

RECHERCHE LOCALE POUR LA PLANIFICATION DE CHEMINS DE COUVERTURE

Séminaire – Doctorat en informatique

Présenté par **Dominik Richard**
28 février, Université Laval

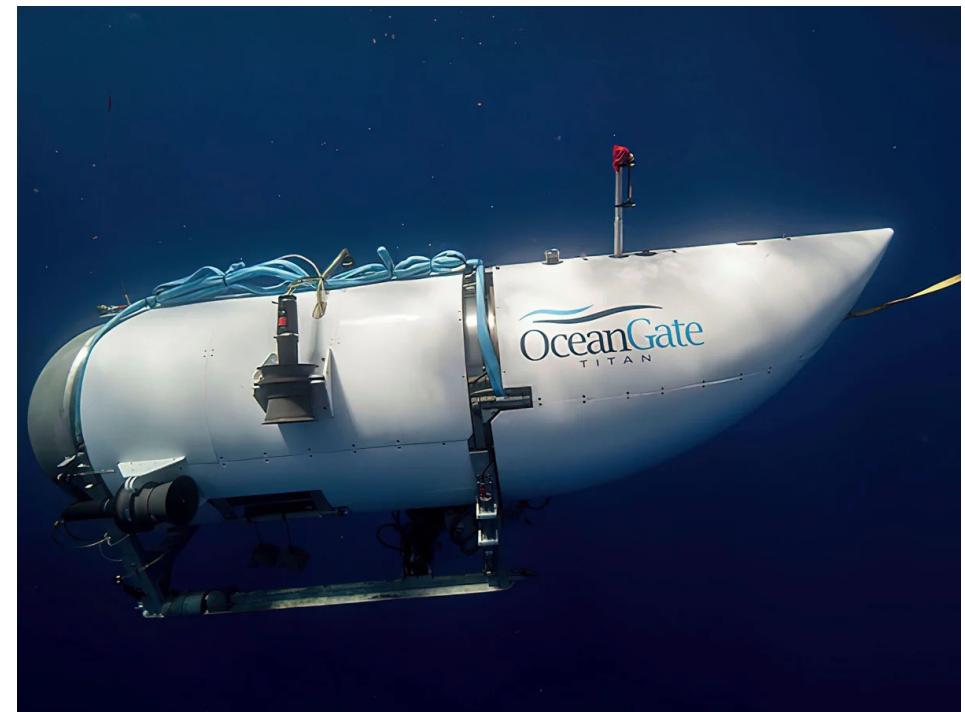




Théorie de la recherche optimale



- Recherche opérationnelle
- Planification d'une densité d'effort de recherche
- Planification d'un chemin de recherche





Théorie de la recherche optimale



Connaissance à priori

- Probabilité de contenir
- Modèle de mouvement
- Analyse subjective



Fonction de détection



Contraintes physiques

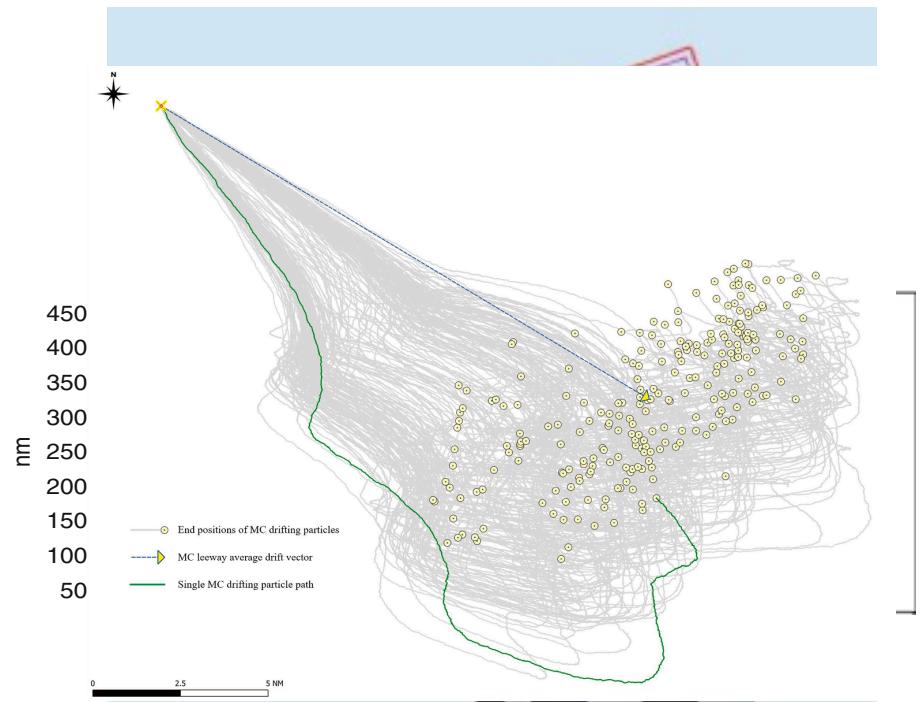
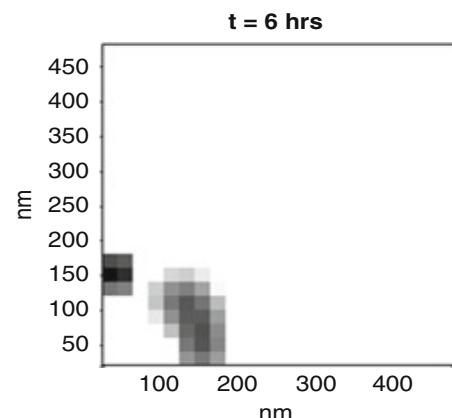


