

# Techniques optimales pour le routage de canalisations dans un espace 3D sans obstacle

Marvin Stanczak<sup>1,2</sup>, Cédric Pralet<sup>1</sup>, Vincent Vidal<sup>1</sup>, Vincent Baudoui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ONERA / DTIS, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse - France  
{marvin.stanczak, cedric.pralet, vincent.vidal}@onera.fr

<sup>2</sup> Airbus Defence and Space, Toulouse - France  
{marvin.stanczak, vincent.baudoui}@airbus.com

**Mots-clés :** *Routage de canalisations, automatisation, optimisation, contraintes*

## 1 Introduction

Pour certaines industries comme l'aéronautique, le spatial ou la construction navale, la conception de réseaux de canalisations joue un rôle important à cause du grand nombre de d'équipements à connecter. En pratique, les ingénieurs conçoivent les routes des canalisations comme une succession de sections droites et de coudes rigides en utilisant leur expérience pour minimiser la longueur et le nombre de coudes utilisés.

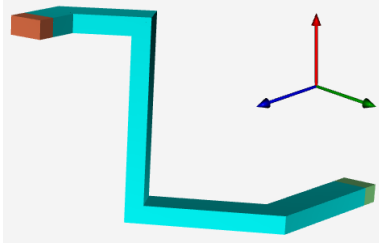


FIG. 1 – Une exemple de routage.

Afin d'assister les ingénieurs dans cette phase de conception, de nombreux algorithmes de routage automatique de canalisations sont proposés dans la littérature [1, 2, 3, 4]. Cependant, la plupart de ces méthodes ne considère que des coudes orthogonaux, réduisant ainsi la qualité des solutions obtenues. De plus, l'orientation de la section de canalisation n'est généralement pas prise en compte, ce qui est pourtant impératif dans le cas de canalisations de section rectangulaire. Dans ce travail, on propose deux approches de routage automatique dans un environnement sans obstacle pour des canalisations à section rectangulaire utilisant les coudes (potentiellement non orthogonaux) d'un catalogue.

## 2 Description du problème

On appelle orientation  $o$  une base de  $\mathbb{R}^3$ . On note  $\mathcal{O}$  l'ensemble des orientations. On cherche à connecter une source de position  $P_s \in \mathbb{R}^3$  et d'orientation  $O_s \in \mathcal{O}$  à une destination de position  $P_d \in \mathbb{R}^3$  et d'orientation  $O_d \in \mathcal{O}$  avec une canalisation  $[\ell_1, b_1, \ell_1, \dots, \ell_{N-1}, b_N, \ell_{N+1}]$  alternant des sections droites de longueurs  $\ell_i$  et des coudes  $b_i$  appartenant à un catalogue  $\mathcal{B}_{cat.}$ . Le coût d'un coude  $b$  est noté  $C_b \in \mathbb{R}^+$  et le coût linéique de la canalisation est noté  $C \in \mathbb{R}^+$ . On souhaite minimiser le coût total de la canalisation défini par  $\sum_{i=1}^N C_b + \sum_{i=1}^{N+1} C\ell_i$ . Des contraintes de fabrication imposent que les sections droites aient une longueur minimale de  $L \in \mathbb{R}^+$  et que la canalisation doit contenir au plus  $N \in \mathbb{N}$  coudes.

## 3 Méthodes de routage

Les deux approches proposées se basent sur le graphe orienté  $G(O, E)$  dont les nœuds sont les orientations atteignables et les arêtes correspondent aux coudes permettant de passer d'une orientation à l'autre. Ce graphe peut être construit de manière itérative en l'initialisant avec

l'orientation d'origine  $O_s$ , puis en étendant les nœuds précédemment créés en leur appliquant chaque coude du catalogue  $\mathcal{B}_{cat.}$ . En étendant  $N$  fois le graphe, on obtient ainsi toutes les orientations atteignables avec un maximum de  $N$  coudes du catalogue  $\mathcal{B}_{cat.}$ .

