



HAL
open science

Démarche intégrée pour l'optimisation d'agencement d'espace : application à l'aménagement d'un shelter

Julien Bénabès, Emilie Poirson, Fouad Bennis, Yannick Ravaut

► To cite this version:

Julien Bénabès, Emilie Poirson, Fouad Bennis, Yannick Ravaut. Démarche intégrée pour l'optimisation d'agencement d'espace : application à l'aménagement d'un shelter. 12ème Colloque National AIP PRIMECA, Mar 2011, Le Mont Dore, France. hal-00596441

HAL Id: hal-00596441

<https://hal.science/hal-00596441>

Submitted on 27 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DEMARCHE INTEGREE POUR L'OPTIMISATION D'AGENCEMENT D'ESPACE : APPLICATION A L'AMENAGEMENT D'UN SHELTER

Julien Bénabès (1), Emilie Poirson (1), Fouad Bennis (1) et Yannick Ravaut (2)

(1) Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN, UMR CNRS 6597, Nantes, +33 2.40.37.69.42, +33 2.40.37.69.00, julien.benabes@ircsyn.ec-nantes.fr, fouad.bennis@ircsyn.ec-nantes.fr, emilie.poirson@ircsyn.ec-nantes.fr

(2) Thales Communications, Cholet, +33 2.41.64.57.00, +33 2.41.64.57.57, yannick.ravaut@fr.thalesgroup.com

Résumé :

L'optimisation d'agencement d'espace est une activité d'ingénierie qui a une influence forte sur la conception de nombreux produits et systèmes industriels, tels le compartimentage d'un navire, la disposition de machines dans une usine ou encore l'assemblage mécanique d'un système complexe. La recherche d'un agencement, qui respecte toutes les exigences du concepteur, est une tâche difficile, notamment dans les applications soumises à de nombreuses contraintes. Il est donc indispensable, pour le concepteur, de disposer d'outils efficaces qui permettent de résoudre ces problèmes dans des temps de calcul raisonnables. Ainsi, cet article propose une démarche globale d'optimisation d'agencement d'espace qui donne au concepteur les outils pour décrire, formuler et résoudre un problème d'agencement. L'approche de résolution est ici multi-objectifs et utilise un algorithme d'optimisation hybride, basé sur l'algorithme génétique. Cette approche implique l'emploi d'outils d'aide à la décision permettant au concepteur d'interagir avec les solutions proposées par l'algorithme d'optimisation. Cette démarche d'optimisation d'agencement est testée sur un cas d'application industriel qui consiste à placer de façon optimale des équipements dans un shelter.

Mots clés: agencement d'espace, optimisation, interactivité, aide à la décision

1 Introduction

L'agencement d'espace est une activité multidisciplinaire [1]. Elle fait intervenir plusieurs experts de disciplines diverses dans toutes les phases du cycle de vie d'un produit, de la conception préliminaire à la conception détaillée. L'agencement d'espace est habituellement défini comme un problème d'optimisation. Dans la littérature scientifique, on trouve différentes définitions de ce problème d'optimisation [2,3]. L'idée principale reste cependant toujours la même : *étant donné un ensemble de composants et un contenant, l'optimisation d'agencement consiste à trouver l'ensemble des variables de positionnement des composants afin de minimiser certains objectifs, tout en respectant certaines contraintes*. Cette définition générale s'adapte à toutes les applications industrielles. Par exemple Drira et al [4] et Wäscher et al. [5] ont ajusté cette définition à leurs domaines de recherche respectifs : l'agencement de machines dans une usine et les problèmes de découpe et d'empaquetage.

Cagan et al. ont proposé dans [2] une représentation schématique des différents éléments nécessaires à la résolution d'un problème d'agencement. Cet article propose ici une nouvelle représentation qui décompose le processus d'agencement en trois étapes : la description du problème, la formulation du problème et la stratégie d'optimisation. La Figure 1 illustre cette représentation et montre que ces trois étapes sont connectées entre elles.

L'étape de description définit la dimension du problème (un, deux ou trois dimensions) et identifie les composants de l'agencement : le contenant et les autres composants qui doivent être placés dans le

contenant. Ensuite cette description, ainsi que toutes les exigences formulées par le concepteur sont traduites en variables, contraintes et objectifs, afin de transformer le problème d'agencement en un problème d'optimisation. Ce problème d'optimisation est résolu via une stratégie d'optimisation qui peut inclure un ensemble d'outils interactifs, permettant au concepteur d'agir sur le processus d'optimisation. Cette interaction avec l'utilisateur requiert un environnement graphique et numérique, où une solution peut être visualisée selon la dimension du problème.