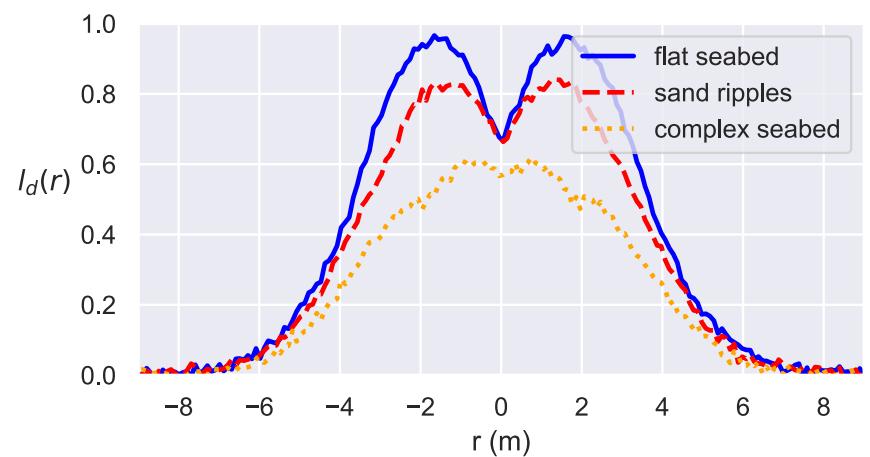
Fig. 3.1 Target location distributions – *dark cells* indicate high probability



Théorie de la recherche optimale



- Connaissance à priori
- Fonction de détection
 - Lateral range curve
 - Patron de recherche
- Contraintes physiques





Théorie de la recherche optimale



Connaissance à priori

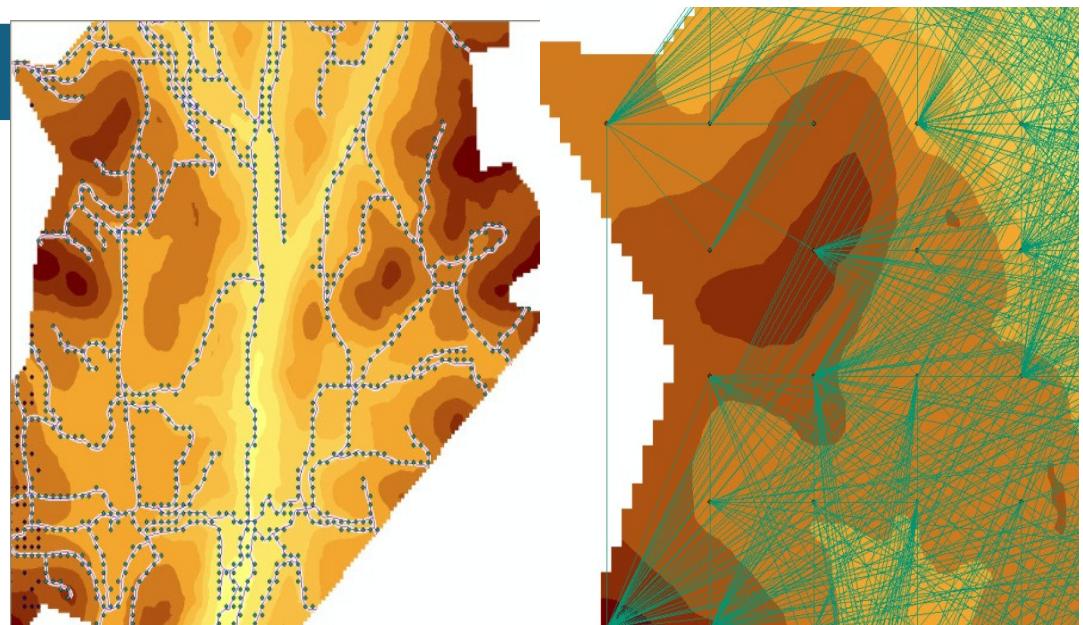


Fonction de détection



Contraintes physiques

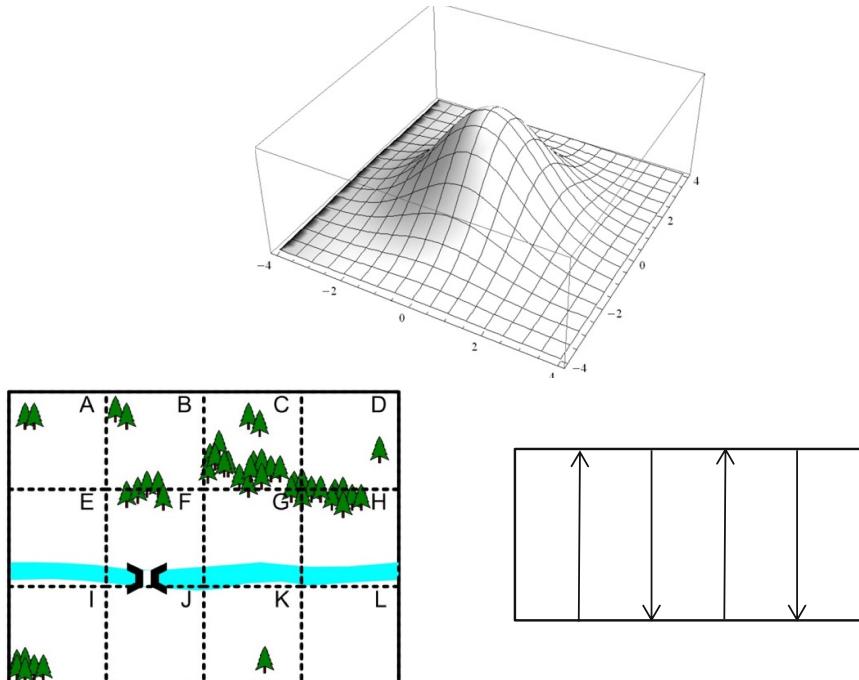
- Graphe d'accessibilité
- Graphe de visibilité



Abi-Zeid, I., Morin, M., & Nguyen, T. T. (2011). Vers une planification multicritère dans le cadre de missions de recherche et sauvetage terrestres.

