

## La recherche locale pour la pré-programmation d'environnements urbains durables

BELIN, Bruno  
Mél : bruno.belin@univ-nantes.fr

**Résumé :** L'un des grands enjeux des politiques urbaines actuelles réside dans la conception de villes nouvelles durables basée sur une approche systémique. Cette approche systémique consiste à intégrer simultanément les contraintes issues des différentes problématiques urbaines (transports, taux d'emploi, équipements, étalement urbain, mixité, etc.). Ces problématiques sont naturellement exprimées par les urbanistes sous une forme déclarative. En s'appuyant sur un modèle urbain utilisé lors de la phase préparatoire de conception (pré-programmation urbaine), nous proposons d'exprimer ces problématiques comme des contraintes et de les intégrer au sein d'un outil d'aide à la décision pour la pré-programmation urbaine. Dans ce contexte, l'objectif est de déterminer rapidement des solutions de qualité acceptable pour des problèmes de grande taille, sans nécessairement trouver la solution optimum. Compte tenu de cette spécificité, nous résolvons le problème avec une méthode dédiée de recherche locale et proposons différentes optimisations de l'algorithme.

**Mots clés :** *Aide à la décision, Ville nouvelle, Développement durable, Modélisation, Optimisation sous contraintes, Recherche locale*

**Collaborations :** Artefacto, Artelys, ArevaTA, EPAMARNE, LIMSI, ARMINES.

## 1 Introduction

À la variété des villes forgées depuis des millénaires, le XX<sup>e</sup> siècle a voulu imposer un modèle unique en créant un monde désarticulé composé de grands objets utilitaires que sont les barres ou les tours, vite entourés d'autoroutes. À la ville des continuités a succédé la ville des disjonctions à l'origine des ghettos où la voiture devint reine, et en condamnant la densité de la ville, Le Corbusier<sup>1</sup> a notamment favorisé l'étalement urbain sans fin [1]. Mais tout comme la ville, l'homme universel n'existe pas et chaque culture entretient avec son milieu un rapport symbolique plus important que ses fonctions matérielles de base (habiter, travailler, circuler, se cultiver le corps et l'esprit). Alors Comment recréer les conditions d'un équilibre entre les hommes, l'environnement et la ville dans un monde où plus de 50% de la population vit en agglomération et où les projections des Nations Unies [2] prévoient un taux d'urbanisation mondial de l'ordre de 70% pour 2050 ? Dans ce contexte complexe, nous participons à la création d'un outil d'aide à la décision pour la pré-programmation d'environnements urbains durables. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet FUI SUSTAINS<sup>2</sup>, qui rassemble des urbanistes, des experts du secteur de l'énergie et des équipes autour de l'optimisation combinatoire et l'interaction homme-machine. Ce projet propose la réalisation d'un outil interactif d'aide à la décision permettant de répartir et de positionner les différentes entités composant une pré-programmation (habitats, industries, équipements, commerces) sur un territoire afin d'éclairer les choix des décideurs (urbanistes et élus). Cet article se focalise sur la problématique de placement des éléments urbains à l'aide de techniques d'optimisation combinatoire.

## 2 Pré-programmation, Modèle urbain et problématique

**Pré-programmation** La pré-programmation urbaine consiste à organiser spatialement les différentes entités constituant une ville en intégrant les dimensions environnementales, sociales, de transport et énergétiques, le tout sous contraintes de taux d'emploi, de densités de population et de topologie de l'environnement. Elle permet aux décideurs et aménageurs de s'accorder sur les grandes orientations d'un projet avant même d'engager une étude urbaine complète et détaillée. Jusqu'à présent, la solution

---

1. Architecte et urbaniste, élabore une doctrine nouvelle publiée sous le nom de la Charte d'Athènes en 1941 qui prescrit un zoning strict, c'est-à-dire un classement des grandes fonctions urbaines par catégorie.

2. [http ://www.sustains.fr/](http://www.sustains.fr/)

initiale utilisée comme base de travail par les décideurs reposait sur un processus manuel et approximatif incapable de prendre en compte l'ensemble des contraintes relatives à un développement urbain durable. Le projet Sustains vise donc à proposer (i) une solution initiale optimisée sur la base d'un ensemble de contraintes définies par les urbanistes (décrites dans la suite de ce document) et (ii) une manipulation interactive intelligente de ces solutions (*i.e.* en tenant compte des contraintes). L'enjeu consiste à réduire en partie la phase de pré-programmation qui pouvait prendre jusqu'à six mois de travail (nombreux allers-retours entre cabinets d'urbanistes, décideurs ou réunions publiques, etc).