Dans une première méthode, on combine un solveur maître, inspiré de l'algorithme A\*, pour énumérer les chemins dans le graphe  $G(O, E)$  (autrement dit, les combinaisons de coudes possibles), et un programme linéaire esclave déterminant les longueurs des sections droites pour un chemin donné. Pour éviter l'exploration de chemins non intéressants, une borne inférieure  $C_{LB}(B)$  du coût de la canalisation utilisant les coudes du chemin  $B$  est utilisée. Pour un chemin entre  $O_s$  et  $O_d$  de taille  $N_B$  et de coût  $C_B$  égal à la somme du coût des coudes, on propose la borne inférieure  $C_{LB}(B) = \max(C_B + (N_B + 1)CL, C\|\overrightarrow{P_s P_d}\|)$ . Si  $C_{LB}(B)$  est strictement inférieur au coût  $C_{best}$  de la meilleure solution courante, les longueurs des sections droites sont calculées avec le programme linéaire suivant utilisant les directions principales  $\overrightarrow{z_{O_i}}$  des orientations  $O_i$  successives du chemin :

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{i=1}^{N_B+1} C\ell_i \\
\text{s.c.} \quad & \overrightarrow{p_0} = \overrightarrow{P_s} \quad \overrightarrow{p_{N_B+1}} = \overrightarrow{P_d} \\
& \ell_i \geq L \quad \forall i \in \{1, \dots, N_B + 1\} \\
& \overrightarrow{p_i} = \overrightarrow{p_{i-1}} + \ell_i \overrightarrow{z_{O_i}} \quad \forall i \in \{1, \dots, N_B + 1\} \\
& C_B + \sum_{i=1}^{N_B+1} C\ell_i \leq C_{best} \\
& \ell_i \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in \{1, \dots, N_B + 1\} \\
& \overrightarrow{p_i} \in \mathbb{R}^3 \quad \forall i \in \{0, \dots, N_B + 1\}
\end{aligned}$$

Si le programme linéaire a une solution, on met à jour la meilleure solution courante, sinon le solveur maître est appelé pour énumérer le prochain chemin. Lorsqu'il n'y a plus de chemins possibles, la meilleure solution courante est la solution optimale.

Dans la seconde approche, la combinaison de coudes et les longueurs des sections droites sont calculées conjointement via un modèle MILP étendant le programme linéaire précédent. Pour cela, on introduit les variables de décision  $x_{i,b}$  correspondant au choix du coude  $b$  pour le  $i^{\text{ème}}$  coude et  $y_{i,o}$  correspondant au choix de l'orientation  $o$  de la canalisation après le  $i^{\text{ème}}$  coude. Le problème d'optimisation des longueurs se couple alors avec un problème de plus court chemin dans le graphe  $G(O, E)$ . Les contraintes de succession de positions s'expriment alors via une formulation Big-M avec les variables  $y_{i,o}$  et le critère devient  $\sum_{i=1}^N \sum_{b \in \mathcal{B}_{cat}} x_{i,b} C_b + \sum_{i=1}^{N+1} C\ell_i$ .

## 4 Conclusions et perspectives

Les deux approches, testées sur des cas industriels simples ( $N \leq 5$ ), permettent d'obtenir une route optimale de la canalisation respectant l'orientation de destination ainsi que les coudes du catalogue. Toutefois, on constate que les deux méthodes sont sensibles à l'augmentation du nombre de coudes, bien que l'approche MILP soit plus robuste que l'approche combinée. Malgré cette sensibilité, ces approches peuvent être utilisées de manière efficace sur des cas simples en vérifiant a posteriori les conflits avec les obstacles environnants.

## Références

- [1] Chin Yang Lee *An algorithm for path connections and its applications*. IRE transactions on electronic computers, 1961.
- [2] R. Guirardello and R. E. Swaney *Optimization of process plant layout with pipe routing*. Computers & chemical engineering, 2005.
- [3] David W. Hightower *A solution to line-routing problems on the continuous plane*. Proceedings of the 6th annual Design Automation Conference, 1969.
- [4] Benachir Medjdoub and Gang Bi *Parametric-based distribution duct routing generation using constraint-based design approach*. Automation in Construction, 2018.