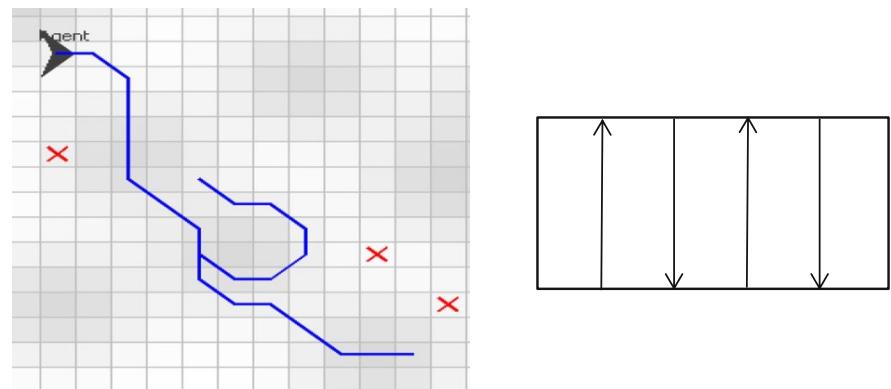


Densité d'effort de recherche



Stone, L. D., J. O. Royset and A. R. Washburn (2016). Optimal Search for Moving Targets.

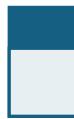
Recherche contrainte par le chemin



Berger, J., M. Barkaoui and N. Lo (2021). Near-optimal search-and-rescue path planning for a moving target.



Planif
mines



Cou
l'en

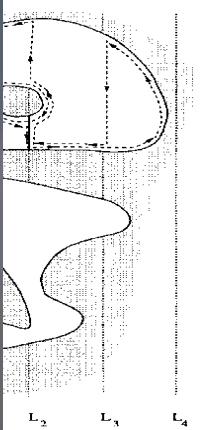


Pla



Mir

H. Choset. (

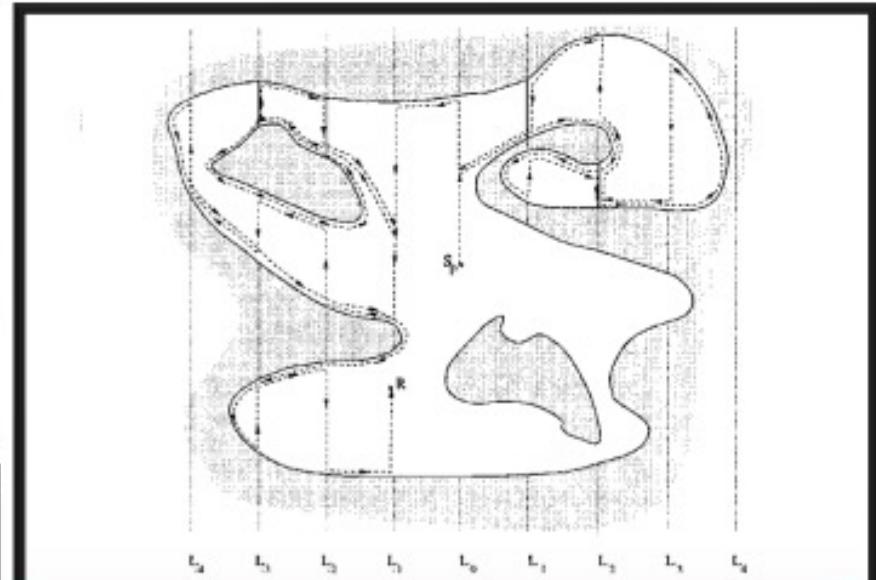




The new task force, made up of Bulgarian, Romanian, and Turkish vessels, will face several challenges with the massive amounts of mines spread across the region



NATO allies will establish an additional mine-sweeping naval force for the Black Sea

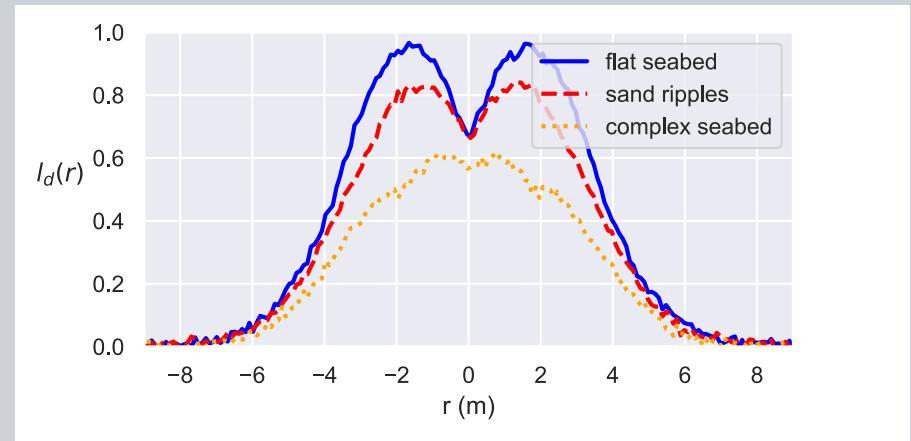
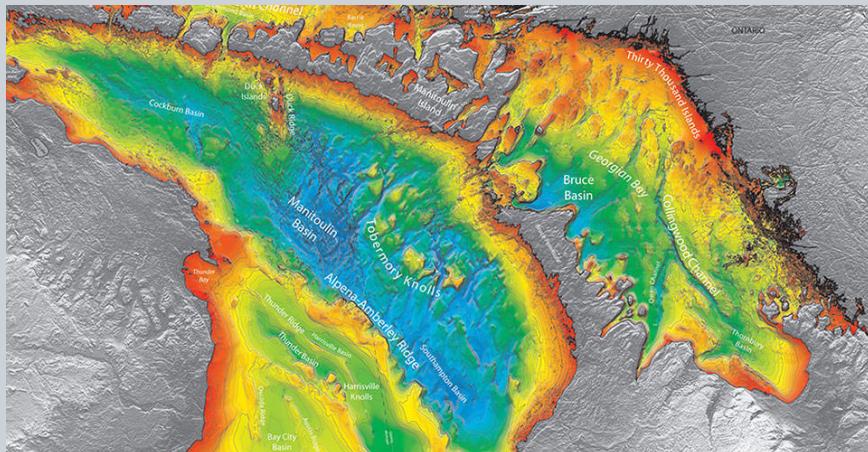


