satisfaire les contraintes et que le modèle va choisir dans un ensemble discret rentré manuellement, ou le pourcentage de diminution (ou augmentation) par rapport aux vitesses actuelles.

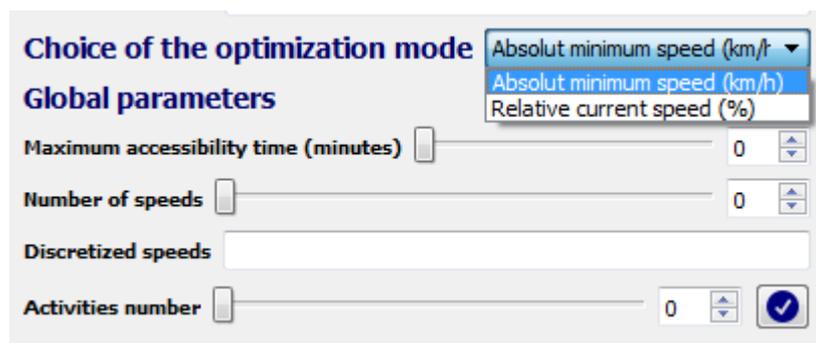


Figure 3 Fenêtre d'Optidens 2

- L'utilisateur rentre ensuite des paramètres globaux d'analyse :
 - le seuil de temps pour lequel les accessibilités (à la population, aux emplois, etc.) vont être calculées. Ce seuil est très important, puisqu'il revient à dire quelle ville l'on souhaite : vivre avec un recours minimum à la vitesse automobile dans un rayon de 10, 15, 20 minutes, etc.

- le nombre et les valeurs des vitesses parmi lesquelles le logiciel va chercher le minimum permettant de satisfaire toutes les contraintes, si l'option vitesse minimum a été choisie préalablement
- le nombre « d'activités » que l'on va considérer (nb : comme expliqué plus haut le mot activité est à considérer dans un sens très large. Cela peut concerner la localisation de la population, des emplois, des commerces ou tout autre type d'activités humaines). C'est ici que l'on décide si on va par exemple utiliser comme contrainte le PIS seulement et/ou l'accessibilité à l'emploi, aux commerces... Pour chaque activité considérée, il faudra rentrer les données nécessaires dans la boîte de dialogue suivante.

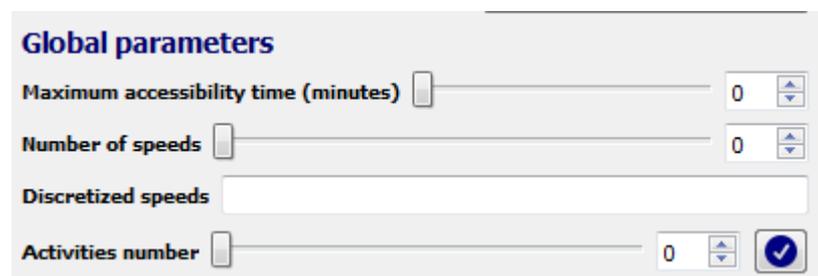


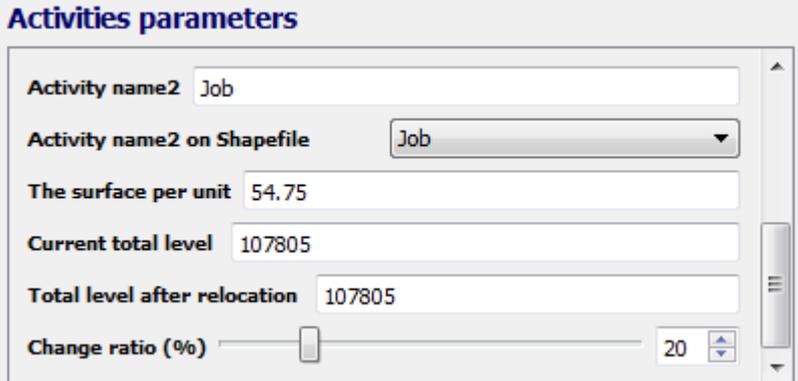
Figure 4 Fenêtre d'Optidens 3

Ainsi pour chaque activité il faut rentrer :

- son nom (utilisé pour l'affichage).
- le nom du champ dans le shape file de la grille qui correspond à cette activité. On a en effet un fichier qui donne le numéro du point de mesure en première colonne, puis la quantité d'activité par point de mesure dans les colonnes suivantes (nombre d'habitants, d'emplois, etc.).
- la surface en m² au sol que requiert une unité de l'activité considérée (un emploi, un habitant, un commerce). Cette mesure évite que toute l'activité soit éventuellement concentrée dans quelques cellules, sans tenir compte de leur capacité d'accueil.
- le montant total actuel de l'activité sur l'ensemble de la zone d'étude (le total d'emplois, d'habitants, etc.).
- le total futur de cette activité pour la zone d'étude. Ces deux derniers chiffres permettent d'intégrer, en plus du reformatage du territoire, la possibilité d'une dynamique de croissance ou décroissance. Ainsi, si le total futur de l'activité est le même que le total actuel, cela signifie qu'il y aura seulement relocalisation de l'existant, si ce total est supérieur à la situation actuelle, alors il y aura relocation et ajout d'aménités. Se le total futur est inférieur à l'actuel, cela signifie que la zone va décroître eu égard à l'activité considérée. On ne relocalisera alors que le total prévu à terme.

Il est intéressant de noter ici que le test du logiciel auprès des opérationnels a permis de montrer que dans leur pratique ils s'intéressent beaucoup plus à l'ajout qu'au reformatage. Quels que soient les territoires, la logique est donc celle de la croissance (ajouter de la population, des emplois, etc.), beaucoup plus que de chercher à optimiser l'existant (logique de la relocalisation). *Optidens* permet de travailler en fonction des deux logiques.

- le % de changement. Ce pourcentage correspond à la part de l'activité que l'on s'autorise à relocaliser. S'il est de 100% cela revient à considérer que tout le tissu urbain est « reformatable » et que l'on peut faire table rase de la situation actuelle. S'il est inférieur à 100%, par exemple de 20%, cela correspond au fait que, pour l'activité considérée, on s'autorise au terme de la simulation à relocaliser 20% du total (emplois, population, etc.). Ce pourcentage peut varier pour chaque type d'activité. On peut donc pour une simulation considérer que l'on va pouvoir relocaliser 20% de la population, mais 15% des emplois seulement. Ce chiffre permet de prendre en compte la réalité de la dynamique urbaine.



The screenshot shows a window titled "Activities parameters". It contains the following fields and controls:

- Activity name2**: Text input field containing "Job".
- Activity name2 on Shapefile**: Dropdown menu showing "Job".
- The surface per unit**: Text input field containing "54.75".
- Current total level**: Text input field containing "107805".
- Total level after relocation**: Text input field containing "107805".
- Change ratio (%)**: A slider control with a numerical display showing "20".

Figure 5 Fenêtre d'Optidens 4

Les autres données nécessaires pour la simulation (boîte de dialogue Mandatory data) sont :

- la valeur minimum requise pour chaque activité (valeur de PIS par exemple) qui peut être unique (la même pour tous les points de mesure) ou différer localement. Dans ce cas, il faut rentrer un fichier (.csv) donnant le numéro du point de mesure et la valeur minimum requise pour chaque activité énumérée.
- un fichier (.csv) donnant le niveau actuel de chaque activité par cellule (population, emplois, etc.)
- un fichier donnant de la même manière la valeur minimum de densité d'activité requise par cellule.
- le rayon en mètres pour lequel la densité locale va être calculée. Un rayon de 1 000 m revient par exemple à calculer la densité dans les cellules contigües d'ordre 2 au sens strict de la cellule dans laquelle est situé le point de mesure. Plus ce rayon sera grand,

plus l'échelle à laquelle la contrainte de densité maximale à ne pas dépasser sera importante.

- le seuil de densité d'activité (population en générale) à ne pas dépasser dans le rayon rentré préalablement. Si ce paramètre est possible à rentrer pour toutes les activités, il est entendu qu'il sera surtout utilisé pour la population, même s'il est donc possible en termes de simulation de vouloir limiter la densité de commerces ou d'emplois dans un rayon donné.

Si ce seuil n'est pas le même pour chaque point, alors il faut charger un fichier d'extension .csv qui indique la valeur du seuil pour chaque point de mesure.

- un fichier décrivant la constructibilité des cellules. Il s'agit d'un fichier binaire indiquant pour chaque cellule si elle est constructible ou pas (si une cellule est constructible, la valeur est de 1, 0 si elle ne l'est pas). Ce fichier est pour l'instant le même pour toutes les activités, mais il est prévu qu'il soit propre à chaque activité (en effet, certaines zones sont possibles pour la localisation de commerces, mais pas pour les habitations par exemple).
- la matrice des distances euclidiennes entre points de mesure (nécessaire pour calculer les densités locales)
- la matrice des temps actuels de trajets au plus court chemin en voiture entre tous les points de mesure. Cette matrice est calculée pour des conditions de circulation fluides. Elle sert notamment à pouvoir utiliser l'option d'optimisation qui consiste à trouver le pourcentage de croissance ou décroissance des vitesses permettant de satisfaire les contraintes.
- La matrice des distances réseau en km entre tous les points de mesure qui tient compte des sens uniques.

Ces matrices doivent pour l'instant être calculées en amont de la simulation avec un SIG et la base de données adéquate. Ces calculs n'étant pas « triviaux », puisqu'ils nécessitent une bonne base de données, bien structurée topologiquement, et des extensions informatiques relativement complexes pour le calcul des plus courts chemins, ils n'ont pas été directement intégrés au logiciel. Pour la suite, on cherchera à intégrer la possibilité de calcul des matrices directement dans *Optidens* à partir d'une base de données routière chargée par l'utilisateur.

- un fichier avec le numéro des cellules et 1 en face si la cellule contient un point de mesure, 0 dans le cas contraire. Ce fichier permet de limiter la vérification des contraintes à certains lieux seulement définis par l'utilisateur. On s'éloigne dans ce cas de la logique d'équité pour laquelle les mêmes qualités (en termes d'accessibilité par exemple) caractérisent tous les lieux de la zone d'étude.

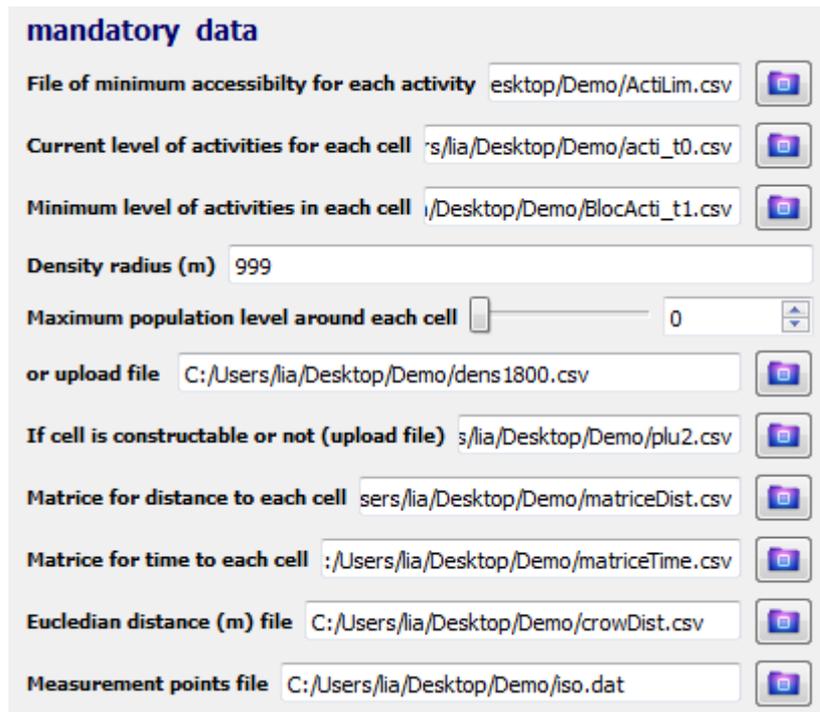


Figure 6 Fenêtre d'Optidens 5

Reste enfin à rentrer le cas échéant certaines données optionnelles telles que :

- la compacité. Si elle est fixée à 100% ce qui signifie que toute la surface des cellules peut être construite.
- un éventuel niveau minimum d'individus par cellule qui sera homogène pour l'ensemble de la zone de travail ou différent pour chaque point (il faut alors charger le fichier nécessaire donnant le numéro des points de mesure et le nombre d'individus requis).