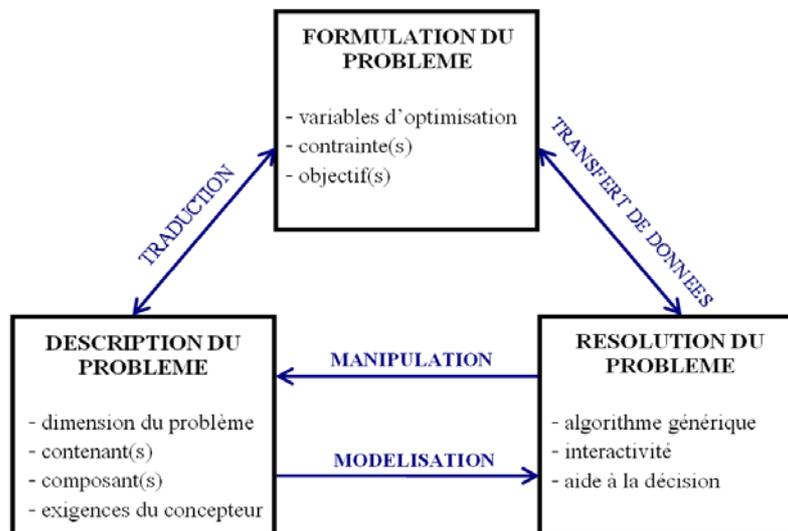


Figure 1. Représentation schématique d'un problème d'agencement

Les problèmes d'agencement sont généralement assimilés à des problèmes d'optimisation non-linéaires et NP-difficiles. Pour résoudre ces problèmes, on trouve habituellement des approches mono-objectif et multi-objectifs [2]. Des algorithmes basés sur le calcul du gradient peuvent être utilisés pour des problèmes simples. Pour des problèmes plus complexes, des stratégies stochastiques sont utilisées afin d'éviter les optima locaux : algorithmes génétiques [3], recuit simulé [6] ou recherche par motif de conception [7]. La plupart de ces algorithmes sont dédiés à des applications précises mais rencontrent des difficultés à être généralisés. Quelques recherches récentes se focalisent sur ces stratégies d'optimisation génériques. Par exemple, Jacquenot et al. [8] ont proposé un algorithme hybride basé sur un algorithme génétique couplé avec un algorithme de séparation, capable de résoudre de nombreux problèmes. Une variante de cette stratégie est également proposée dans [9].

Généralement, une démarche de conception est un processus impliquant l'identification d'un modèle multi-critères soumis à une phase d'optimisation multi-contraintes et multi-objectifs. La participation du concepteur à la recherche de solutions optimales est un élément clé de la démarche d'optimisation. Cette participation permet, en phase d'optimisation, d'ajuster la formulation du problème ou aider l'algorithme en lui proposant des solutions initiales personnalisées. Une contribution significative à ce concept est présentée dans [10], où le cas d'étude porte sur l'agencement de pièces dans un bâtiment. De plus, l'interaction avec le concepteur peut être utilisée pour insérer les perceptions de l'utilisateur dans la démarche d'optimisation [11]. Brintrup et al. [12] ont développé un algorithme génétique interactif pour intégrer le jugement qualitatif du concepteur dans l'optimisation d'agencement.

Cet article propose donc une démarche globale d'optimisation d'agencement. Cette démarche est testée sur un cas d'étude industriel qui consiste à placer de façon optimale huit équipements dans un shelter. Ces équipements sont des armoires électriques et énergétiques, des bureaux et des boîtiers électriques. Un modèle CAO 3D du shelter est présenté sur la Figure 2.

Ce papier est structuré en 5 parties. Les parties 2 et 3 présentent les étapes de description et de formulation d'un problème d'optimisation d'agencement. La stratégie d'optimisation, incluant l'outil

interactif d'aide à la décision, est décrite dans la partie 4. La complexité d'un problème d'agencement est également définie dans cette partie. Enfin, la partie 5 conclut ce document.