« Naval mines will remain a threat even after hostilities in Ukraine end, and Turkey and its fellow Black Sea neighbors will have to conduct massive mine-clearing operations eventually. »
(Middle East Institute, 2024)

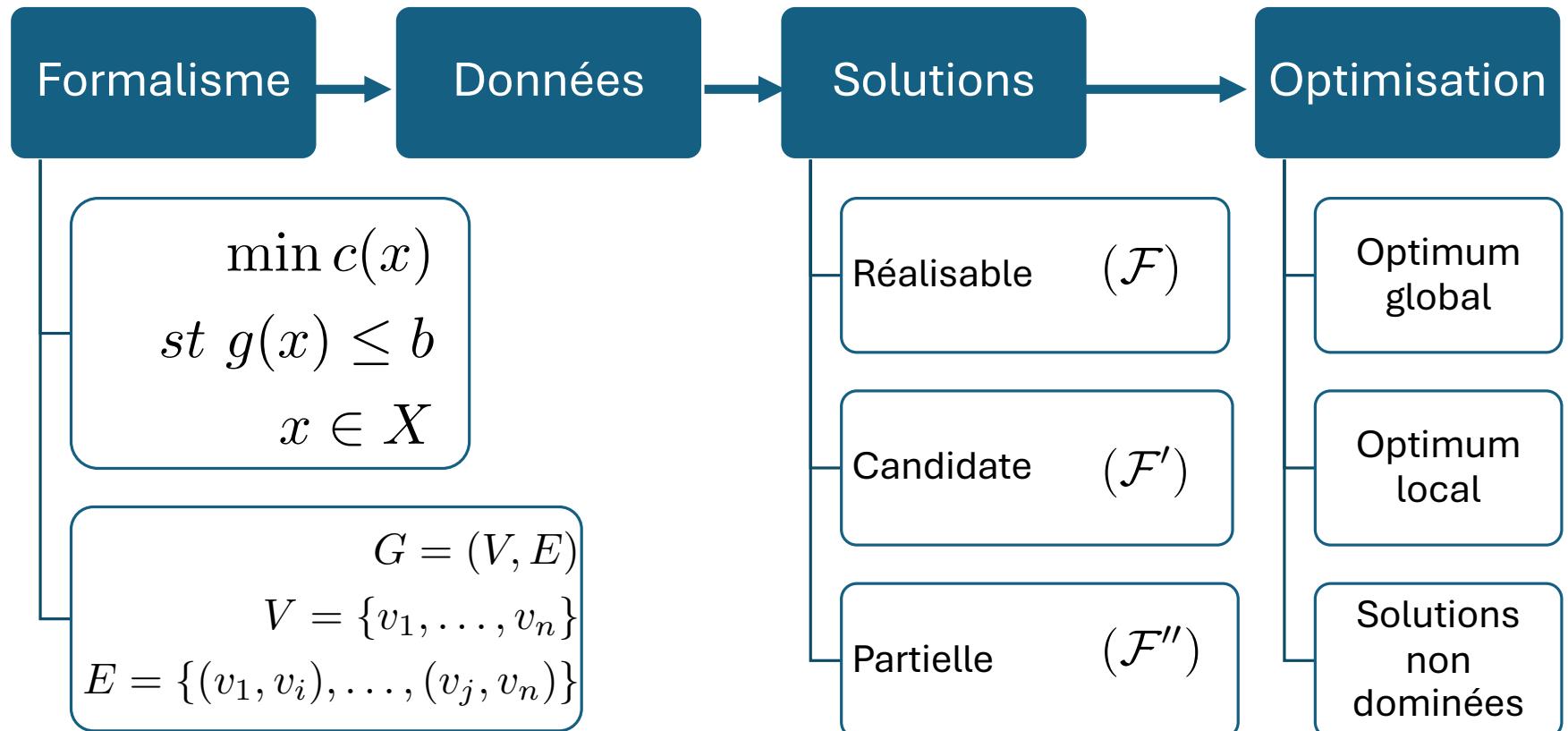


Planification de chemin de couverture pour les opérations de déminage

Données en entrée



Objectif stratégique: Minimiser le temps et les coûts opérationnels.