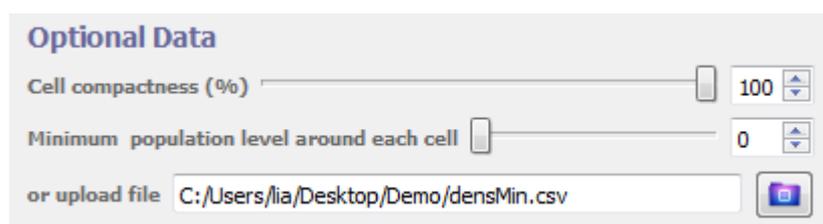


Figure 7 Fenêtre d'Optidens 6

2.3.2. la visualisation des données et résultats

Les différentes couches décrivant la zone de travail peuvent être listées, activées ou désactivées dans la table des matières situées à gauche de l'interface. Il est aussi possible ici de changer la méthode de discrétisation des données. Ces données s'affichent dans la fenêtre de visualisation à droite de l'interface.

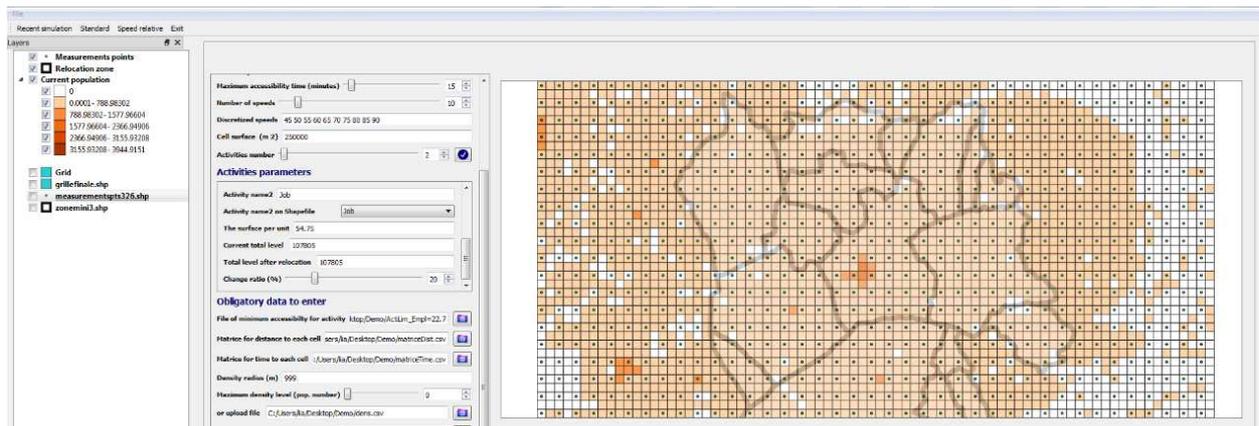


Figure 8 Fenêtre d'Optidens 7 : la visualisation

Après avoir rentré les données nécessaires, l'utilisateur lance la simulation avec le bouton run. Une fois le calcul terminé (la durée dépend de la taille de la zone d'étude, de la résolution des cellules et du nombre de contraintes et varie de quelques secondes à plusieurs heures de calcul), on obtient :

- la vitesse minimum permettant de satisfaire les contraintes si elle existe, ou le pourcentage d'augmentation ou diminution des vitesses actuelles selon l'option choisie,

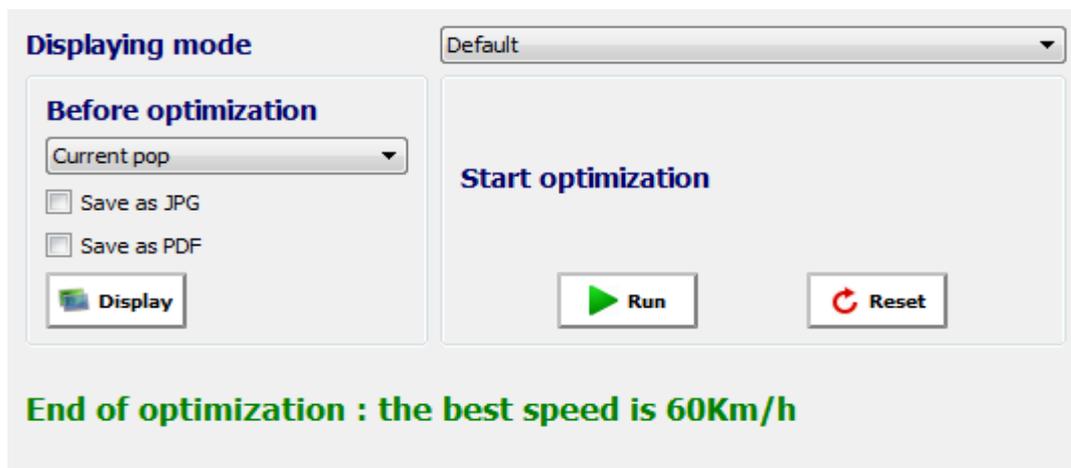


Figure 9 Fenêtre d'Optidens 8 : les résultats

- un fichier shape file dans le dossier saisi au départ qui contient toutes les données relatives à chaque cellule et à chaque activité (niveau actuel , niveau après optimisation, différence entre les deux situations),

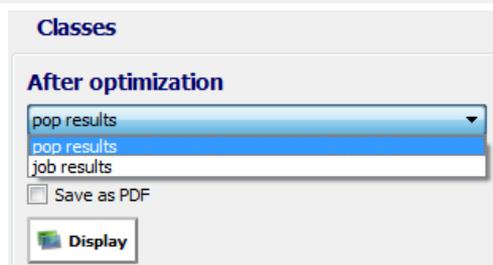
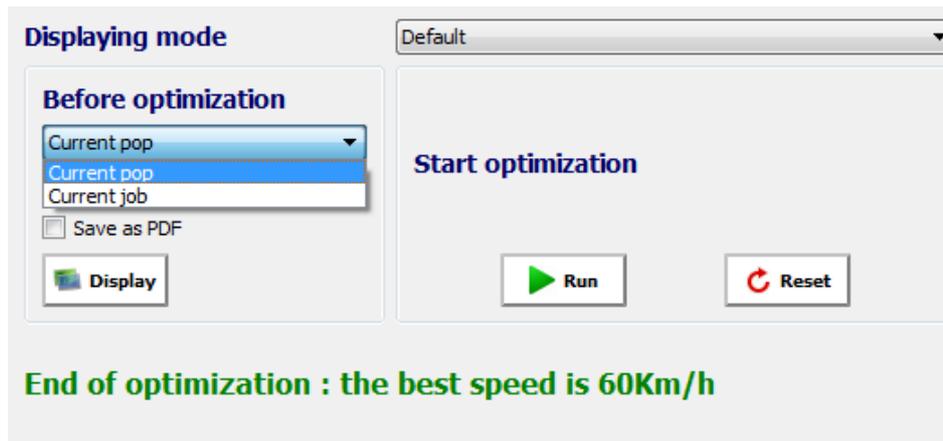


Figure 10 Fenêtre d'Optidens 9 : la cartographie des résultats

- la possibilité de cartographier la localisation des aménités avant et après relocalisation ainsi que les différences pour chaque activité, de façon à bien visualiser les zones qui gagnent versus perdent des aménités.

Chacune des cartes (dont la discrétisation peut être modifiée) est exportable aux formats jpeg ou pdf.

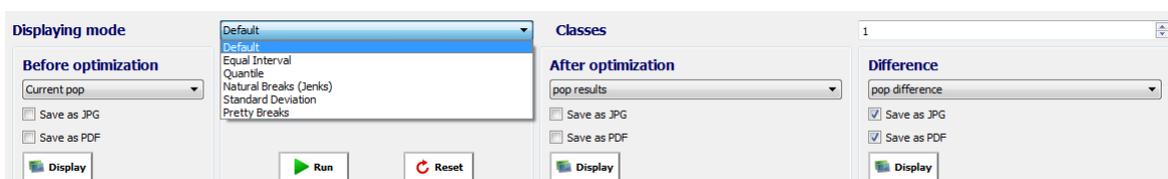
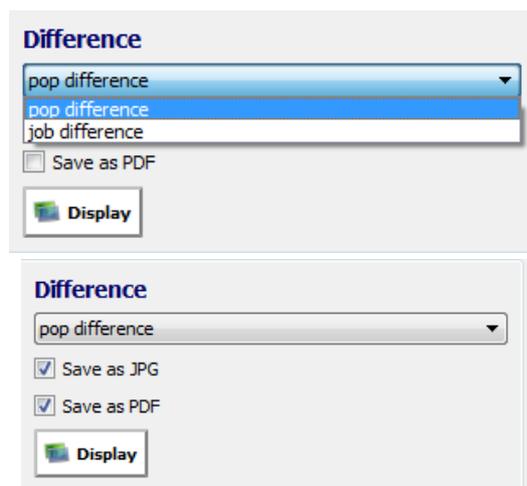


Figure 11 Fenêtre d'Optidens 10 : l'export de cartes

Enfin, si la visualisation permet d'avoir une vue de la situation avant et après relocalisation et la vitesse minimum permettant de vérifier les contraintes, elle permet aussi de donner le détail des vitesses nécessaires pour chaque point de mesure.

En effet, rappelons que la vitesse donnée par Optidens est la vitesse minimale à atteindre pour le point de comptage le moins bien loti (le pire cas). Obtenir une vitesse de 60 km/h ne signifie donc pas qu'il faille rouler partout à 60 km/h, mais que pour un point au moins il est nécessaire d'atteindre cette vitesse pour vérifier les contraintes.

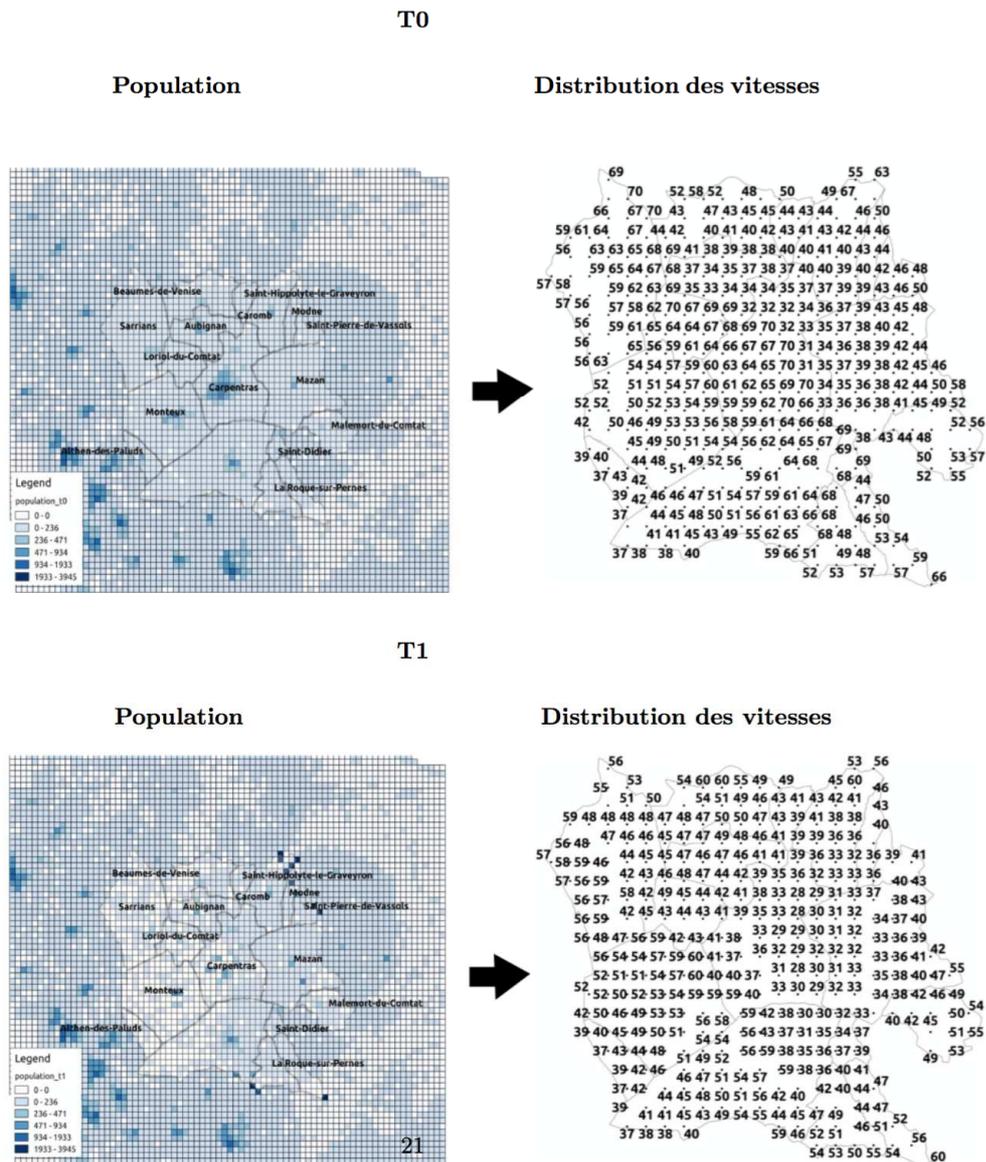


Figure 12 Fenêtre d'Optidens 11 : affichage des vitesses pour chaque point de mesure avant (T0) et après relocalisation (T1)

3. Illustrations des possibilités d'OPTIDENS

Les analyses empiriques présentées ici ont pour vocation d'illustrer les capacités du modèle *Optidens* comme outil d'aide à la concertation et à la décision pour tendre vers des territoires accessibles mais plus lents, plus que de livrer une étude de cas complète explorant tous les possibles, sachant que la combinatoire est très importante.