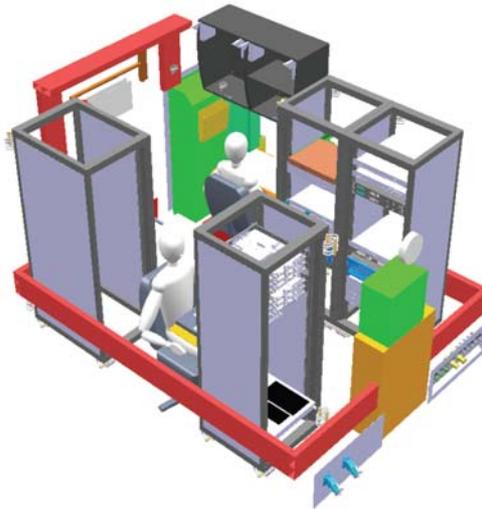


Figure 2. Modèle CAO 3D du shelter

2 Description du problème d'agencement

La description du problème est la première étape du processus de résolution d'un problème d'agencement. Cette étape est réalisée par le concepteur qui est le seul à connaître les caractéristiques et le comportement global de son système ou de son produit. Cette étape consiste à décrire le contenant, les composants et toutes les exigences du concepteur. Cette partie se focalise en particulier sur la description des composants et présente notamment une nouvelle classification de ces composants.

Dans un problème d'agencement, on trouve au moins un contenant et plusieurs composants. Dans certaines applications, telles le chargement de palettes, les contenants peuvent être multiples. Les composants d'un agencement peuvent être très différents, selon leur forme, leur taille et leurs propriétés.

Prenons l'exemple du shelter, exposé dans cet article. Ce problème a été simplifié en deux dimensions car, du fait de la hauteur des armoires, il est impossible de superposer plusieurs composants. Le modèle 2D du shelter est présenté sur la Figure 3. Sur cette figure, certains composants sont représentés par des rectangles en pointillés. Ils décrivent les espaces d'accessibilité des armoires et des bureaux. Par exemple, l'espace d'accessibilité de l'armoire 1 représente l'espace vide placé devant l'armoire 1, requis pour pouvoir insérer du matériel dans l'armoire 1. En d'autres termes, il n'est pas possible de placer un équipement dans cet espace d'accessibilité mais il est possible de faire chevaucher deux espaces d'accessibilité, en considérant que les opérations liées aux équipements sont séquentielles. L'armoire et son espace d'accessibilité sont donc deux composants du même agencement, mais avec des propriétés très différentes. Cet article propose donc d'instaurer deux classes de composants, définis par :

- le **composant matériel** : il a une masse et ne peut pas chevaucher avec un autre composant matériel. Les composants sont généralement considérés comme matériels dans la littérature [13,7].
- le **composant virtuel** : il n'a pas de masse et peut chevaucher avec d'autres composants, matériels ou virtuels, selon les exigences du concepteur. Les couloirs, décrits dans le problème d'agencement présenté dans [14] peuvent être considérés comme des composants virtuels.

A notre connaissance, les concepts de composants matériels et virtuels n'ont pas encore été développés dans la littérature. Cependant, cette notion a un impact significatif sur la description et la formulation d'un problème d'agencement. Par exemple, le calcul des contraintes de chevauchement

entre composants dépend de cette classification. De même, le calcul de la compacité du problème est très dépendant de la présence de composants virtuels. Enfin, cette nouvelle classification des composants peut être utilisée pour proposer une nouvelle classification des problèmes d'agencement.

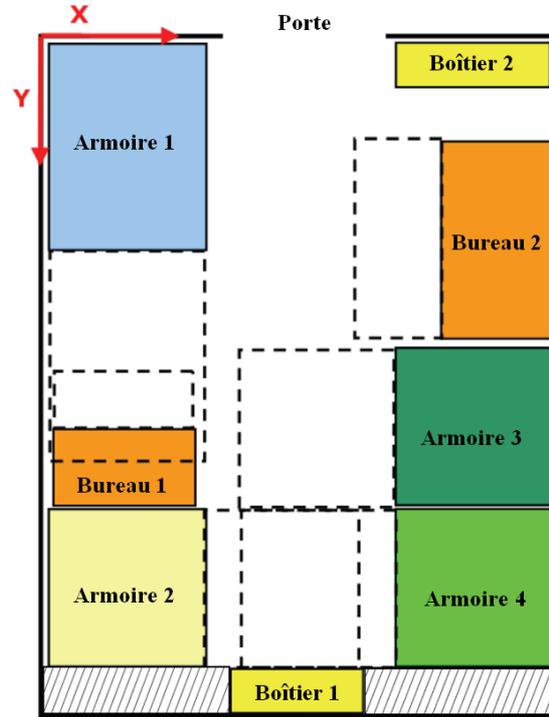


Figure 3. Description du problème du shelter en 2D

3 Formulation du problème d'agencement

La formulation d'un problème d'agencement peut être mono-objectif ou multi-objectifs. Le concepteur peut prendre une décision a priori en combinant les différents objectifs de son problème en un seul objectif. Cette approche est réalisable et efficace si tous les objectifs sont de même dimension et si le concepteur est familier avec le comportement de son système. Dans cet article, l'approche multi-objectifs est préférée. Dans cette approche, le concepteur optimise simultanément plusieurs objectifs, bien souvent contradictoires. La formulation mathématique d'un problème d'optimisation multi-objectifs sous contraintes est la suivante :

$$\text{problème P:} \begin{cases} \text{trouver les variables d'optimisation } \mathbf{x}^* = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \mathbf{x}^* = \operatorname{argmin} F(\mathbf{x}) = \operatorname{argmin} (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})) \\ \text{s.c. } g(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ et } h(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

où m est le nombre d'objectifs et n le nombre de variables.