**Modèle urbain** Le modèle urbain tel qu'il est proposé par les urbanistes d'Epamarne<sup>3</sup> repose sur les notions centrales que sont les *îlots*, les *formes urbaines* et les *intensités* et intègre, dans une démarche systémique, les contraintes urbaines majeures liées au développement urbain durable. Le niveau de granularité le plus fin retenu par les urbanistes est l'*îlot urbain*. Les îlots sont représentés dans un quadrillage orthogonal avec une dimension de 80 mètres de côté. A un îlot est associé une *forme urbaine* (habitat, commerce, industrie, école, ...). La *forme urbaine* correspond à un type d'utilisation dominant qui est fait de l'espace et du bâti pour un îlot complet. Les formes urbaines (au nombre de 19 dans l'étude actuelle) se décomposent en trois grandes familles (i) habitat, (ii) activité économique et (iii) équipement public. L'*intensité urbaine* est l'état d'un espace urbain assurant un niveau de densité urbaine pour une ville compacte limitant l'étalement urbain, une mixité fonctionnelle permettant d'agir sur les besoins de déplacement consommateurs d'énergie et un maillage viaire hiérarchisé pour accueillir tout type de mobilité. Une intensité urbaine forte correspond à un quartier vivant, dense, mixte et pour lequel la marche à pied est le moyen de déplacement le plus simple pour accéder à toutes les fonctions urbaines essentielles.

**Problématique** Le modèle urbain détermine dans un premier temps le type et le nombre de formes urbaines à répartir sur la ville par niveau d'intensité en fonction du taux d'emploi spécifié et des emprises (surface au sol) des niveaux d'intensité. Cette répartition des formes urbaines par niveau d'intensité participe à la mixité fonctionnelle. La problématique consiste alors, dans un deuxième temps, à répartir spatialement les formes urbaines (calculées par le modèle urbain) sur l'ensemble des îlots du territoire en respectant les ventilations par niveau d'intensité et les contraintes de placement décrites en détail dans la section 3. Les différentes contraintes que nous exploitons ont été formalisées à partir des descriptions des urbanistes. Nous utilisons ici la programmation par contraintes (PPC) pour modéliser ce problème, le traduire en problème d'optimisation (principe "Constraint-based Local Search" [4]) et le résoudre avec un algorithme de recherche locale.

## 3 Modélisation

La programmation par contraintes (PPC) est un paradigme de programmation qui permet de modéliser et de résoudre des problèmes combinatoires de façon déclarative et générique : "L'utilisateur décrit son problème, l'ordinateur le résout" [5]. Un très grand nombre de problèmes combinatoires réels et théoriques appartiennent à la famille des problèmes de satisfaction de contraintes (Constraint Satisfaction Problem ou CSP). Un CSP est défini par un ensemble  $V$  de variables, un ensemble  $D$  de domaines de définition qui encadrent les valeurs que pourront prendre les variables appartenant à  $V$ , et un ensemble  $C$  de contraintes qui conditionnent les valeurs que pourront prendre les variables appartenant à  $V$ . Un problème d'optimisation sous contraintes est un problème pour lequel on cherche parmi l'ensemble de toutes les solutions réalisables la meilleure solution selon une fonction qui définit un objectif donné. Dans cette section, nous décrivons le problème complet en reprenant les contraintes exprimées informellement par les urbanistes.