3.1. La zone d'étude

La zone de travail utilisée ici à titre heuristique se situe dans les environs de Carpentras (Vaucluse). Elle compte 327 000 habitants (dont 28 000 à Carpentras) et 107 000 emplois. La zone de réaffectation, dans laquelle les relocalisations sont considérées comme possibles est au cœur de la zone de travail et compte 83 000 habitants et 21 000 emplois. Rappelons que cette distinction entre zone de travail et zone de réallocation permet d'éviter un effet de bord. En effet, pour un point de comptage situé en périphérie de la zone de réaffectation, il est nécessaire de tenir compte dans le calcul des accessibilités des populations et emplois situés hors de la zone de réallocation, même si on considère que leur localisation ne peut pas être modifiée.

Les données sont donc collectées pour une zone élargie qui participe aux calculs, mais les réallocations ne se font que dans la zone de réallocation située au centre et qui correspond ici peu ou prou au SCOT de Carpentras.

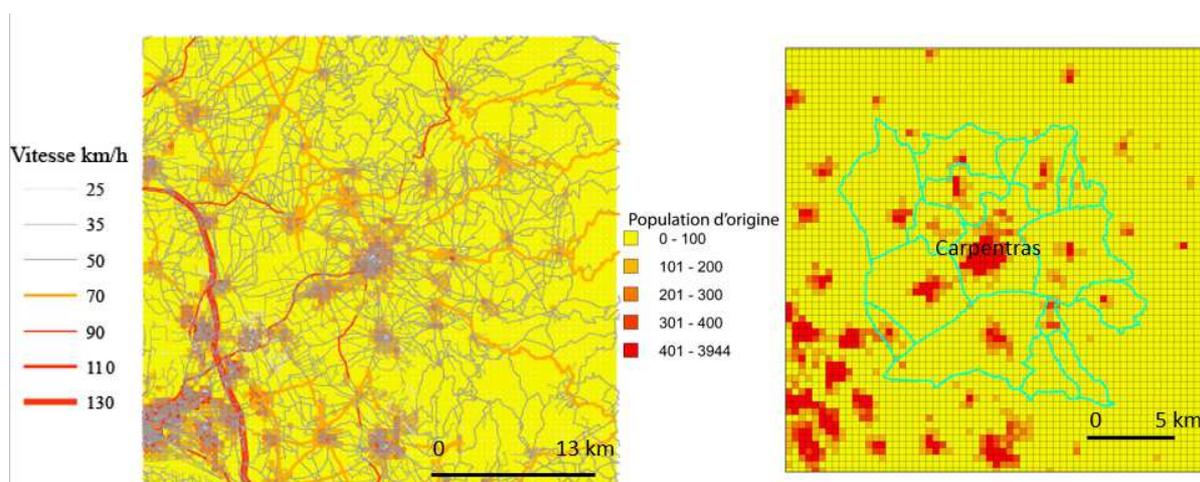


Figure 13 zone de collecte des données (à gauche) et zone de relocalisation (en bleu à droite)

La zone de travail est divisée en 6 095 cellules de 500*500 mètres dont 1 304 font partie de la zone de réaffectation. Le PIS moyen actuel est de 51 000 (avec une forte variance), la densité moyenne autour des points de mesure de 225 habitants/km² (mais avec une amplitude très

forte de plus de 6 000) et la vitesse moyenne des trajets en voiture entre tous les couples de points de mesures de 53 km/h.

Pour faciliter les comparaisons, nous avons fixé certains paramètres pour toutes les simulations présentées. Ainsi, sur la base des observations actuelles, la surface nécessaire par personne est fixée à 90.5 m² et celle par emploi à 57.75 m². La compacité maximum, quand elle est utilisée, est de 70%. Dans ce cas, la population maximum par cellule ne peut excéder 1 933 personnes ($[(500*500)*0.7]/90.5 = 1\ 933$).

Le temps de trajet choisi pour le calcul des accessibilités est de 15 minutes en voiture. Ce seuil correspond à la volonté d'obtenir des territoires où l'accessibilité s'organise à relative courte portée (la population et l'emploi doivent être accessibles à moins de 15 minutes de chaque point de mesure), alors qu'aujourd'hui la mixité des fonctions (logement, emplois notamment) s'organise à des échelles plus larges (une trentaine de minutes). En utilisant ce seuil de 15 minutes, on est donc dans une logique de constitution d'un territoire pouvant fonctionner à courte portée.

3.2. Plus l'accessibilité à la population (PIS) souhaitée est forte, plus la vitesse des déplacements doit être élevée, mais sans proportionnalité

Nous commençons par montrer l'effet de la seule valeur du PIS, identique en tout lieu, sur les vitesses nécessaires pour satisfaire la contrainte. Pour une compacité fixée à 70%, on observe que pour un PIS variant de 30 à 70 mille (*i.e* 30 000 à 70 000 personnes accessibles au départ des points de comptage en 15 minutes maximum), la vitesse nécessaire varie de 45 à 65 km/h pour un taux de relocalisation de 100%.

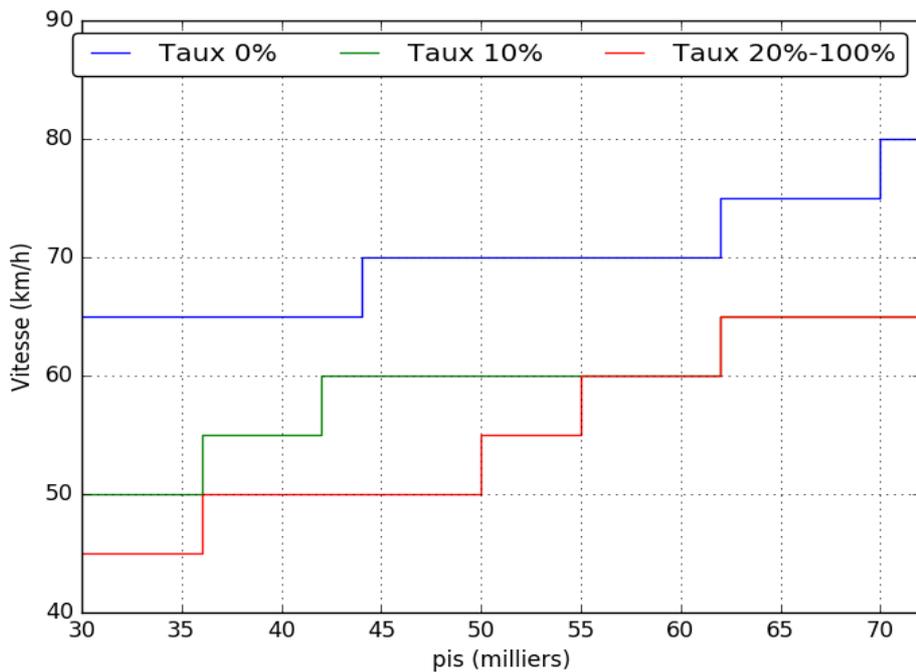


Figure 14 Évolution de la vitesse en fonction du PIS et du taux de relocalisation

L'effet des taux variables de relocalisation

En intégrant un taux variable de relocalisation, on observe logiquement que plus le ce taux est faible et le PIS requis élevé, plus la vitesse conséquente sera haute, mais sans proportionnalité (pour un PIS supérieur à 55 000 par exemple, que le taux de relocalisation soit de 10 ou 100% la vitesse est ici identique).

En effet, plus le taux de relocalisation est faible (moins la dynamique urbaine est considérée comme forte), plus il est difficile au logiciel de trouver une solution permettant de satisfaire les contraintes et donc plus il est « contraint » de compenser le peu d'ouverture possible en termes de relocalisation par des vitesses plus élevées.

Utiliser un taux de zéro pour cent revient à demander au logiciel de ne pas changer les localisations et de trouver, si elle existe, la vitesse permettant de satisfaire les contraintes (ici d'accessibilité). Ce qui peut constituer une utilisation « détournée » du logiciel pour travailler sur les politiques de vitesses.

L'effet du taux de relocalisation est illustré sur la figure ci-dessous où on peut voir que pour un PIS de 50 000, la possibilité de relocaliser 20% de la population fait diminuer la vitesse requise de 15 km/h par rapport à la situation où les localisations sont fixes (zéro % de relocalisation).

Très souvent on observera l'existence de ce seuil de 15-20% de relocalisation. Ce seuil semble montrer qu'en deçà de 10% de relocalisation les optimisations sont difficiles, mais à

l'inverse qu'il n'est pas nécessaire d'avoir des taux de relocalisation systématiquement très élevés pour que les optimisations se fassent dans de bonnes conditions. À partir de 15% de relocalisation, les aménageurs possèdent donc une vraie marge de manœuvre pour optimiser leur territoire.

Spatialement (figure ci-dessous), on note que la réallocation pour un taux de 100% de réaffectation favorise les cellules peu peuplées à l'origine (en bleu sur la carte). Ici 100% des cellules sont constructibles. Notons toutefois que le noyau urbain central perdure même pour un PIS de 70 000.

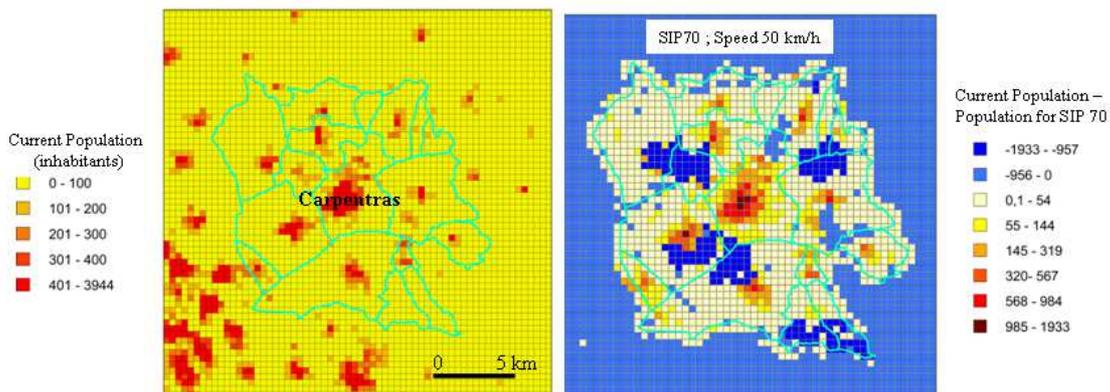


Figure 15 Réallocation de la population pour un PIS de 70 000

La possibilité de fixer des niveaux de contraintes différents localement

Si on fixe des niveaux de PIS différents localement avec de hautes valeurs locales, qui correspondraient à la volonté de « favoriser tel ou tel secteur », alors les vitesses requises augmentent puisque le modèle a alors moins de liberté pour réaliser les réallocations adéquates.

Cette possibilité de fixer des niveaux de PIS différents pour chaque point (qui existe aussi pour les autres contraintes) est très importante. Elle permet notamment d'assurer, si on le souhaite, une certaine inertie aux structures actuelles (en plus de la possibilité de ne relocaliser qu'une part des aménités) et d'avoir une vision plus « dirigiste ». En fixant des PIS différents localement, on laisse moins de liberté au logiciel pour trouver des solutions, on lui demande davantage par rapport à une vision préconçue de ce que doit être le territoire de voir dans quelle mesure les contraintes peuvent être vérifiées.

Dans la figure ci-dessous les niveaux de PIS requis localement ont été calculés au prorata de la densité locale actuelle. Ainsi, les plus forts niveaux se trouvent au centre de la zone d'étude, dans la ville de Carpentras, avec des niveaux de 110 000, alors que pour les plus faibles, dans les petites communes avoisinantes, les PIS ont été fixés à 25 000. On peut alors logiquement constater sur la carte qui montre la différence de population par cellule entre la situation actuelle et la situation calculée pour des PIS localement différents, que les

relocalisations vont d'abord aux cellules où les PIS exigés sont les plus élevés et qu'ainsi la structure actuelle est maintenue et même renforcée.