L'équation 1 montre que, pour formuler un problème d'optimisation, le concepteur a besoin de trois éléments : les variables de conception, les contraintes et les objectifs.

3.1 Les variables de conception

Les variables de conception sont les paramètres qui vont être modifiés durant le phase d'optimisation. Ces paramètres influent sur les performances globales d'un système et leur valeur sera fixée à la fin du processus d'optimisation. Dans la plupart des problèmes d'agencement, ces variables de conception sont les variables qui localisent les composants à l'intérieur du contenant. Par exemple, dans le cas du shelter, 24 variables ont été identifiées. Chaque composant est en effet localisé par trois

variables d'optimisation (X, Y, α) : X et Y sont des variables continues qui représentent les coordonnées du centre de gravité du composant. La variable α est discrète et définit la rotation du composant autour de l'axe Z . Dans le cas du shelter, α peut prendre quatre valeurs : 0° , 90° , 180° ou 270° .

Le nombre de variables par composant définit le degré de liberté du composant. Certaines variables peuvent être constantes, ce qui réduit le nombre de variables d'optimisation et donc facilite la recherche de solutions. Par ailleurs, dans certaines applications, le concepteur peut choisir de considérer certaines dimensions de composants comme variables d'optimisation.

3.2 Les contraintes et les objectifs

Tout d'abord, il est important ici de mentionner que les contraintes et les objectifs sont interchangeable et dépendent des exigences du concepteur. Ainsi, dans la partie qui suit, le mot « contrainte » peut être remplacé par « objectif », et inversement.

Deux catégories de contraintes sont considérées : les contraintes géométriques et les contraintes fonctionnelles. Les contraintes géométriques garantissent généralement le non-chevauchement entre composants. La détection de la collision entre composants est calculée à chaque itération de l'algorithme d'optimisation. Il est donc important de choisir une bonne représentation des composants et une méthode efficace de détection afin de réduire les temps de calcul. On peut trouver dans [15], un résumé des principales méthodes utilisées dans la détection de collisions.

Dans le problème d'agencement du shelter, quatre contraintes de non-chevauchement ont été définies :

- non-chevauchement entre les composants matériels (C1),
- non-chevauchement entre les composants matériels et virtuels (C2),
- non-chevauchement entre les composants et l'extérieur du shelter (C3),
- non-chevauchement entre les armoires et l'espace sous le climatiseur (représentée par la zone hachurée sur la Figure 3) (C4).

Toutes ces contraintes de non-chevauchement sont calculées via l'aire d'intersection entre deux composants. Le problème étant en deux dimensions et les composants étant de forme rectangulaire, l'aire d'intersection entre les composants i et j est défini par :

$$A_{ij} = \max[0, \min(x_i + \frac{l_i}{2}) - \max(x_j - \frac{l_j}{2})] \times \max[0, \min(y_i + \frac{L_i}{2}) - \max(y_j - \frac{L_j}{2})] \quad (2)$$

où (x_i, y_i) sont les coordonnées du centre de gravité du rectangle i . L_i et l_i sont respectivement la longueur et la largeur du rectangle i .

Dans certains problèmes d'agencement, les contraintes et les objectifs sont seulement géométriques. Ces problèmes peuvent être assimilés à des problèmes de découpe et d'empaquetage [16,5]. D'un autre côté, on peut trouver des contraintes fonctionnelles qui garantissent le bon fonctionnement de l'agencement. Ces contraintes sont multiples : équilibre des masses, distance maximale entre composants, alignement des composants ou encore accessibilité aux composants. Par ailleurs, cette accessibilité aux composants est une contrainte difficile à prendre en compte dans la formulation du problème. Une méthode, présentée dans [17], permet de transformer cette accessibilité en une contrainte ou un objectif du problème d'agencement.

Dans le problème du shelter, deux objectifs fonctionnels sont définis :

- un objectif pour équilibrer les masses à l'intérieur du shelter (en **minimisant** la distance entre le centre de gravité des composants et le centre géométrique du shelter) (O1),

- un objectif pour éloigner la partie « énergie » de la partie « électrique » (en **maximisant** la distance entre l'armoire 1 et les armoires 2 et 3 et le boîtier 1) (O2).