### 3.1 Modèle de base

Nous représentons la ville par un carroyage régulier où chaque cellule de la grille correspond à un îlot urbain (dans la suite on utilisera indifféremment îlot et cellule). L'enjeu consiste, dès lors, à répartir "au mieux" sur l'ensemble de la grille les différentes formes urbaines fournies par le modèle urbain. La grille est vue comme une matrice rectangulaire de cellules de taille  $x * y$ . Chaque cellule contient un type de forme urbaine, repéré par un numéro correspondant à son code<sup>4</sup>. Dans notre modèle, on s'intéresse à un problème d'optimisation sous contraintes où certaines contraintes sont traduites en fonction de

3. [http://etablisements.epa-marnelavallee.fr/epamarne\\_fre](http://etablisements.epa-marnelavallee.fr/epamarne_fre)

4. (1) Maison individuelle, (2) Habitat collectif R+2 (deux étages), ..., (19) Espace de respiration

coût et d'autres restreignent les mouvements possibles lors de la résolution. Lorsqu'une forme urbaine est assignée à une cellule, un coût pour cette cellule peut être calculé à partir de chaque contrainte applicable. La somme des coûts des contraintes permet d'obtenir un coût total pour la cellule en question. La meilleure configuration possible (affectation d'une forme urbaine à chaque cellule) correspond alors à la configuration qui minimise le coût global de toutes les cellules. On cherche alors à déterminer les formes urbaines en minimisant le coût global issu du coût de chaque contrainte auquel on applique un poids pondéré lié à chaque contrainte.

## 3.2 Contraintes

**Correspondance d'intensité** La modèle urbain nous transmet (i) un nombre de formes urbaines ventilé par niveau d'intensité et (ii) une intensité associée à chaque cellule de la grille. Il faut donc respecter une correspondance entre les cellules relatives à une intensité et les formes urbaines définies pour cette même intensité.

**Interaction entre formes urbaines** Les contraintes d'interactions correspondent aux préférences de localisation des formes urbaines entre elles. On dispose d'une matrice d'interaction pour représenter la valeur d'interaction entre deux formes urbaines. Pour une forme urbaine positionnée sur une cellule, on évalue le coût d'attraction/répulsion uniquement avec ses cellules voisines immédiates.

**Zone de taille critique** Pour la création d'une zone industrielle ou artisanale, il est nécessaire d'atteindre une taille critique (nommée seuil) pour que cette opération puisse être réalisable (fonctionnelle, rentable, ...). Il est donc nécessaire de regrouper entre elles les activités industrielles d'une part et les activités artisanales d'autre part jusqu'à atteindre ce seuil.

**Accessibilité** Cette contrainte porte sur une seule forme urbaine : les espaces de respiration. Elle spécifie qu'en tout point de la ville, on puisse accéder à pied à un espace de respiration en moins de 15 minutes, ce qui correspond à une distance approximative de 1,25 km.

**Séparation** Certaines formes urbaines particulières positionnées à proximité les unes des autres doivent satisfaire les contraintes suivantes (i) ne pas être contiguës (ne pas directement se toucher), (ii) être séparées soit par un *espace tampon*<sup>5</sup>, soit par un *équipement bâti*<sup>6</sup>.

**Éloignement** Cette contrainte spécifie un éloignement minimum de plusieurs îlots entre deux formes urbaines particulières (éloignement de 2, de 3 ou de 4 îlots).

**Constitution d'une place** Le principe est le suivant : lorsqu'il y a, à proximité immédiate d'un lycée ou d'un collège, certaines formes urbaines (Maison individuelle ou de ville, habitat intermédiaire ou collectif, bâtiment tertiaire), on souhaite constituer une "place" autour du collège ou du lycée en positionnant, à coté de l'édifice, un nombre plus ou moins important d'espaces de respiration.

## 4 Résolution

Les paradigmes les mieux adaptés aujourd'hui à la résolution d'un problème comme le notre, de nature combinatoire, proviennent de la Programmation Par Contraintes (PPC) et de la Recherche Locale (RL). La PPC effectue en général une recherche énumérative complète en inférant des réductions de l'espace de recherche à partir des contraintes du problème et permet donc de prouver l'optimalité d'une solution ; mais les temps de calcul peuvent devenir rédhibitoires quand la taille du problème est trop grande. Au contraire, la RL parcourt l'espace de recherche en se dirigeant vers les régions "prometteuses" grâce à une heuristique mais en exploitant les contraintes de façon passive : pénalité dans le coût pour les solutions qui violent les contraintes et impossibilité de garantir l'optimalité du résultat. La RL permet d'obtenir de bonnes solutions pour les problèmes de grandes tailles ou très difficiles et elle est souvent utilisée quand les autres méthodes échouent à cause de la trop grande taille ou du manque de structure d'un problème.

---

5. équipement sportif et espace de respiration

6. école maternelle, école primaire, collège, lycée, équipement administratif et équipement technique.