Cette possibilité de fixer des PIS locaux différents est également très importante d'un point de vue « stratégique ». En effet, on peut par exemple vouloir favoriser les implantations dans les zones situées à proximité des infrastructures lourdes de transport en commun (gare par exemple) afin d'articuler la ville autour des infrastructures de transport, plutôt que de voir le transport public « courir après la ville ». Il suffit alors de fixer des seuils minimums élevés de population que l'on veut voir dans certaines cellules (vue locale) et d'attribuer aux points de mesure présents dans ces cellules à favoriser des PIS élevés (vue plus globale).

Par rapport à une démarche aujourd'hui « classique » de planification, qui souvent préconise de densifier autour des infrastructures de transport public, l'intérêt d'*Optidens* est ici de permettre d'articuler les échelles. On peut densifier localement (en donnant des minimums par cellule) tout en voyant l'effet en termes d'accessibilité de cette densification locale sur les PIS locaux calculés à une échelle plus large ainsi que sur les autres points du territoire.

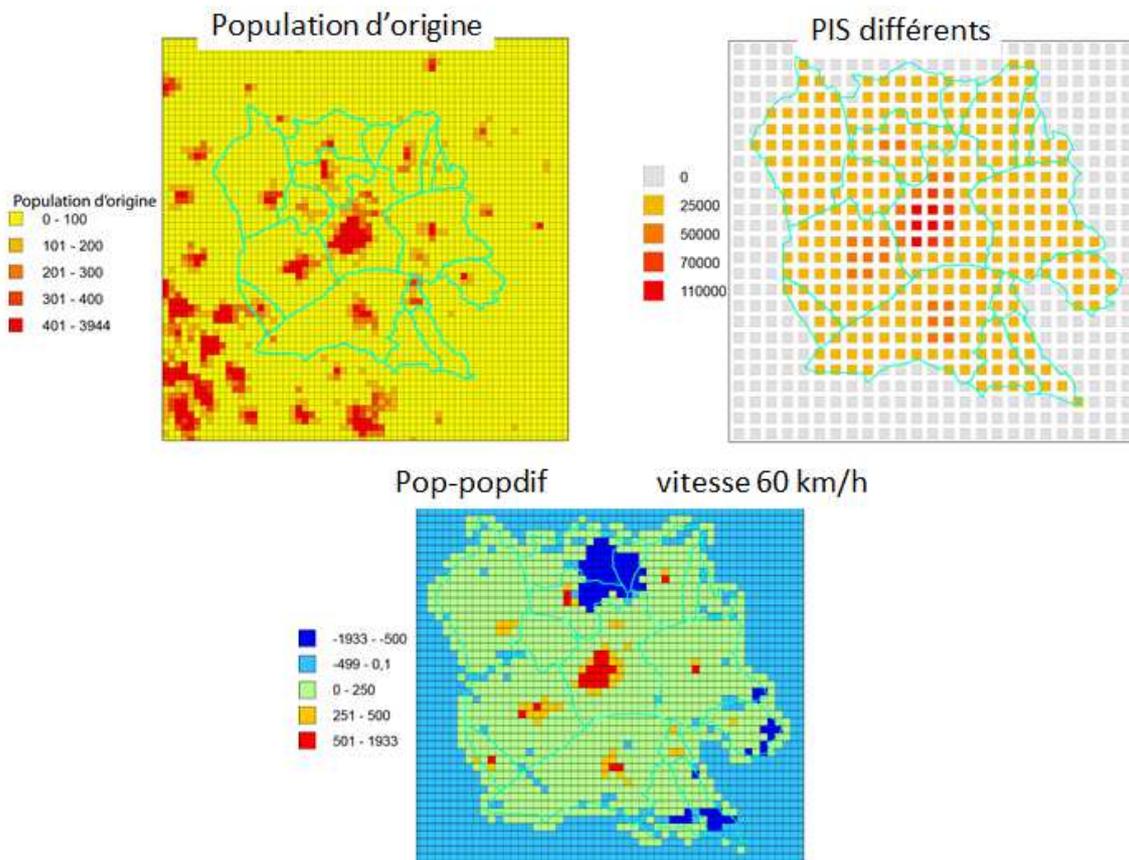


Figure 16 Simulation avec des PIS différents localement : population d'origine, valeurs locales du PIS, différence entre population d'origine et population après relocalisation

3.3. Constructibilité des terrains et vitesse

Pour l'analyse suivante, nous avons réduit la possibilité des réallocations aux seules cellules constructibles définies ici comme étant celles où la construction n'est pas interdite (cela exclut donc les zones soumises aux risques inondation, feux et technologiques, ainsi que les zones protégées en termes environnementaux telles que les Znief, Zico, etc.).

Sur l'aire d'étude les zones où la construction est possible ne représentent que 13% de la surface de la zone ré-affectable eu égard aux nombreux risques présents dans ce secteur notamment le feu et les inondations. Le cas traité n'est donc pas représentatif de ce qu'on peut trouver dans d'autres territoires (où ce pourcentage est en général supérieur), mais il est intéressant pour illustrer le poids de la contrainte réglementaires sur les possibilités d'évolution et d'optimisation du territoire.

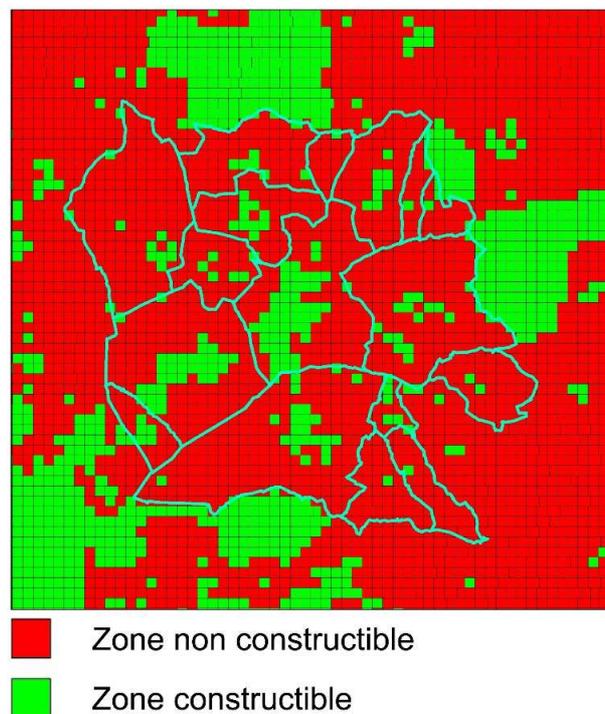


Figure 17 La constructibilité des terrains

Cette forte contrainte qui limite le degré de liberté dans les réaffectations induit une augmentation moyenne des vitesses requises de 20 km/h par rapport à la situation où tout est constructible.

En utilisant la fonction d'objectif qui donne le changement relatif des vitesses sur les différents tronçons, la vitesse doit augmenter de 30% dans le pire des cas (la hiérarchie des vitesses entre les voies et ici respectée).

PIS en milliers	30	40	50	60	70
Vitesse en km/h	60	60	60	70	70
Vitesses en % des vitesses initiales	100	100	110	120	130

Figure 18 *PIS et vitesse requise en prenant en compte la constructibilité des terrains.*

Cette simulation illustre bien la capacité d'*Optidens* à faire des liens originaux entre tissu urbain et ses contraintes – accessibilité et vitesse. On peut par exemple voir ici que les fortes contraintes qui limitent la construction sur le territoire d'étude « coûtent » à niveau de PIS donné 20 km/h en moyenne. On voit ici comment *Optidens* permet d'articuler politiques d'urbanisme (définition de PLU par exemple) et politiques de transport d'une façon originale dans une perspective systémique.

Spatialement, la limitation de la constructibilité conduit à une forte concentration de la population dans les quelques cellules où elle est possible, en particulier, comme c'est le cas pour la figure ci-dessous, si la valeur de PIS est élevée (ici 70 000) et qu'on ne fixe pas de limite supérieure pour l'accueil de population par cellule.

Notons que ne pas indiquer de valeur maximum de population par cellule (tout en n'utilisant pas non plus la contrainte de compacité qui revient à limiter les concentrations de population), permet de pointer les cellules où la relocalisation de population est intrinsèquement la plus « profitable » en termes d'optimisation. Cela peut être vu comme un moyen de hiérarchiser l'intérêt respectif des différentes cellules. En effet, quand on limite les valeurs maximum, on peut par exemple avoir deux cellules qui vont se voir affecter le maximum possible de population, mais sans que l'on sache laquelle est la plus « profitable » en termes d'accessibilité et de limitation des vitesses. Ce ne sera plus le cas sans limite de population puisque le modèle localisera les aménités dans les cellules les plus profitables seulement.

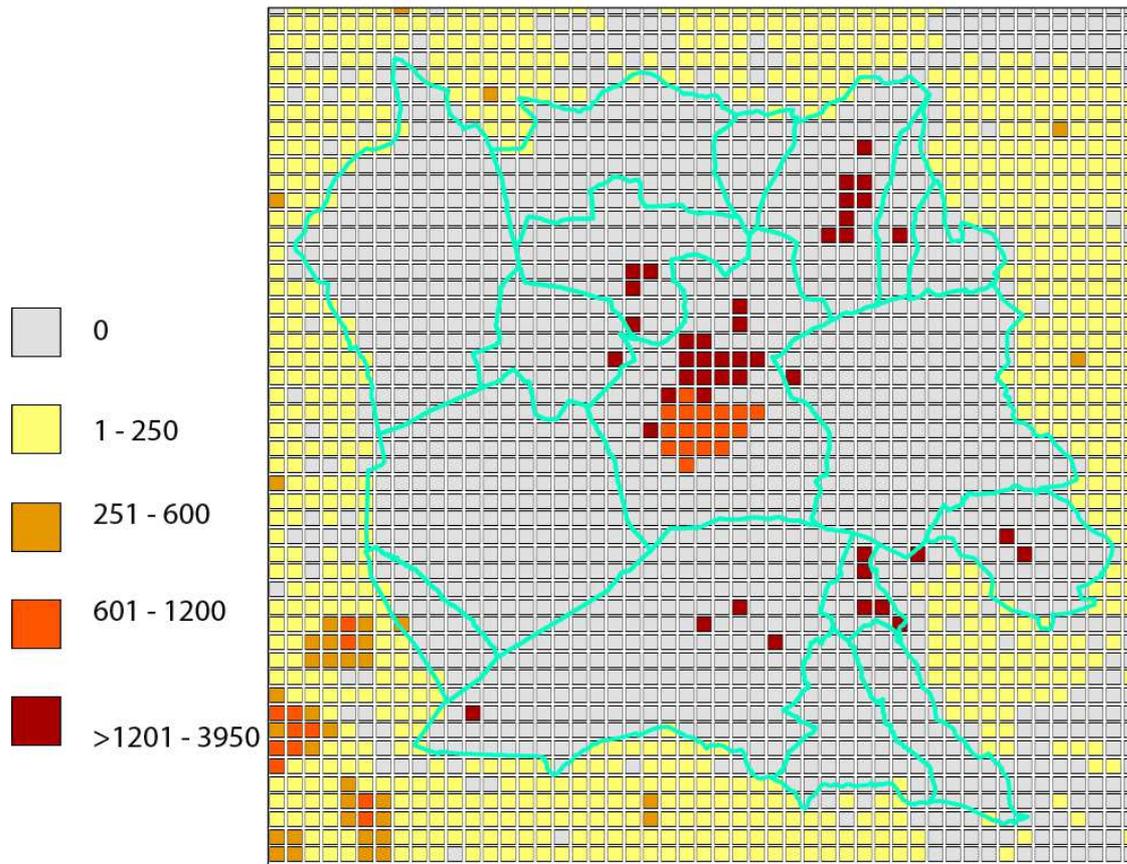


Figure 19 Ajout de population par cellule pour un PIS de 70000 sans limite de compacité ni de population par cellule. Vitesse requise : 70 km/h

Plutôt que d'utiliser une couche donnant une forme de constructibilité « théorique » à savoir tout ce qui n'est pas interdit est autorisé (qui laisse tout de même une certaine liberté aux relocalisations), on peut aussi utiliser, dans la même logique, une couche représentant le gisement foncier « réel » en le hiérarchisant. Celui-ci intègre notamment toutes les contraintes d'urbanisme et l'accès aux réseaux techniques (eau, assainissement, etc.). Un terrain constructible situé près des réseaux techniques actuels sera alors mieux considéré qu'un autre terrain constructible, mais éloigné des raccordements. Bien entendu cela réduit encore les possibilités de relocalisation et conduit à concentrer encore davantage les populations dans quelques cellules lorsque les PIS sont élevés. Une telle analyse est en cours en partenariat avec l'Agence d'Urbanisme d'Avignon pour l'élaboration du plan local d'habitat de la Communauté de Communes des Pays de Rhône et Ouvèze. L'objectif étant de voir, sur la base d'un travail d'identification du gisement foncier réalisé préalablement par un bureau d'études, quelles sont les localisations à privilégier pour le développement de l'habitat à l'intérieur de ce gisement.