4 Stratégie d'optimisation

Cette partie présente la stratégie d'optimisation qui a été utilisée dans la résolution du problème d'agencement du shelter. Considérons tout d'abord que, dans les différentes simulations qui ont été effectuées, un couloir central a été ajouté au modèle 2D du shelter. Ce couloir garantit l'accessibilité aux composants depuis l'entrée du shelter.

4.1 Le problème d'agencement du shelter : un problème complexe

Les problèmes d'agencement sont habituellement considérés comme des problèmes complexes. La recherche d'une solution « faisable », qui respecte toutes les contraintes de conception, est une tâche difficile. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas, dans la littérature, de définition générale de la complexité d'un problème d'agencement. Ce papier propose donc une définition de cette complexité en considérant trois aspects.

- la **complexité liée à la géométrie des composants** : lorsque les composants sont de forme irrégulière, la détection des collisions consomme beaucoup de temps de calcul. Cette complexité est donc une complexité informatique,
- la **complexité liée à la compacité du problème** : plus la compacité est grande et plus la recherche de solutions faisables est difficile,
- la **complexité liée à la formulation du problème** : plus les contraintes sont nombreuses et plus l'espace de conception est morcelé. Afin de passer d'une zone de solutions faisables à une autre, il est impossible d'utiliser les algorithmes basés sur le calcul du gradient. Des stratégies stochastiques, comme l'algorithme génétique, doivent donc être utilisées. Le temps de calcul augmente et le problème est plus complexe.

4.2 L'algorithme d'optimisation hybride

La formulation du problème du shelter est multi-contraintes et multi-objectifs. L'espace de conception est donc morcelé. Cet article propose d'utiliser dans un premier temps l'algorithme génétique OmniOptimizer [18] pour résoudre ce problème. Cet algorithme résout les problèmes d'optimisation mono et multi-objectifs. Etant donné un ensemble de designs initiaux, aléatoirement créés, l'algorithme génétique utilise des opérations génétiques (sélection, croisement et mutation) pour créer de nouveaux individus. L'algorithme OmniOptimizer a été initialisé avec 200 individus, aléatoirement créés. Après 60 générations, l'algorithme n'a pas trouvé de solutions faisables. Les résultats ne sont donc pas satisfaisants.

Afin de faciliter la recherche de solutions, Jacquenot et al. ont proposé dans [8] un algorithme hybride innovant. Cette stratégie d'optimisation utilise un algorithme génétique couplé avec un algorithme de séparation. Sa structure est très proche de l'algorithme génétique. L'algorithme de séparation est intégré à l'algorithme génétique et modifie la position des composants afin que la solution respecte les contraintes de non-chevauchement. En résumé, avant d'évaluer une solution, l'algorithme vérifie si les contraintes de non-chevauchement sont satisfaites. Si elles le sont, les différents objectifs sont évalués et l'algorithme passe à un autre individu. A l'inverse, l'algorithme de séparation est activé et la solution est ensuite évaluée.

Cet algorithme hybride a été initialisé par 200 individus, aléatoirement créés. 60 générations ont été effectuées. L'algorithme a trouvé des solutions faisables. Le temps de calcul est plus important que celui de l'algorithme génétique, du fait de l'utilisation de l'algorithme de séparation. La Figure 4 illustre la convergence des deux algorithmes testés. L'algorithme hybride est plus efficace car il trouve des solutions faisables avec moins de générations.