Notre problème est donc caractérisé par les éléments suivants : (i) il fait intervenir de nombreuses contraintes qui seront parfois en situation de conflit ou de concurrence, (ii) il peut s'appliquer à des grilles de grande taille (de 32x32 à 256x256), (iii) le nombre de solutions possibles restera important et une solution optimale n'a pas véritablement de sens dans un contexte urbain.

Suite à l'échec des méthodes complètes de recherche sur de petites instances de notre problème (16x16), nous proposons l'utilisation de méthodes incomplètes du type RL. Nos travaux s'inspirent plus particulièrement de la méthode "*Adaptative Search*" qui a prouvé son efficacité sur des instances de grandes tailles et de natures différentes [6, 7]. Dans un premier temps, l'algorithme place les formes urbaines aléatoirement sur la grille en respectant les correspondances de niveau d'intensité de chaque cellule. Ensuite, il n'effectue que des permutations entre formes urbaines associées à des cellules de même intensité, ce qui permet de maintenir les proportions initiales.

**Algorithme de base** Notre méthode réalise une succession de permutations (échange des formes urbaines entre deux cellules), de manière à améliorer le plus possible la fonction de coût globale à chaque itération. Dans [6], les auteurs qualifient cette opération de "réparation itérative" consistant à réduire en priorité l'anomalie sur la plus mauvaise variable. Le processus se termine lorsque plus aucune permutation ne permet d'améliorer la fonction de coût globale. Pour trouver la meilleure permutation à chaque itération et afin de ne pas avoir à évaluer l'ensemble des permutations possibles, nous utilisons une méta-heuristique proche de celle proposée dans *Adaptative Search* qui consiste à utiliser la structure du problème pour guider la recherche. Pour ce faire, nous introduisons la notion de "*bon candidat*" pour trouver "*la meilleure permutation*" ou plus simplement de "*candidat*". Il s'agit d'une cellule présentant un coût important par rapport aux autres cellules et donc susceptible d'améliorer de façon significative la fonction de coût globale en permutant sa forme urbaine avec une autre cellule. *Adaptative Search* identifie un seul *candidat* à chaque itération et recherche, à partir de ce *candidat*, la meilleure permutation possible. Pour ce qui nous concerne, nous considérons que le meilleur candidat n'est peut être pas celui qui permettra de réaliser la meilleure permutation. Compte tenu de cette hypothèse, nous évaluons, à chaque itération, les meilleurs candidats (nombre de candidats paramétrable) à partir desquels nous recherchons la meilleure permutation avec l'ensemble des cellules de la grille. Nous exploitons également un espace mémoire dynamique du type "*Tabu Search*" pour éliminer des évaluations suivantes les candidats précédemment sélectionnés mais incapables de produire un bénéfice.

## 5 Conclusion

Nous avons présenté une modélisation pour un problème combinatoire d'affectation de formes urbaines à des îlots dans le cadre de la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour les urbanistes. Cette modélisation intègre différentes contraintes spatiales (de voisinage, de distance et de regroupement) entre formes urbaines. Nous avons proposé et implémenté des variations de l'algorithme *Adaptive Search* pour résoudre efficacement différentes instances du problème.

Basés sur ces premiers résultats, les travaux de recherche vont se focaliser sur (i) l'intégration de nouvelles contraintes exprimées par les urbanistes et (ii) la manipulation interactive des solutions avec maintien des contraintes.

## Références

- [1] Serge SALAT, Les villes et les formes : Sur l'urbanisme durable, Éditions Hermann, 2011
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, World urbanization prospects : the 2007 revision, Urban and Rural Areas, 2007
- [3] J.P. ANTONI, Modéliser la ville : Formes urbaines et politiques de transport, Economica, 2010
- [4] Pascal Van Hentenryck, Laurent Michel, Constraint-Based Local Search, MIT Press, 2009
- [5] Eugene C Freuder, In pursuit of the Holy Grail, Constraints 2(1), 1997
- [6] Philippe Codognet, Daniel Diaz, Yet Another Local Search Method for Constraint Solving, 2001
- [7] Philippe Codognet, Daniel Diaz, An Efficient Library for Solving CSP with Local Search, The Fifth Metaheuristics International Conference, 2003