Heuristique de perturbation

- Modification des composantes de solution

Heuristique de construction

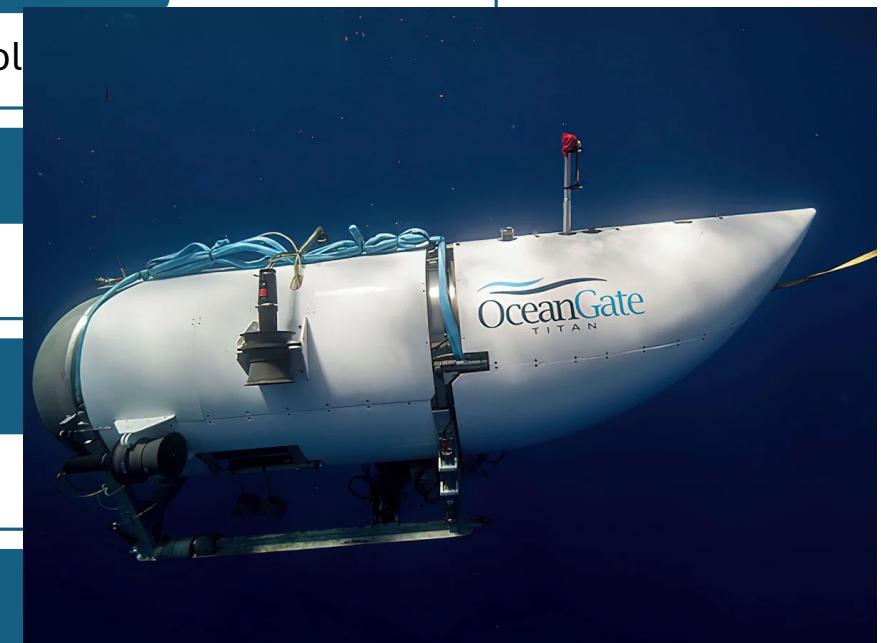
- Ajout de composantes de solution

Recherche systématique

- Méthode complète

Recherche locale

- Méthode incomplète - *any-time*





Heuristique de perturbation

- Modification des composantes de solution

Heuristique de construction

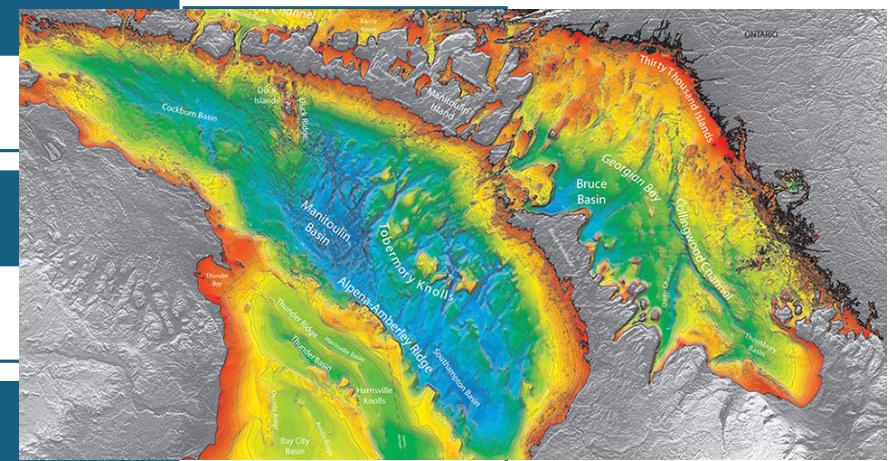
- Ajout de composantes de solution

Recherche systématique

- Méthode complète

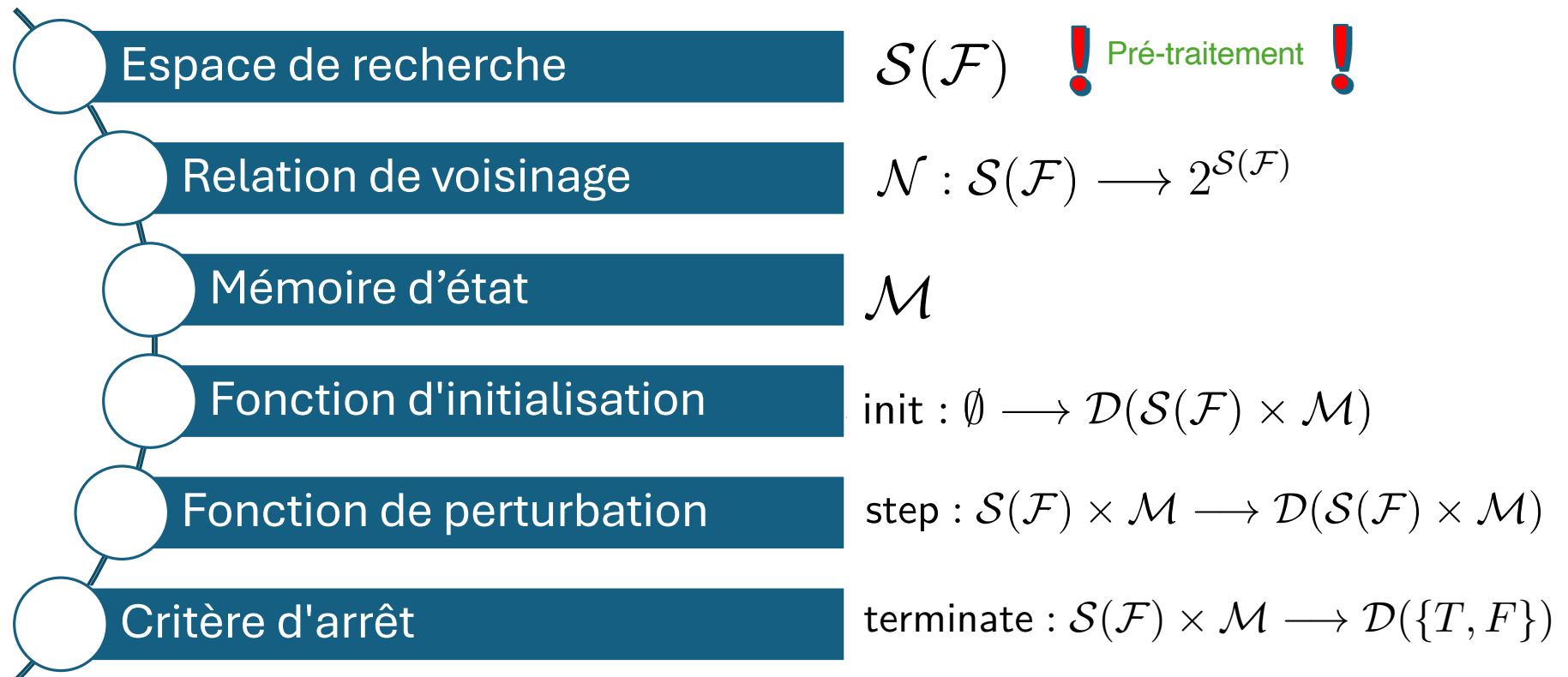
Recherche locale

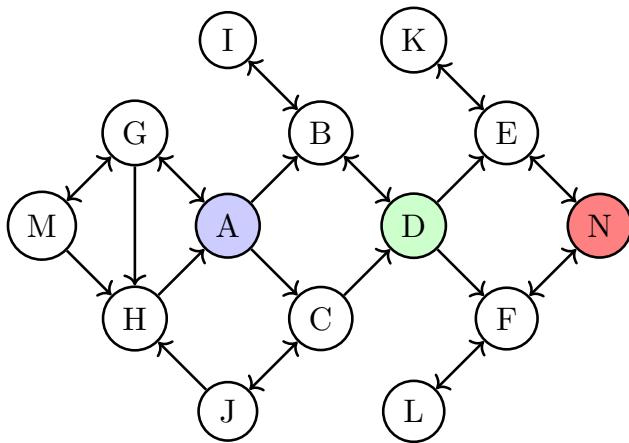
- Méthode incomplète - *any-time*



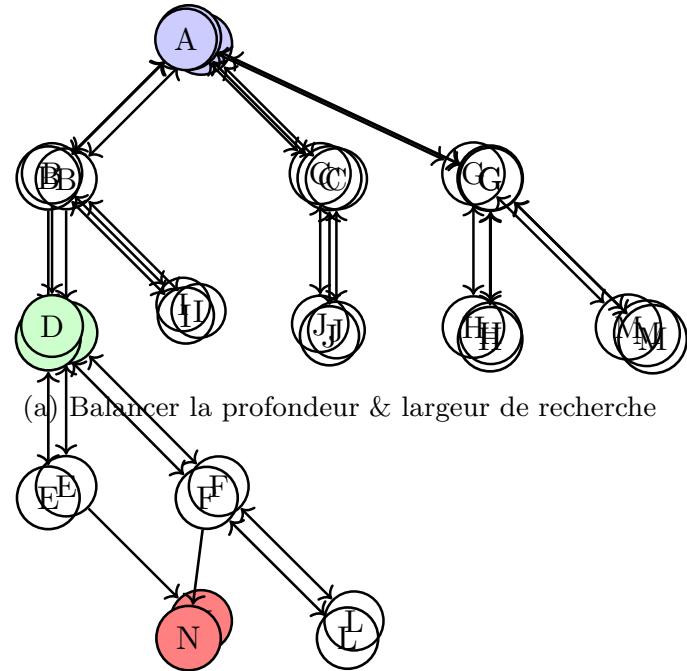


Algorithme de recherche locale stochastique