3.4. La densité locale

La densité est une mesure très importante en termes d'urbanisme. Caricaturalement, d'un côté les individus la fuient afin d'éviter « la tyrannie d'autrui » (c'est un des ressorts de l'installation en périurbain), de l'autre les urbanistes aménageurs la recherchent afin d'éviter trop d'étalement urbain, de consommation foncière et d'extension des réseaux techniques. Les figures ci-dessous permettent d'illustrer l'impact de la densité sur les vitesses requises pour un PIS de 50 000, des taux de relocalisation variables et en tenant compte ou pas de constructibilité des terrains. Logiquement plus le seuil accepté de densité est élevé, et plus les taux de relocalisation sont forts, plus cela laisse de marge de manœuvre au logiciel pour relocaliser les aménités et donc plus les vitesses nécessaires sont faibles. En effet, plus on refuse une forte densité locale (ici dans un rayon de 1 000 m), plus les aménités (ici population) seront dispersées et par conséquent plus il est nécessaire d'aller vite pour satisfaire les contraintes d'accessibilité. Dans la même logique que celle du modèle de Sheilling sur la ségrégation socio-spatiale qui montre que la ségrégation est d'autant plus forte que l'on accepte peu de voisins différents de nous-même, on peut voir ici ce que le refus de la densité « coûte » à niveau d'accessibilité donné en termes de vitesses.

Par exemple, on a pu voir que pour un PIS de 50 000 ne pas tolérer en aucun lieu une densité locale > 615 hab/km² nécessite d'aller plus de 10 km/h plus vite que si on n'intègre pas la contrainte de densité.

Précisons que plus les PIS exigés sont élevés plus l'impact de la densité maximum sur les vitesses sera important.

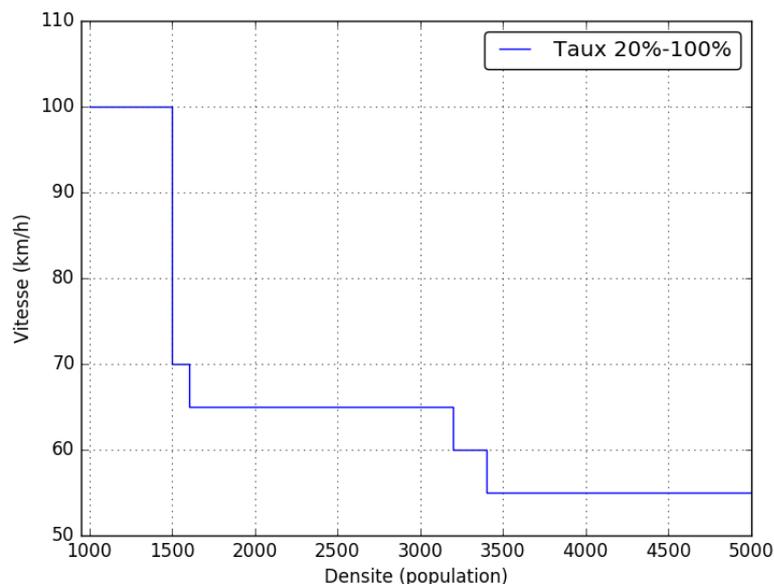


Figure 20 *Évolution de la vitesse en fonction de la densité, avec un fort taux de relocalisation, un PIS de 50 000 et en prenant en compte la constructibilité des terrains*

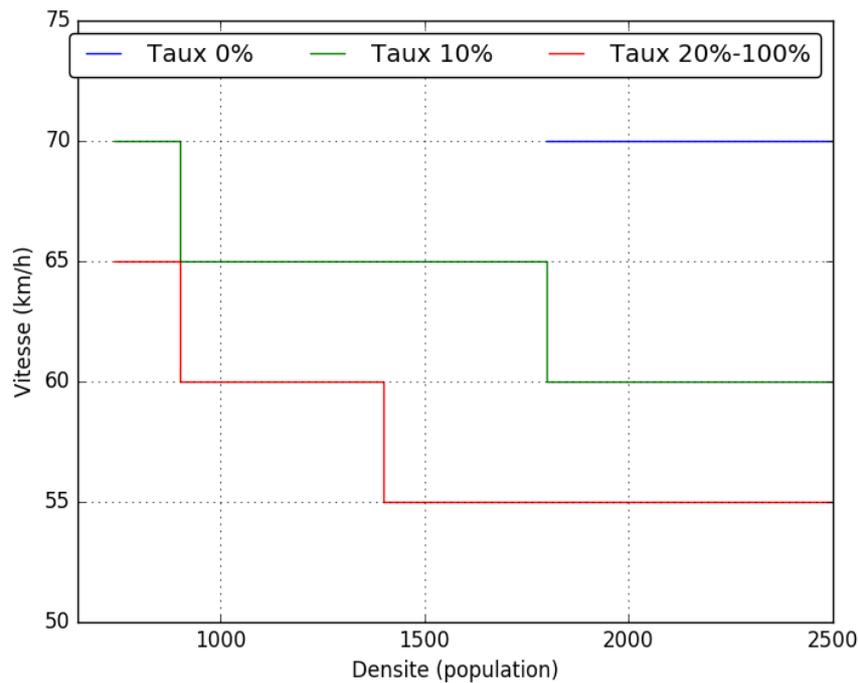


Figure 21 *Évolution de la vitesse en fonction de la densité et du taux de relocalisation (pas de prise en compte de la constructibilité)*

Cette possibilité d'analyser l'effet de la densité locale, calculée à l'échelle souhaitée (et pas seulement à l'échelle de la parcelle ou de l'opération immobilière comme c'est l'usage) sur la vitesse et sur les (re)localisations pour satisfaire toutes les contraintes a été particulièrement valorisée par les aménageurs lors de leurs tests du logiciel.

3.5. La compacité

La compacité correspond pour chaque cellule à la part de la surface au sol qui peut être construite (emprise au sol du bâti, quelle que soit sa nature). Les figures ci-dessous, permettent d'illustrer son effet sur la vitesse. Avec des PIS de 40 et 70 mille, en tenant compte de la constructibilité des terrains, avec une densité locale maximale de 2 000 hab/km² et des taux de relocalisation de 20%, on peut voir que l'effet de la compacité est relativement modeste. Tout juste observe-t-on des seuils de compacité (variable selon le PIS) au-dessus desquels la vitesse peut diminuer. Cet effet limité de la contrainte de compacité s'explique par la relative faible densité de la zone d'étude. Il en irait sans doute tout autrement pour une simulation en milieu urbain plus dense.

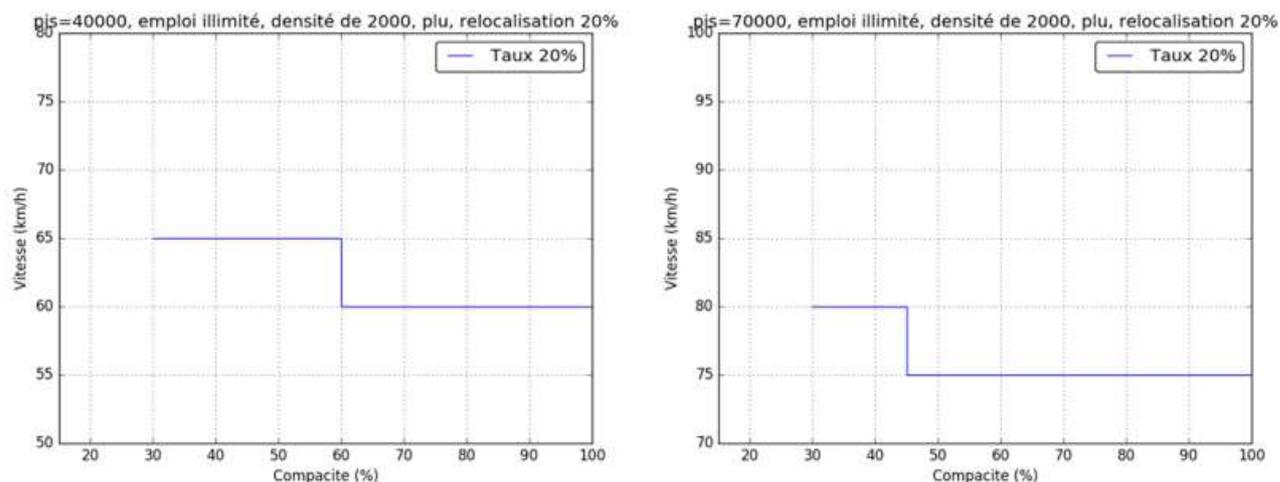


Figure 22 Effet de la compacité sur les vitesses pour des PIS de 40 et 70 mille

3.6. L'accessibilité à l'emploi : un critère primordial

Les simulations réalisées pour le PIS se font de la même façon en considérant d'autres types d'activité. Si on ne considère par exemple que la question de l'accessibilité à l'emploi, on retrouve la même logique que précédemment à savoir plus les niveaux d'accessibilité requis sont importants plus les vitesses vont être élevées, mais avec l'existence d'effet de seuil.

Prise en compte de plusieurs activités

Jusqu'à présent, nous avons considéré les « activités » une à une. Si on ajoute à présent au PIS le critère d'accessibilité à l'emploi (donc en considérant deux activités simultanément), on peut voir, pour la zone d'étude, qu'au-delà du seuil de 20 000 emplois accessibles en 15 minutes, les vitesses requises augmentent sensiblement. Cet effet de l'accessibilité à l'emploi est d'autant plus fort que les PIS sont faibles. En effet, pour des PIS élevés les vitesses requises étant déjà élevées, elles permettent de satisfaire dans le même temps les exigences en termes d'accessibilité à l'emploi.

Accessibilité à l'emploi	Vitesse requise pour un PIS de 60	Vitesse requise pour un PIS de 70
0	40	50
15	40	50
30	50	50
45	60	60

Compacité 70 %. Toutes les cellules sont constructibles.
Pas de contrainte de densité

Figure 23 Vitesses requises pour différents seuils de PIS et d'accessibilité à l'emploi

Sur la figure ci-dessous on peut voir l'effet combiné des valeurs requises pour l'accessibilité à l'emploi et des taux de relocalisation. Plus ces taux sont faibles et les accessibilités à l'emploi et à la population élevées, plus les vitesses seront élevées. Comme précédemment, le seuil de relocalisation nécessaire pour permettre de bonnes optimisations, se situe entre 10 et 20%.

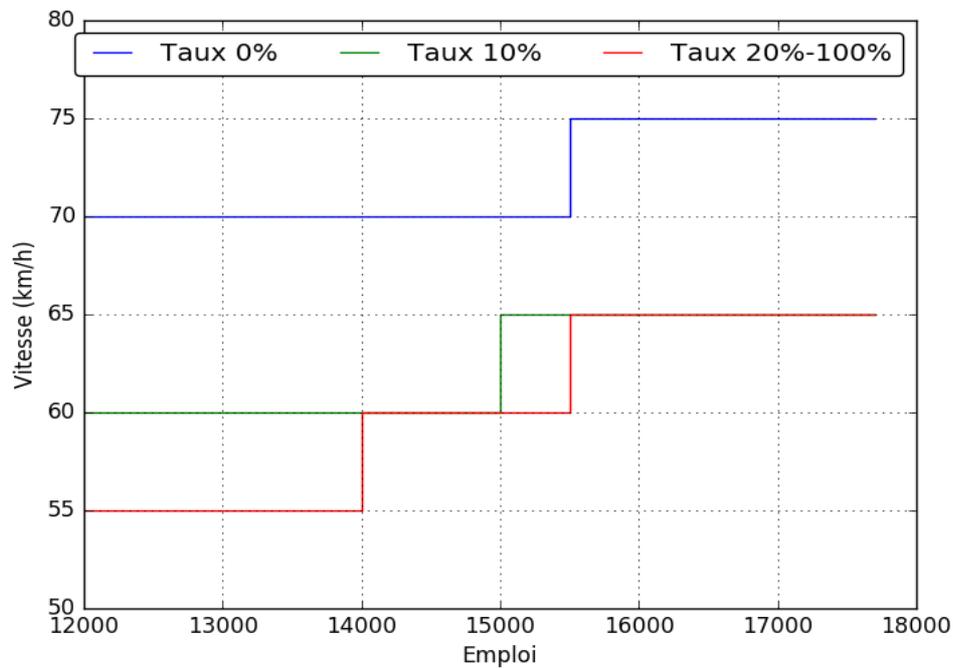


Figure 24 *Évolution de la vitesse en fonction de l'accessibilité à l'emploi, et du pourcentage de relocalisation pour un PIS de 50 000*

Spatialement, on observe que le modèle tend à disperser les emplois (initialement concentrés dans la zone centrale autour de Carpentras).