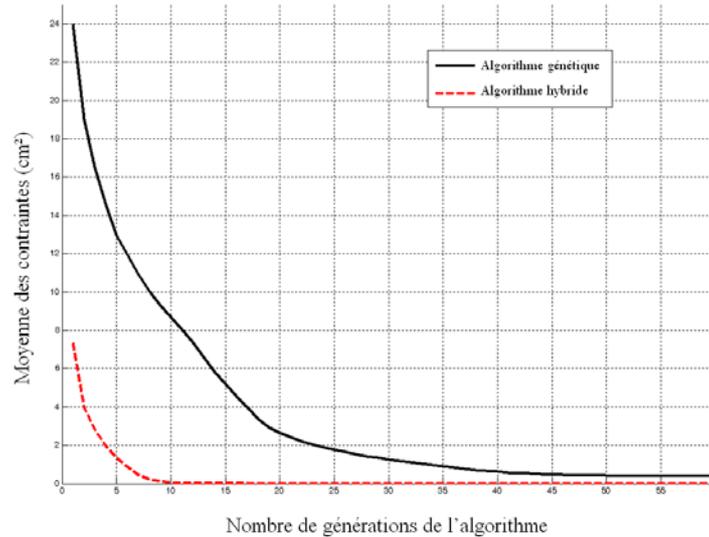


Figure 4. Comparaison de la convergence des algorithmes

4.3 L'aide à la décision interactive

Dans une approche d'optimisation multi-objectifs, la préférence entre les objectifs de conception est effectuée en fin d'optimisation. Le concepteur doit visualiser le front de Pareto afin de sélectionner la solution idéale. Le front de Pareto représente l'ensemble des solutions optimales, c'est-à-dire celles qui ne sont pas dominées par d'autres solutions. Considérons qu'une solution U domine une solution V (Pareto dominance) si U est aussi bon que V sur tous les objectifs et meilleur sur au moins un des objectifs. Cette relation est mathématiquement formulée par :

$$\begin{cases} \forall i \in \{1, \dots, n\}, f_{iU} \leq f_{iV} \\ \exists j \in \{1, \dots, n\}, f_{jU} < f_{jV} \end{cases} \quad (3)$$

où la solution U est représentée par un vecteur d'objectifs $F_U = (f_{1U}, f_{2U}, \dots, f_{mU})$, où f_{iU} est la i^{th} composante du vecteur d'objectifs F pour la solution U .

Considérons l'ensemble des solutions Pareto-optimales générées par l'algorithme hybride. Cet ensemble est composé de 1136 solutions. Il est donc impossible pour le concepteur de faire un choix parmi ces solutions. Cependant, certaines solutions sont très proches. Il est donc indispensable de trier ces solutions pour en extraire les variantes. Une solution i est une nouvelle variante si elle diffère de la solution j sur un des critères suivants :

- un des composants a été déplacé d'au moins Δ mm suivant l'axe X ou Y , Δ fixé arbitrairement à 1000 dans les simulations effectuées,
- un des composants a changé d'orientation,
- le minimum des différences entre les objectifs des deux solutions est plus grand qu'un certain seuil, fixé arbitrairement à 10 cm dans les simulations effectuées.

Par conséquent, le nombre de variantes faisables s'élève à 40. Parmi ces 40 variantes, 5 solutions sont Pareto-optimales.

Dans la plupart des problèmes d'agencement, toutes les exigences du concepteur ne peuvent pas être retranscrites en expressions mathématiques et intégrées facilement dans la formulation du problème. La démarche de conception, proposée dans cet article, suggère au concepteur d'explorer l'ensemble des variantes Pareto-optimales, d'interagir avec ces solutions et de prendre une décision

finale en accord avec son jugement personnel. Ainsi, ce papier propose un environnement graphique et numérique d'aide à la décision permettant de :

- explorer l'ensemble des solutions Pareto-optimales,
- visualiser une solution en deux ou trois dimensions,
- modifier localement et manuellement une solution, en changeant la position et l'orientation de certains composants et en visualisant directement les nouvelles valeurs des contraintes et des objectifs, induites par ces modifications.

L'objectif principal de cette interactivité avec le concepteur est d'améliorer les performances des solutions générées par l'algorithme d'optimisation et d'apporter à ces solutions une expertise et un jugement personnel. L'environnement utilisé pour matérialiser cette interactivité est illustrée sur la Figure 5.