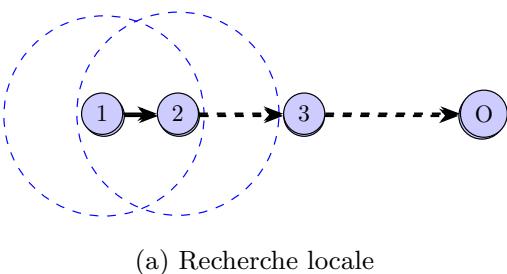
(a) Graphe de voisinage



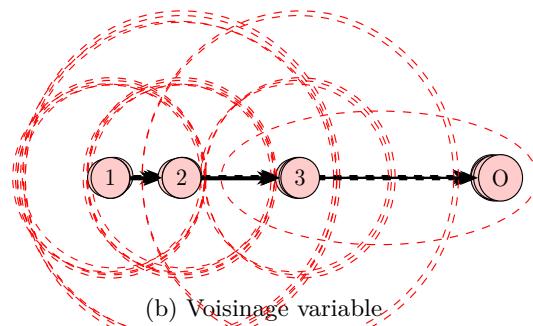
(b) Maintenir sur le trajet de l'exploration de la recherche pour les calculs de bornes, pénalisation, la mémoire d'état, etc...



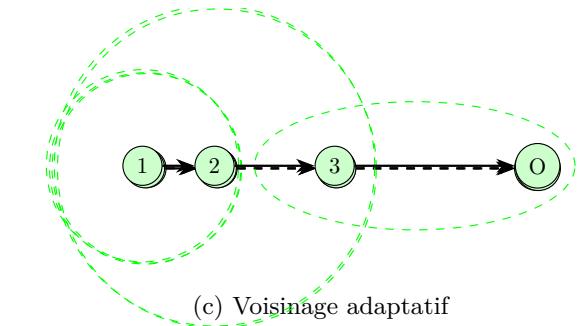
Recherche locale à voisinage variable et adaptatif



(a) Recherche locale



(b) Voisinage variable



(c) Voisinage adaptatif



Recuit simulé

Rappel: Fonction de perturbation

$$\text{step} : \mathcal{F} \times \mathcal{M} \longrightarrow \mathcal{D}(\mathcal{S}(\mathcal{F}) \times \mathcal{M})$$

Propriété de Markov

$$Pr\{X_{t+1}|X_t, X_{t-1}, \dots, X_0\} = Pr\{X_{t+1}|X_t\} \quad \text{POUR TOUT } t \in \{1, \dots, \mathcal{T}\}$$