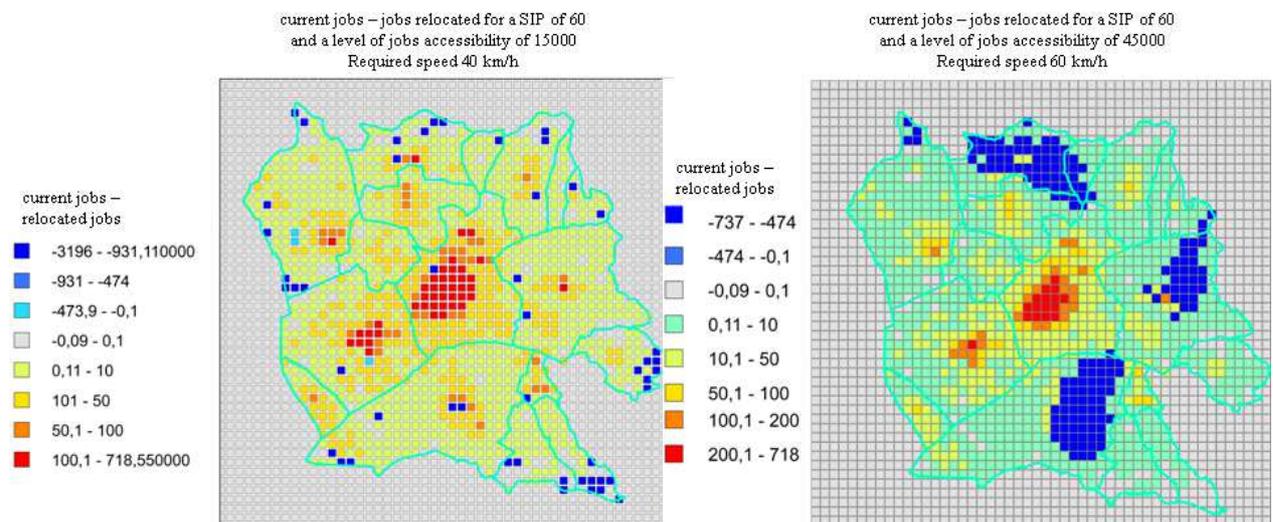


Figure 25 *Vitesses requises pour un PIS de 60 000 et différents seuils d'accessibilité à l'emploi*

Le travail présenté ci-dessus pour les deux activités population et emplois peut être conduit de la même manière avec n activités, le modèle étant suffisamment générique pour inclure cette possibilité. Il faut toutefois veuille à ne pas utiliser « trop d'activités » :

- au risque de ne plus être en mesure de mesurer le poids de chaque contrainte sur le résultat (si cette question intéresse l'utilisateur),
- car l'ajout inconsidéré de contraintes allonge les temps de simulation.

3.7. Quand il n'est pas possible de tout avoir...

Pour les analyses présentées jusqu'ici, il a toujours été possible de trouver une configuration spatiale et une vitesse permettant de vérifier les contraintes fixées. Ce n'est toutefois pas toujours le cas. Par exemple, si l'on souhaite simultanément avoir de hauts niveaux d'accessibilité à la population et à l'emploi, limiter les zones constructibles et les densités locales, etc., alors il est parfois possible qu'aucune solution n'existe avec des vitesses de déplacement raisonnables. En substance, « on ne peut pas tout avoir » même en recourant aux méthodes d'optimisations les plus poussées.

PIS	Accessibilité à l'emploi	Vitesse requise si toutes les cellules sont constructibles	Vitesse requise en prenant en compte la constructibilité
30	0	30	60
30	15	30	60
30	30	50	120
30	45	60	>120!
60	0	40	70
60	15	40	70
60	30	50	120
60	45	60	>120!

Figure 26 Vitesses requises pour une combinaison de critères

Par exemple, pour un PIS de 60, une accessibilité à l'emploi de 45 000 en limitant la compacité à 70% et la constructibilité des terrains alors la vitesse requise pour satisfaire tous les critères serait supérieure à 120 km/h !

On voit ici que la planification dans une perspective de durabilité est aussi (beaucoup) une question de choix et qu'il n'est pas toujours possible, même théoriquement, de souscrire totalement à toutes les exigences. *Optidens* permet donc de voir ce qui est possible ou pas.

Dans une logique participative, il peut aider à la concertation en permettant que chaque acteur (citoyen par exemple) ait conscience de l'impact de ses exigences, ce qui peut conduire à l'élaboration plus aisée de compromis.

3.8. L'utilisation d'*Optidens* pour construire une ville de la proximité pédestre

Le modèle d'*Optidens* est suffisamment générique pour permettre des usages qui n'ont pas été planifiés au départ. Par exemple, supposons que l'on veuille savoir où localiser des commerces (boulangerie, épicerie) et services de proximité (poste, administration, etc.) de

façon à satisfaire des niveaux d'accessibilité à pied (pour construire une ville « pédestre »). Il suffit alors de fixer les niveaux d'accessibilité pour chaque activité pour la marche (*i.e.* on veut que pour chaque point de mesure x commerces de proximité soient à moins de 800 mètres à pied et/ou tel niveau de PIS) et d'utiliser une matrice des distances pédestres plutôt qu'automobile (elle ne tiendrait par exemple pas compte des sens uniques). Le modèle fonctionne alors de la même façon.

Dans la même logique, on peut utiliser une matrice de distance en Transport en Commun. L'accessibilité est alors calculée en fonction des TC uniquement.

Enfin, il est possible de mixer les modes de transport. Par exemple supposons que sur certaines origines-destinations les trajets en transport en commun ou à vélo soient plus rapides que ceux en voiture. On peut alors chercher les relocalisations qui vont permettre de satisfaire toutes les contraintes sur la base de la matrice des plus courts chemins entre points de mesure qui donne pour chaque OD le temps le plus rapide, quel que soit le mode utilisé, et pas seulement les temps en voiture. Dans ce cas on ne cherche plus la vitesse minimum en voiture permettant de satisfaire les contraintes. Les temps de trajets sont considérés comme donnés, et on cherche si les contraintes peuvent être satisfaites grâce aux seules relocalisations, à temps de trajet donné.

4. Le modèle *Optidens* : perspectives à court et moyen terme

4.1. Intégrer les contiguïtés entre types d'occupation du sol

- à l'échelle intercellule

Dans la version d'*Optidens* présentée ci-dessus, les relocalisations se font à l'échelle de la cellule, sans que l'on se soucie des contiguïtés entre cellules. Ainsi, une cellule concentrant de l'habitat peut être placée en plein cœur d'une zone « verte » pour autant qu'elle soit constructible. Or, tenir compte des contiguïtés entre cellules paraît important, en particulier dans une perspective de préservation de la biodiversité. En effet, depuis les lois issues du Grenelle de l'environnement, et plus spécifiquement les réglementations liées à la Trame Verte et Bleue, les aménageurs doivent s'efforcer de préserver les continuités écologiques, notamment pour faciliter les déplacements de la faune et sa reproduction dans de bonnes conditions. Par ailleurs, éviter la dispersion du bâti, même si elle peut le cas échéant être optimale du point de vue de l'accessibilité et du refus de densité, est également important afin de réduire les coûts afférents, liés en particulier à l'allongement des réseaux techniques (eau, assainissement, collecte des déchets, etc.) tout en assurant la possibilité de mise en place de service de transport public dans de meilleures conditions financières.

L'ajout d'une contrainte liée à la contiguïté entre les cellules est donc venu s'ajouter au modèle d'origine, notamment sous la recommandation des opérationnels à qui le modèle a été présenté. Cette contrainte vise donc à préserver autant que faire se peut la continuité de l'espace non bâti. Le modèle théorique est d'ores et déjà développé (cf ci-dessous), l'implantation (codage) dans le modèle est réalisé mais cette possibilité n'a pas encore été intégré à l'interface du logiciel.

Enrichissement du modèle pour prendre en compte les contiguïtés intercellules.

La méthode pour imposer autant que faire se peut les contiguïtés des activités pourrait consister à examiner la connectivité entre chaque paire de cellules (Carvajal *et al.*, 2013). Le problème est qu'avec cette solution le temps de résolution n'est plus raisonnable. Aussi, notre solution consiste à utiliser l'heuristique suivante :

1. Résoudre le problème sans les contraintes de connectivité
2. Détecter les composantes connexes à partir des solutions et vérifier si le nombre des composantes connexes est satisfaisant pour le planificateur. Arrêter alors la résolution, sinon passer au point suivant
3. Introduire les contraintes de connectivité pour chaque paire des composantes connexes entre les cellules les plus proches
4. Résoudre le problème à nouveau et voir (2)

En termes de résultat il est intéressant de noter que si l'introduction de la contrainte de contiguïté entre les espaces « verts » et/ou les zones bâties augmente de façon importante les temps de résolution et impacte fortement les formes obtenues, mais qu'elle ne modifie en revanche pas les vitesses requises pour trouver une solution (au moins pour les jeux de contraintes testées). Tout se passe donc comme si pour un jeu donné de contraintes le logiciel trouve la vitesse minimale puis il choisit parmi toutes les configurations spatiales possibles une de celle qui permette de vérifier la contrainte de contiguïté.

- à l'échelle infracellule

Cette question des contiguïtés à l'échelle des cellules, se pose également à l'échelle infracellule. En effet, le modèle *Optidens* actuel permet de dire ce qu'il convient de localiser dans une cellule (emplois, population, commerces), en respectant notamment la contrainte de compacité (emprise au sol du bâti par rapport à la surface totale de la cellule), mais il ne précise pas comment « placer les éléments ». Or, il est aussi important de savoir comment, pour une compacité donnée, il convient d'agencer les surfaces bâties et non bâties pour, par exemple, maximiser l'accès direct des bâtiments aux espaces verts, assurer la meilleure ventilation possible des îlots urbains, éviter les ombres portées entre bâtiments, etc. On est donc plus ici à l'échelle architecturale qu'à l'échelle plus globale des documents de planification.

4.2. La temporalité de l'optimisation

Le modèle *Optidens* a été conçu pour l'aide à la décision en matière de planification, typiquement pour la réalisation des Schémas de Cohérence Territoriaux ou même encore davantage travailler à l'échelle des inter-SCOT. Or, si l'élaboration de ces documents stratégiques est longue (et *Optidens* est un outil qui peut aider à la concertation dans cette phase en montrant les tenants et aboutissants de telle ou telle contrainte exigée par tel ou tel acteur), leur mise en place l'est encore davantage. Ainsi, la planification se fait à 15-20 ans. Avec *Optidens*, l'utilisateur fixe l'intensité de la dynamique urbaine pour un terme temporel donné (part du tissu urbain actuel qui va potentiellement se reformater et ajout de population et emplois) puis le logiciel trouve les localisations optimales eu égard aux contraintes posées. Le « problème » est que la solution optimale est trouvée à terme (pour dans 15 ans par exemple), mais rien ne dit comment arriver à cette solution optimale pas à pas. La question que nous nous sommes posée est donc de savoir comment « phaser » l'optimisation, pour que chaque étape intermédiaire soit la plus optimale ainsi que la solution finale. Il est en effet difficile de dire aux citoyens, chaque situation intermédiaire n'est pas bonne, mais patientez 15 ans, car la situation finale issue de l'assemblage des situations intermédiaires sera optimale

(même si de fait cette question n'est jamais posée dans la réalisation des SCOT qui se font pas à pas, au gré des opportunités foncières notamment).

Des travaux sont donc en cours (notamment dans le cadre de la thèse d'informatique de Alena Melnikava) pour traiter cette question, qui du point de vue conceptuel n'est pas triviale. À terme, nous souhaitons donc être capable de dire : pour dans 15 ans voici la solution optimale et voici le phasage pour y parvenir de façon à ce que chaque situation intermédiaire soit elle-même la plus optimale possible et donc la plus acceptable.

4.3. Quels impacts des optimisations réalisées sur le fonctionnement urbain, en particulier en termes de transport ?

Dans *Optidens*, la ville est fondamentalement envisagée comme un potentiel d'accessibilité (à la population, à l'emploi, aux commerces et services). Elle doit permettre aux individus de vivre en se dégageant le plus possible de la voiture, puisque l'accessibilité (qualité fondamentale de la ville) n'est pas assise sur la seule vitesse automobile. La forme obtenue se veut donc résiliente, par exemple en termes d'accès au marché du travail. On ne sait pas précisément qui va travailler où, mais on fait en sorte qu'en chaque lieu le potentiel d'emplois accessibles soit de x , ce qui constitue une « assurance » pour les individus. En effet, un individu localisé en i et travaillant en j et qui perdrait son travail, sait qu'il a potentiellement x emplois accessibles, ce qui peut lui éviter de devoir déménager ou changer de mode de transport pour aller chercher un travail plus loin.