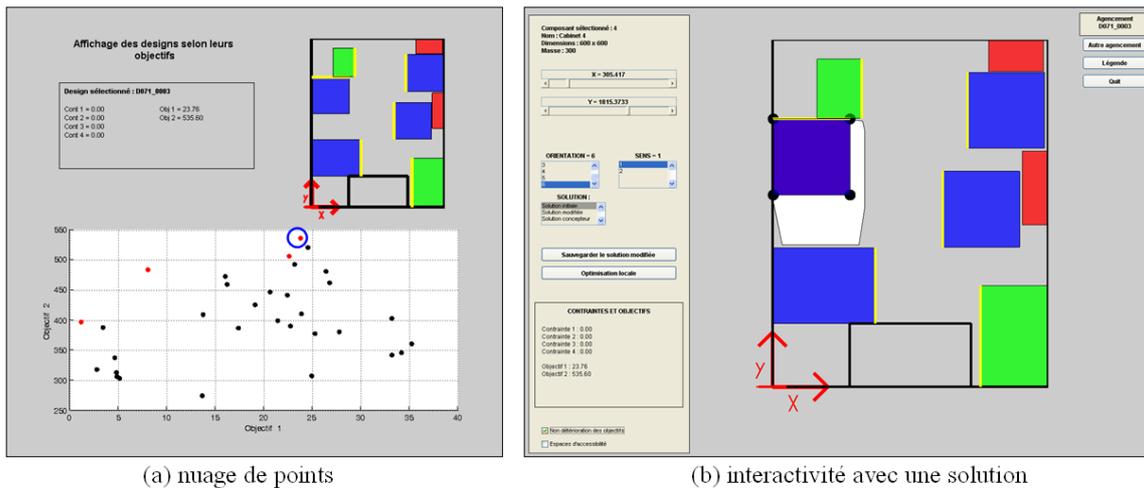


Figure 5. Environnement interactif d'aide à la décision

La Figure 5(a) présente l'outil utilisé pour explorer un ensemble de solutions par un nuage de points. Il est notamment utilisé pour afficher le front de Pareto du problème d'optimisation. Le concepteur peut cliquer sur chaque point représentant une solution et visualiser directement l'agencement, ses contraintes et ses objectifs. La Figure 5(b) représente l'environnement d'interaction avec une solution. Cet environnement permet de modifier localement la position des composants de l'agencement. Les contraintes et les objectifs s'actualisent en fonction des modifications effectuées par le concepteur. Il est possible également de comparer la solution modifiée par le concepteur avec la solution initialement générée par l'algorithme ou une autre solution arbitrairement choisie. Sur la Figure 5(b), on remarque une zone blanche dessinée autour du composant 4. Cette zone représente l'ensemble possible des positions du composant 4 sans que les objectifs soient détériorés. Cet indicateur aide le concepteur à modifier efficacement son agencement.

4.4 Résultats

Comme indiqué dans la partie précédente, considérons une solution Pareto-optimale choisie par le concepteur. Cette solution est illustrée sur la Figure 6(b). En modifiant localement cet agencement, le concepteur obtient la solution illustrée sur la Figure 6(c).

Finalement, la solution modifiée est meilleure que la solution générée par l'algorithme et meilleure également que la solution initialement proposée par le concepteur et illustrée sur la Figure 6(a). Il est important ici de mentionner que cette solution initiale est une solution intuitive, qui a été créée en considérant des exigences uniquement géométriques. Le tableau 1 indique les valeurs des objectifs pour les trois solutions.

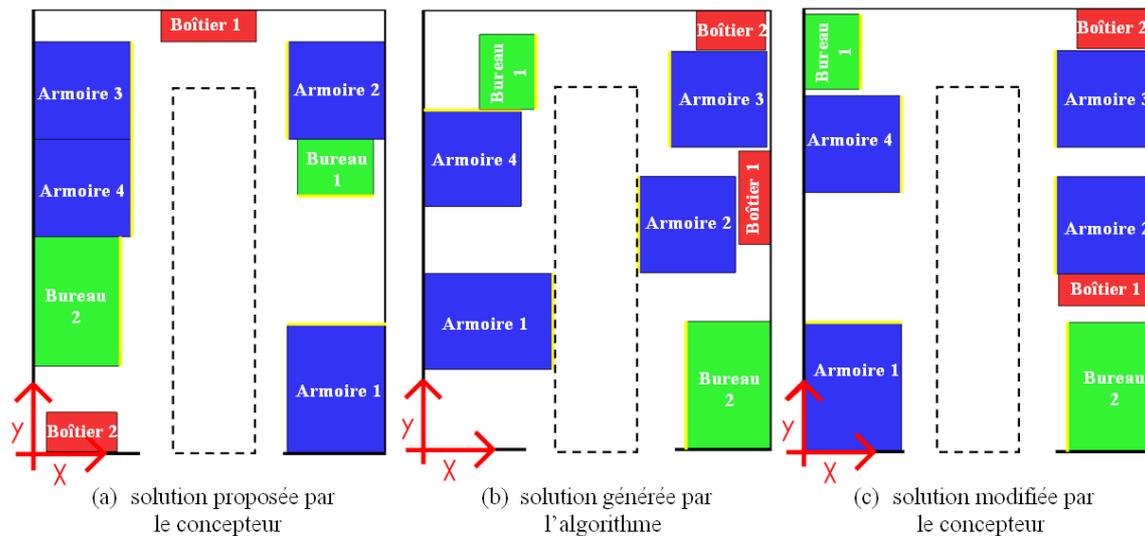


Figure 6. Résultats graphiques

Objectifs	Solution initiale (a)	Solution sélectionnée (b)	Solution modifiée (c)
Obj. 1 (cm,min)	25,41	23,76	15,73
Obj. 2 (cm,max)	604,88	535,60	659,27

Table 1. Résultats numériques

5 Conclusion

Cet article présente une démarche globale pour l'optimisation d'agencement d'espace. Cette démarche aide le concepteur à décrire, formuler et résoudre un problème d'agencement. Elle introduit notamment les notions de composants matériels et virtuels. Ces composants virtuels sont présents dans de nombreuses applications industrielles, pour décrire par exemple l'espace d'accessibilité d'un composant. Une définition de la complexité d'un problème d'agencement est également donnée dans ce papier.