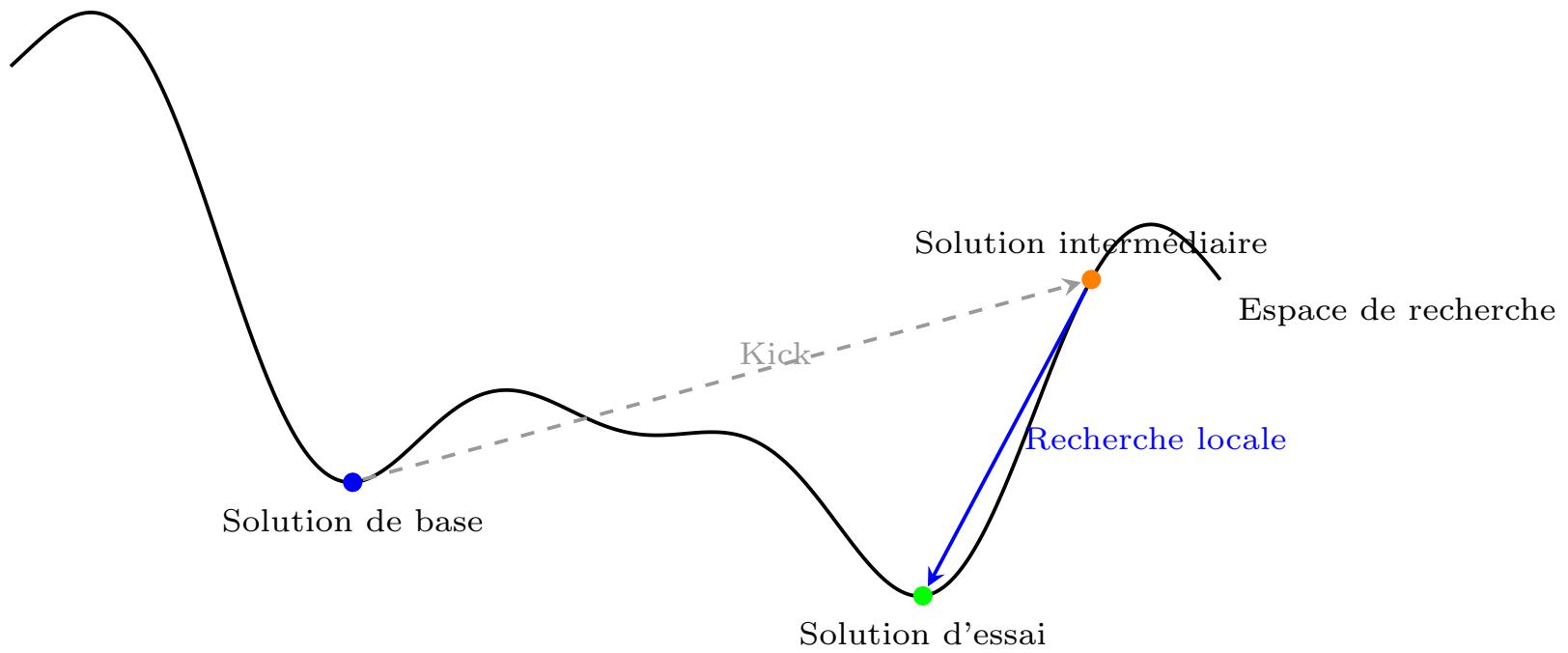
Recuit simulé

Γ_{ij} : Probabilite de transition de f_i vers f_j c : fonction de cout
 $T(t)$: Temperature au temps t \mathcal{N} : Voisinage

Processus de Markov du **recuit simulé**

$$Pr\{X_{t+1} = f_j | X_t = f_i\} = \Gamma_{ij} \exp \left[-\frac{1}{T(t)} \max\{0, c(f_j) - c(f_i)\} \right] , \quad f_j \in \mathcal{N}(f_i)$$

Recherche locale chainée



Heuristique LKH

132.203.227.62 on Fri, 14 Jun 2024 16:23:33 +00:00
All use subject to <https://about.jstor.org/terms>

406

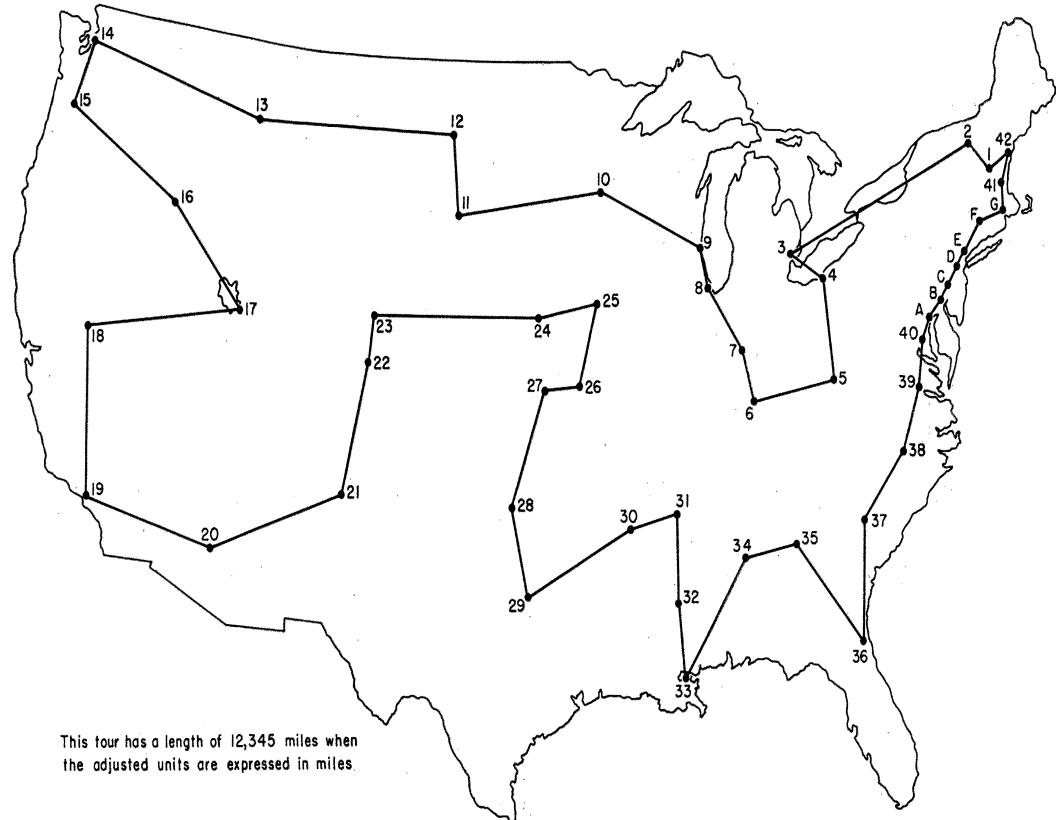


FIG. 16. The optimal tour of 49 cities.