Dans *Optidens*, on ne s'intéresse donc pas aux pratiques spatio-temporelles réelles des individus (qui va où, pour faire quoi, quand, comment ?) ce qui nécessite des bases de données très précises sur les pratiques spatiales des habitants, données qu'il est difficile d'avoir pour l'immédiat et qui, bien entendu, n'existent pas pour le futur.

Toutefois, au-delà du concept de ville comme potentiel d'accessibilité le plus indépendant possible du recours à la vitesse automobile, il semble pertinent de chercher à évaluer, notamment en termes de pratiques spatiales et de transport, les formes obtenues par *Optidens*. Avec les formes obtenues, qui va aller où avec quels impacts sur les pratiques modales par exemple ?

Dans cette perspective, mais aussi pour traiter des questions des contiguïtés inter et intra cellules et du phasage de l'optimisation, nous avons déposé en juin 2016 un projet de recherche européen (ERA-NET Cofund Smart Urban Futures) avec une équipe d'architectes-urbanistes de « l'University of Technology » de Wroclaw (Pologne) et de géographes – aménageurs de « l'University of Technologies » d'Eindhoven (Pays-Bas). Les architectes, en lien avec l'équipe d'optimisation du laboratoire d'informatique d'Avignon, travailleront sur la question des contiguïtés intracellule (celle des contiguïtés intercellule étant presque résolue),

alors que l'équipe de Harris Timmermans d'Eindhoven travaillera sur l'évaluation des formes produites par *Optidens* en couplant le modèle avec leur modèle Albatross. Ce modèle multi-agents, de renommée mondiale, est dérivé de la théorie des choix heuristiques qu'appliquent les individus quand ils prennent des décisions dans un environnement complexe. Le modèle permet ainsi de prédire quelle activité va être réalisée, pendant combien de temps, par qui, avec quel mode de transport. Il s'agira donc de prendre comme point de départ les formes obtenues par *Optidens*, pour les évaluer via Albatross en termes de pratiques de mobilité (partage modal, distances parcourues, etc.) ainsi qu'en termes de ségrégation socio-spatiale et d'équité dans l'accès aux ressources urbaines. En retour, les résultats de l'évaluation via Albatross peuvent conduire à intégrer de nouvelles contraintes dans le modèle *Optidens*.

Cette première tentative de financement européen n'a pas été un succès mais l'élaboration du projet de recherche a permis de faire émerger d'intéressantes possibilités de coopération, notamment avec Eindhoven, et un nouveau dépôt de projet mobilisant Optidens sera réalisé en 2017.

5. Valorisation

La valorisation des travaux réalisés dans le cadre du projet *Optidens*, s'est faite à travers une thèse, des articles et participations à des colloques.

5.1. Publication et communications

Thèse

Les travaux réalisés dans le cadre d'Optidens constituent une part importante de la thèse d'Alena Melnikava (soutenance décembre 2016) « Optimization methods for density of human activity in the perspective of a sustainable urban form », direction C. Genre-Grandpierre, P. Michelon.

Articles dans un livre

Balac M., Ciari F., Genre-Grandpierre C., Voituret F., Gueye S., Michelon P. (à paraître). « Decoupling accessibility and automobile mobility in urban areas », in Fremont A., Vancluysen K. (dir), *Urban Mobility and Public Transports*, Wiley/ISTE

Articles dans des revues à comité de lecture

Melnikava H., Bouchet S., Michelon P., Genre-Grandpierre C. 2016 (en révision) : Sustainable urban planning model with accessibility constraints, *European Journal of Operational Research*

Genre-Grandpierre C., Melnikava H., Michelon P., 2016. « *Optidens* : un modèle de simulation pour explorer les conditions de possibilité d'une ville lente, mais accessible », *Transports*, n° 495, janvier-février 2016, pp. 36-43

Actes de colloques avec comité de lecture

Genre-Grandpierre C., Melnikava H., Michelon P., 2016. “*OPTIDENS* : a simulation model to explore the sustainable forms of accessibility for the urban territories”, Conference AGILE, Helsinki 15-17 juin 2016

Participation à des colloques

Melnikava A., Genre-Grandpierre C., Michelon P., 2016. “Urban-Planning MIP Model With Connectivity Constraints”, 28th European Conference on Operational Research, 3-6 juillet, Poznan, Pologne

Genre-Grandpierre C., Melnikava A., Michelon P., 2015. « *OPTIDENS* : Un modèle de simulation pour explorer les combinaisons souhaitables densité de population - vitesse des déplacements pour des villes plus durables », 52^{ème} colloque de l'ASRDLF, Montpellier 7-9 juillet 2015

Melnikava A., Michelon P., Genre-Grandpierre C., Gueye S., 2014. “Optimizing urban life for a sustainable city”, Proceedings of OPT-i International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Kos Island, 4-6 June, Greece

Melnikava A., Michelon P., Genre-Grandpierre C., Gueye S., 2014. « Optimisation de la vie urbaine pour une ville plus durable », 15^{ème} congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision (ROADEF), Bordeaux 26-28 février 2014

5.2. La valorisation du logiciel

La valorisation se fait aussi (et va continuer à se faire) à travers le logiciel Optidens qui est encore dans une phase d'évolution, mais qui est d'ores et déjà opérationnel :

- Optidens a été présélectionné pour participer au salon Innovatives SHS 2017 à Marseille (<http://innovatives.cnrs.fr/presentation/actualites/article/appel-a-projets-pour-le-salon-innovatives-shs-2017-17-18-mai-2017-marseille>), qui est opération d'envergure nationale organisée par le CNRS pour la valorisation et le transfert des recherches en SHS vers le monde professionnel (ici bureau d'étude, aménageur, élu etc.).
- A court terme et pratiquement, le logiciel va être mobilisé dans le cadre de l'atelier professionnel du master professionnel Géomatique et Conduite de Projets Territoriaux 2016-2017 qui va travailler pour le compte de la mairie d'Avignon sur la révision de son PLU. Dans ce contexte Optidens sera plus particulièrement utilisé pour travailler sur la

question de la densification en permettant d'identifier sous contraintes les lieux les plus propices à cette densification.

- Enfin, pour une évaluation et évolution sur la plus longue durée, le logiciel est en cours de test chez deux partenaires du projet :
 - o à l'Agence d'Urbanisme d'Avignon où les résultats des travaux réalisés avec les méthodes « traditionnelles » pour l'élaboration du PLH de la Communauté de Communes des Pays de Rhône et Ouvèze vont être comparés avec ceux fournis par Optidens. E travail va être effectué dans le cadre d'un mémoire de master 1 de géographie de l'Université d'Avignon.
 - o dans le bureau d'étude Citadia- Avignon pour l'élaboration de PLU. Il s'agit notamment de mesurer l'apport d'Optidens en comparant les résultats obtenus avec ceux obtenus par les pratiques actuelles du cabinet.

Dans les deux cas il s'agit d'évaluer le degré d'opérationnalité d'Optidens par rapport à la pratique d'organismes professionnels aux perspectives différentes. D'ores et déjà les échanges ont permis de voir qu'Optidens est « trop compliqué », à savoir notamment que la notion de PIS et son lien avec la vitesse reste difficile à saisir. En revanche, une utilisation en mode « dégradé » et/ou détourné du logiciel rencontre un grand intérêt. En substance, les utilisateurs chargent les terrains possibles pour l'urbanisation, ils précisent leur contraintes (globales ou locales, par exemple le niveau de densité à ne pas dépasser en chaque lieu), ils considèrent que les vitesses sont les vitesses actuelles (c'est en cela que l'on peut parler de mode dégradé d'utilisation, car le logiciel est bâti pour travailler sur le lien forme urbaine-vitesse) et le logiciel trouve les (re)distribution d'habitat ou population à opérer pour vérifier les contraintes. Le logiciel est donc ici plus utilisé pour optimiser les pratiques actuelles des aménageurs (savoir où densifier) que pour les bouleverser fondamentalement en travaillant d'emblée sur le lien forme urbaine-vitesse. Précisons, que ces constats issus des premiers tests ne constituent pas une remise en cause d'Optidens, mais ils montrent que l'appropriation d'un tel outil, de haut niveau conceptuel, ne peut se faire que graduellement, en débutant avec une utilisation « simple » avant d'aller plus loin dans les possibilités du logiciel.

6. Conclusion

L'accessibilité est faite de vitesse, mais aussi de localisations comme on a trop eu tendance à l'oublier, fort de la certitude que de bonnes conditions de circulation, avec de hautes vitesses, permettraient d'offrir de l'accessibilité en tout lieu. Si on s'accorde sur le fait que bâtir l'accessibilité sur le seul recours à la vitesse automobile n'est pas souhaitable dans une perspective de durabilité, eu égard aux externalités négatives de l'usage de voiture, il paraît nécessaire de s'intéresser, à nouveau, à la question des localisations.

Quand elle est abordée, cette question l'est le plus souvent en cherchant à simuler les effets sur les localisations de changements de conditions de transport (ajout d'une route, changement de politique de vitesse, etc., en mobilisant notamment des modèles de simulation type LUTI : Land Use Transport Interaction). L'approche proposée dans la recherche *Optidens*, qui vise à voir à quelles conditions une ville lente et accessible est possible, diffère. Il s'agit en effet de fixer un certain nombre d'exigences, notamment en termes d'accessibilité, de densité maximale, etc. puis de trouver (quand elle existe) la combinaison forme urbaine – vitesse de déplacement automobile minimale permettant de satisfaire ces exigences dans une perspective de limitation de l'émergence du phénomène de dépendance automobile.

Cette capacité de trouver des solutions d'aménagement conciliant des exigences multiples et souvent contradictoires, car émanant d'acteurs aux intérêts divergents, offre de larges perspectives pour l'usage de cet outil dans la perspective d'un aménagement plus participatif. Chacun peut ainsi formuler ces exigences et en voir les tenants et aboutissants sur la forme et le fonctionnement des territoires. Même si mobiliser un public de plus en plus sceptique sur le discours aménagiste sur le thème que « tout n'est pas possible » n'est assurément pas facile, *Optidens* peut néanmoins permettre aux acteurs de voir la nécessité de dépasser leur seule utilité individuelle pour tendre vers une utilité plus collective.

L'outil développé permet donc d'explorer de façon originale la relation urbanisme – transport, et plus spécifiquement les liens entre système de localisations et accessibilité. On ne cherche pas à voir, comme habituellement, comment les politiques de transport peuvent influencer sur les localisations, mais à étudier le processus de co-construction urbanisme – transport. C'est cette possibilité d'envisager simultanément politiques de transport et politiques d'urbanisme qui constitue une des innovations majeures de cette recherche.

La seconde innovation majeure et d'ordre méthodologique. Elle réside dans le fait d'avoir couplé des méthodes issues de disciplines différentes. Étudier quels peuvent être les apports des méthodes d'optimisation issues de la Recherche Opérationnelle pour des problématiques d'aménagement et produire un outil pratique pour l'aménagement constitue aussi une innovation, dont la valorisation, tant du point de vue universitaire qu'opérationnel, est d'ores et déjà importante, et qui devrait s'accroître maintenant que l'outil est, au moins dans sa version bêta, prêt à l'usage.

Si l'utilisation d'*Optidens* permet de savoir, pour un terrain d'étude donné, quelles sont les conséquences sur la forme urbaine et la vitesse de déplacement requise de telle(s) ou telle(s) exigence(s), qu'elle(s) émane(nt) des planificateurs ou des citoyens, les études empiriques

réalisées ne permettent en revanche pas de « généralisations » qui viseraient par exemple à hiérarchiser les critères en fonction de leur impact sur la forme urbaine et les vitesses requises. Certes, on a pu voir que des critères comme l'accessibilité à l'emploi et la limitation de la constructibilité des terrains avaient des impacts importants, mais il reste néanmoins impossible de généraliser. Ce n'est d'ailleurs pas l'objectif d'*Optidens* qui ne prétend pas donner une solution, mais au contraire être un outil exploratoire permettant d'aboutir par un jeu d'essais à des solutions acceptables par tous les acteurs. Chaque terrain d'étude ayant ses caractéristiques propres, le poids des critères et les vitesses obtenues ne peut immanquablement que varier.

Globalement, on a toutefois pu voir que renoncer à la vitesse automobile ne signifie pas nécessairement renoncer à l'accessibilité, vitesse et accessibilité n'étant pas proportionnelles². Voir aussi qu'il est parfois difficile de tout concilier (exigence d'accessibilité versus exigence de faible densité et compacité) et que de ce fait des compromis ou renoncements sont nécessaires si on veut tendre vers une ville plus durable.