L'approche multi-objectifs est utilisée dans cette démarche d'optimisation. Le concepteur fait un choix de conception sur des solutions optimales proposées par l'algorithme d'optimisation. Pour faire ce choix, ce papier propose un environnement interactif d'aide à la décision qui permet au concepteur de visualiser une solution, la modifier localement et améliorer ses performances en y intégrant son jugement personnel.

Enfin, la démarche d'optimisation, proposée dans ce papier, encourage l'innovation, propose des alternatives de conception et justifie les choix du concepteur par des données quantitatives.

6 Remerciements

Les auteurs remercient l'entreprise Thales Communications pour le cas d'étude du shelter présenté dans ce papier.

Références

- [1] A. GIASSI, F. BENNIS, J.-J. MAISONNEUVE. "Multidisciplinary design optimisation and robust design approaches applied to concurrent design", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 28, 2004, pp. 356–371.
- [2] J. CAGAN, K. SHIMADA, S. YIN. "A survey of computational approaches to the three-dimensional layout problems", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, 2002, pp. 597–611.

- [3] M. YI, G. FADEL, V.B. GANTOVNIK. "Vehicle configuration design with a packing genetic algorithm", *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, Vol. 15, 2008, pp. 433–448.
- [4] A. DRIRA, H. PIERREVAL, S. HAJRI-GABOUJ. "Facility layout problems: A survey", *Annual Reviews in Control*, Vol. 31, 2007, pp. 255–267.
- [5] G. WÄSCHER, H. HAUBNER, H. SCHUMANN. "An improved typology of cutting and packing problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, 2007, pp. 1109–1130.
- [6] S. SZYKMAN, J. CAGAN. "Constrained three-dimensional component layout using simulated annealing", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 119, 1997, pp. 28–35.
- [7] Y. SU, J. CAGAN. "An extended pattern search algorithm for three dimensional component layout", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 122, 2000, pp. 102–108.
- [8] G. JACQUENOT, F. BENNIS, J.-J. MAISONNEUVE, P. WENGER. "2d multi-objective placement algorithm for free-form components", *Actes de : ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE. San Diego (USA), 2009.*
- [9] J. BENABES, F. BENNIS, E. POIRSON, Y. RAVAUT. "Interactive optimization strategies for layout problems", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Vol. 4, 2010, pp. 181–190.
- [10] J.-J. MICHALEK, P.-Y. PAPALAMBROS. "Interactive design optimization of architectural layouts", *Engineering Optimization*, Vol. 34, 2020, pp. 485–501.
- [11] E. POIRSON, J.-F. PETIOT, J. GILBERT. "Integration of user perceptions in the design process: application to musical instrument optimization", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 129, 2007, pp. 1206–1214.
- [12] A.M. BRINTRUP, J. RAMSDEN, A. TIWARI. "An interactive genetic algorithm-based framework for handling qualitative criteria in design optimization", *Computers in Industry*, Vol. 58, 2007, pp. 279–291.
- [13] P. GRIGNON, G. FADEL. "A GA based configuration design optimization method", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 126, 2004, pp. 6–15.
- [14] K.-Y. LEE, S.-N. HAN, M.-I. ROH. "An improved genetic algorithm for facility layout problems having inner structure walls and passages", *Computers and Operations Research*, Vol. 30, 2003, pp. 117–138.
- [15] C.-M. LIN, S. GOTTSCHALK. "Collision detection between geometric models: A survey". *Actes de : IMA Conference on Mathematics of Surfaces*, pp. 37–56. 1998
- [16] H. DYCKHOFF. "A typology of cutting and packing problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 44, 1990, pp. 145–159.
- [17] J. BENABES, F. BENNIS, E. POIRSON, Y. RAVAUT. "Accessibility in layout optimization". *Actes de : Engineering Optimization Conference (EngOpt). Lisbonne, 2010.*
- [18] K. DEB, S. TIWARI. "Omni-optimizer: A generic evolutionary algorithm for single and multi-objective optimization", *European Journal of Operational Research*, Vol. 185, 2008, pp. 1062–1087.