Optidens en tant qu'outil exploratoire permet aussi de s'extraire de formes-fonctionnements préconçus de la ville et d'élargir le catalogue des formes urbaines au-delà des « formes franchisées » (Mangin, 2004). En laissant un grand degré de liberté aux simulations, on peut ainsi voir émerger des formes inhabituelles propices à la discussion.

Un dernier point important caractérisant *Optidens* et qu'il permet de ne pas se situer systématiquement dans une logique de croissance. Dans la planification, une des questions posées est « où localiser la population ou les emplois supplémentaires qui vont arriver à une échéance donnée ? ». On se situe donc assez systématiquement dans une logique de croissance. Or avec le vieillissement démographique et localement la décroissance de la population (cf les *shrinking cities*, Wolff *et al.*, 2003), avec un marché du travail incertain, de nombreux territoires se situent (ou vont se situer) davantage dans une logique d'optimisation de l'existant que de croissance. Ici *Optidens* apparaît particulièrement pertinent et original, puisque la logique de relocalisation plus que d'ajouts, fussent-ils optimaux, d'aménités correspond bien à cette logique de croissance atone voir de décroissance.

Si *Optidens* peut d'ores et déjà être mobilisé pour l'aide à la décision, il demeure néanmoins un outil en phase de test. L'appliquer à des terrains différents, à la fois en termes de taille, de structuration et fonctionnement (*i.e.* terrains d'études de plus grande taille, structurés de façon plus polynucléaire, avec un réseau de transport plus hiérarchisé par la vitesse, avec des jeux de données parfois incomplets, etc.) doit permettre de vérifier la robustesse et la portabilité du logiciel.

² Ce poids des localisations dans le calcul de l'accessibilité a aussi été mis en avant dans d'autres travaux utilisant des modélisations différentes cf. DAMA « vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile », rapport PREDIT 2015.)

Comme mentionné dans la partie 4 :

- Intégrer au logiciel la possibilité, déjà codée, d'intégrer des contraintes liées aux contiguïtés, souhaitées ou pas, entre différents types d'utilisation du sol, à la fois à l'échelle de la cellule et entre les cellules,
- trouver un moyen de phaser de façon optimale pour une échéance temporelle donnée le reformatage du territoire,
- et enfin avoir les moyens d'analyser les effets des optimisations réalisées sur le fonctionnement urbain, en particulier en termes de transport,

...constituent les grandes perspectives de développement et d'amélioration de l'outil qui seront creusées par la suite.

Reste enfin à valoriser cet outil au-delà du cadre académique en en assurant la diffusion et l'exploitation. La participation au salon Innovative SHS 2017 en présence de nombreux professionnels devrait à cet égard jouer le rôle de tremplin.

Bibliographie

- Antoni J.P., 2010. *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, 438 p
- Banister D., Watson S., Wood C., 1997. "Sustainable cities: transport, energy and urban form". *Environment and Planning B*, 24, p. 125-145.
- Breheny M.J., 1992. "The contradictions of the compact city. A review", in Breheny M. (dir), *Sustainable Development and Urban Form*, Pion, London.
- Burton E., 2000. "The compact city: just or just compact?" *Urban Studies*, 37 (11), pp. 1969-2001.
- Carvajal R., Constantino M., Goycoolea M., Vielma J.P., Weintraub A., 2013. "Imposing Connectivity Constraints in Forest Planning Models", *Operations Research*, 61(4), 824-836.
- Cavailles J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I., 2004. "Where alonso meets Sierpinski: an urban economic model of fractal metropolitan area", *Environment and planning A*, n°36, pp. 550-578.
- Dureau F., Lévy J.P., 2010. « Morphologie urbaine et consommations énergétiques : un éclairage à partir de la recherche française », in *Ecologies Urbaines* (Coutard O., Lévy J.P. dir.), coll. Villes, Economica. 371 p.
- Dupuy G., 1999. *La dépendance automobile*. Paris, Economica, 161 p.
- Camagni R., Gibeli M.C., 1997. *Développement urbain durable : quatre métropoles européennes à l'épreuve*, Paris, éd. de l'Aube, 174 p.
- Frankhauser P., Genre-Grandpierre C., 1998. « La géométrie fractale un nouvel outil pour évaluer le rôle de la morphologie des réseaux de transport public dans l'organisation spatiale des agglomérations », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 33, pp. 41-79.
- Genre-Grandpierre C., Perrussel-Morin D., 2008. « La ville comme potentiel d'interactions sociales », in Foltête J.-C. (dir.), *Actes des Huitièmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon. ISSN 1769-6895. Article mis en ligne le 5 mai 2008.
- Genre-Grandpierre C. 2007. « Des réseaux lents contre la dépendance automobile ? Concept et implications en milieu urbain », *l'Espace Géographique*, n°1.
- Genre-Grandpierre C., 2009. « Des réseaux lents contre la dépendance automobile », Rapport PREDIT, Groupe 1 : Mobilité, Territoires et Développement Durable.
- Genre-Grandpierre C., 2013. « La structure morpho-fonctionnelle des réseaux routiers : un levier d'action majeur pour une mobilité durable », in Brun G. (dir) *Ville et Mobilité. Nouveaux regards*, Coll. « Méthodes et Approches », Economica, Paris.
- Gueye S., Michelon P., 2005. "Miniaturized Linearizations for 0/1 Quadratic Problems", *Annals of Operations Research*, v. 40, n. 1, p. 235-262
- Gueye S., Michelon P., 2009. "A Linearization Framework for Unconstrained Quadratic (0-1) Problems", *Discrete Applied Mathematics*, 157(6), 1255-1266
- Huriot J.-M. (dir), 1998. *La ville ou la proximité organisée*, Economica, Paris.

- Joly I., 2005. « Décomposition de l'hypothèse de constance des budgets temps de transport », in *Mobilités et temporalités*, Montulet B *et al.* (dir), Facultés Universitaires Saint Louis, Bruxelles, pp. 129-150
- Koopmans T.C., Beckmann M.J., 1957. « Assignment problems and the location of economic activities », *Econometrica*, 25: pp. 53-76.
- Marshall A., 1890. *Principles of Economics*, 8th Edition, 1966, Macmillan, London
- Mangin D., 2004. *Infrastructures et formes de la ville contemporaine. La ville franchisée*, coll. Dossiers du Certu, La documentation française, 398 p.
- Newman P., Kenworthy J. 1989. *Cities and Automobile Dependence, an international Sourcebook*, Gower, Aldershot.
- Nicolas J.P., Pochet P., Poimboeuf H., 2001. *Indicateurs de mobilité durable. Application à l'agglomération de Lyon*, APDD - LET
- Piron O., 2003. *Renouvellement urbain, Analyse systémique*, METLTM, Puca, Coll. Recherches n°141.
- Pumain D., Moriconi-Ebrard F., 1997. "City size distribution and metropolisation", *Geojournal*, 43(4), 307-314.
- Prud'homme R., Lee C. 1999. "Size, sprawl, speed and the efficiency of cities", *Urban Studies*, 36(11), pp.1849-58
- Rodrigués C. D., Quadri D. Michelon P., Gueye S., 2012. "0-1 Quadratic Knapsack Problems: an exact approach based on a $\$$ -linearization SIAM", *Journal on Optimization*, v. 22, p. 1449-1468
- Simmonds D., Echenique M., Bates J. *et al.*, 1999. *Review of Land-Use/Transport Interaction Models*, Department of the Environment, Transport and the Regions, London, 72 p.
- Wiel M. 2002. *Ville et automobile*. Paris, Descartes et Cie, Coll. « Les Urbanités », 140 p.
- Wolff M., Fol S., Roth H., Cunningham-Sabot E., 2013. « *Shrinking Cities*, villes en décroissance : une mesure du phénomène en France », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 661, mis en ligne le 08 décembre 2013
- Zahavi Y., Talvitie A., 1980. Regularities in Travel Time and Money Expenditure, *Transportation Research Record*, 750, 13-19.

Table des matières

Objectifs du projet « Optidens : Optimiser la répartition des densités de population pour des villes plus durables ».....	6
1.1. La ville contemporaine : un potentiel d'interactions sociales construit sur la base de la mobilité automobile	6
1.2. La vitesse automobile, au cœur du fonctionnement urbain, remise en cause	8
1.3. Quelles alternatives au potentiel d'interactions sociales basé sur la vitesse automobile ? .	9
1.4. Une forme urbaine en perpétuelle mutation.....	9
1.5. <i>OPTIDENS</i> : un modèle de simulation pour trouver des formes urbaines permettant de répondre à des exigences, parfois contradictoires, de différentes catégories d'acteurs	12
2. <i>Optidens</i> : modèle et solution informatique.....	15
2.1. La logique du modèle <i>Optidens</i>	15
2.1.1. Les données d'entrée	15
2.1.2. Les attentes de l'utilisateur	16
2.1.3. La fonction d'objectif	18
2.1.4. La (re)localisation de la population, des emplois et autres aménités.....	19
2.2. Le modèle <i>Optidens</i>	20
2.3. Le logiciel <i>Optidens</i>	30
2.3.1. Les données et paramètres nécessaires pour les simulations	30
2.3.2. la visualisation des données et résultats.....	35
3. Illustrations des possibilités d' <i>OPTIDENS</i>	39
3.1. La zone d'étude.....	39
3.2. Plus l'accessibilité à la population (PIS) souhaitée est forte, plus la vitesse des déplacements doit être élevée, mais sans proportionnalité	40
3.3. Constructibilité des terrains et vitesse.....	44
3.4. La densité locale	47
3.5. La compacité.....	48
3.6. L'accessibilité à l'emploi : un critère primordial.....	49
3.7. Quand il n'est pas possible de tout avoir... ..	51
3.8. L'utilisation d' <i>Optidens</i> pour construire une ville de la proximité pédestre	51
4. Le modèle <i>Optidens</i> : perspectives à court et moyen terme	53
4.1. Intégrer les contiguïtés entre types d'occupation du sol.....	53
4.2. La temporalité de l'optimisation.....	54
4.3. Quels impacts des optimisations réalisées sur le fonctionnement urbain, en particulier en termes de transport ?.....	55

5.	Valorisation.....	56
5.1.	Publication et communications	56
5.2.	La valorisation du logiciel	57
6.	Conclusion	59
	Bibliographie	57
	Tables des matières	60
	Tables des figures.....	62

Table des figures

Figure 1	Réutilisation du réseau viaire après le tsunami de Tohoku (Japon, 2011).....	10
Figure 2	Fenêtre d'Optidens 1.....	31
Figure 3	Fenêtre d'Optidens 2.....	31
Figure 4	Fenêtre d'Optidens 3.....	32
Figure 5	Fenêtre d'Optidens 4.....	33
Figure 6	Fenêtre d'Optidens 5.....	35
Figure 7	Fenêtre d'Optidens 6.....	35
Figure 8	Fenêtre d'Optidens 7 : la visualisation.....	36
Figure 9	Fenêtre d'Optidens 8 : les résultats.....	36
Figure 10	Fenêtre d'Optidens 9 : la cartographie des résultats.....	37
Figure 11	Fenêtre d'Optidens 10 : l'export de cartes.....	37
Figure 12	Fenêtre d'Optidens 11 : affichage des vitesses pour chaque point de mesure avant (T0) et après relocalisation (T1).....	38
Figure 13	zone de collecte des données (à gauche) et zone de relocalisation (en bleu à droite).....	39
Figure 14	Évolution de la vitesse en fonction du PIS et du taux de relocalisation.....	41
Figure 15	Réallocation de la population pour un PIS de 70 000.....	42
Figure 16	Simulation avec des PIS différents localement : population d'origine, valeurs locales du PIS, différence entre population d'origine et population après relocalisation.....	43
Figure 17	La constructibilité des terrains.....	44
Figure 18	PIS et vitesse requise en prenant en compte la constructibilité des terrains.....	45
Figure 19	Ajout de population par cellule pour un PIS de 70000 sans limite de compacité ni de population par cellule. Vitesse requise : 70 km/h.....	46
Figure 20	Évolution de la vitesse en fonction de la densité, avec un fort taux de relocalisation, un PIS de 50 000 et en prenant en compte la constructibilité des terrains.....	47
Figure 21	Évolution de la vitesse en fonction de la densité et du taux de relocalisation (pas de prise en compte de la constructibilité).....	48
Figure 22	Effet de la compacité sur les vitesses pour des PIS de 40 et 70 mille.....	49
Figure 23	Vitesses requises pour différents seuils de PIS et d'accessibilité à l'emploi.....	49
Figure 24	Évolution de la vitesse en fonction de l'accessibilité à l'emploi, et du pourcentage de relocalisation pour un PIS de 50 000.....	50
Figure 25	Vitesses requises pour un PIS de 60 000 et différents seuils d'accessibilité à l'emploi.....	50
Figure 26	Vitesses requises pour une combinaison de critères.....	51