G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson. (1954) Solution of a large-scale traveling-salesman problem.



Le problème du commis voyageur (TSP)

Formalisme

Let $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$

$$\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$$

$$\mathcal{E} = \{(v_1, v_1), (v_1, v_3), \dots, (v_{n-1}, v_n)\}$$

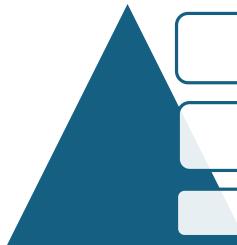
$$c : \pi_f \longrightarrow \sum_{i=1}^n d_{i\pi_f(i)}$$

Données

$$D = [d_{ij}] \in \mathbb{N}^{n \times n}$$

Solutions réalisables (\mathcal{F})

Cycles hamiltoniens



Concorde

Recherche locale

Approximations



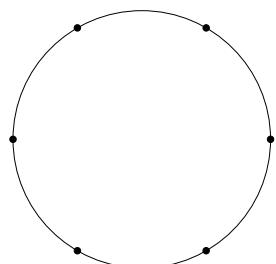


Heuristique de Lin (L)

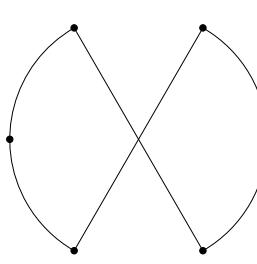
Voisinage k-exchange

$\mathcal{N}_k(\pi_f) = \{\pi_g : \pi_g \in \mathcal{F} \text{ et } \pi_g \text{ peut être obtenu en retirant } k \text{ arcs de la tournée et les remplaçant par } k \text{ autres arcs}\}$

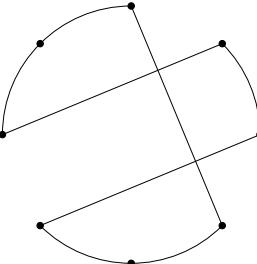
Heuristique de perturbation K-Opt



(a) Cycle réalisable



(b) 2-exchange



(c) 3-exchange

Heuristique de Lin-Kernighan (LK)

Recherche en profondeur

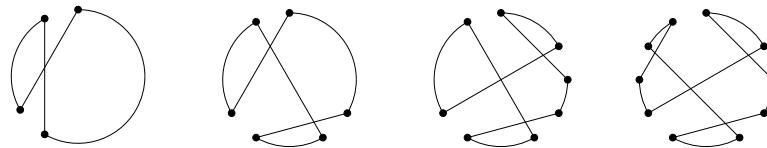


Figure 1: 2-exchange sequentiel (5-exchange)

Voisinage variable

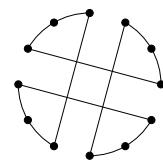


Figure 2: 4-exchange non-sequentiel (double bridge)

Méthode de recherche

Recherche en profondeur

Retours arrière

Voisinage variable

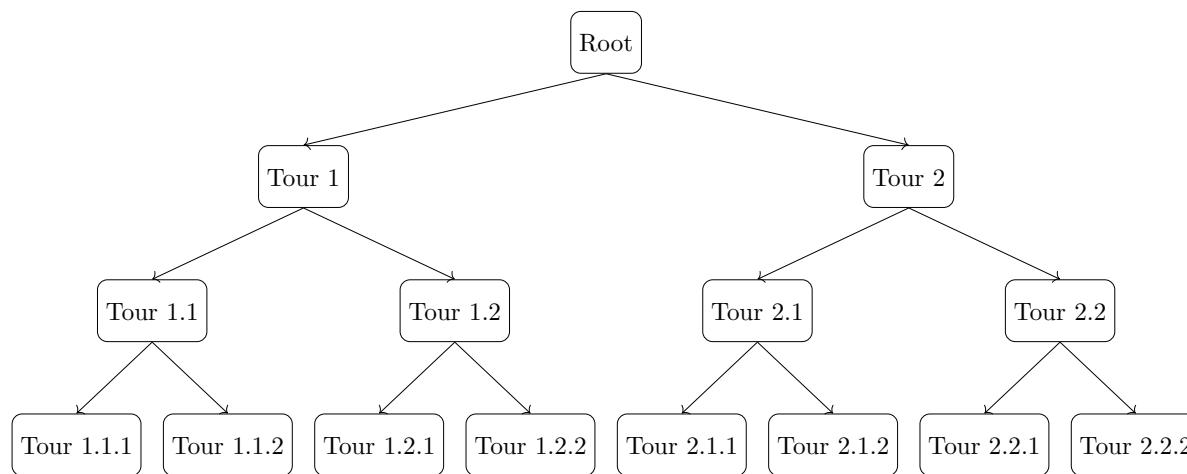
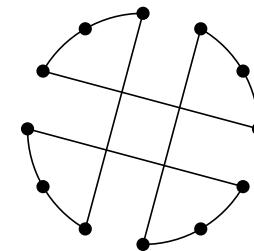
Populations de solutions



Heuristique chainée de Lin-Kernighan (CLK)

Recherche locale chainée: Pige d'une nouvelle solution grâce à un kick.

- Dans quel voisinage piger la solution?
- Quelle stratégie de pige utiliser?
- Comment balancer la largeur et la profondeur?





Heuristique de Lin-Kernighan-Helsgaun (LKH)

Stratégies de recherche de voisinage

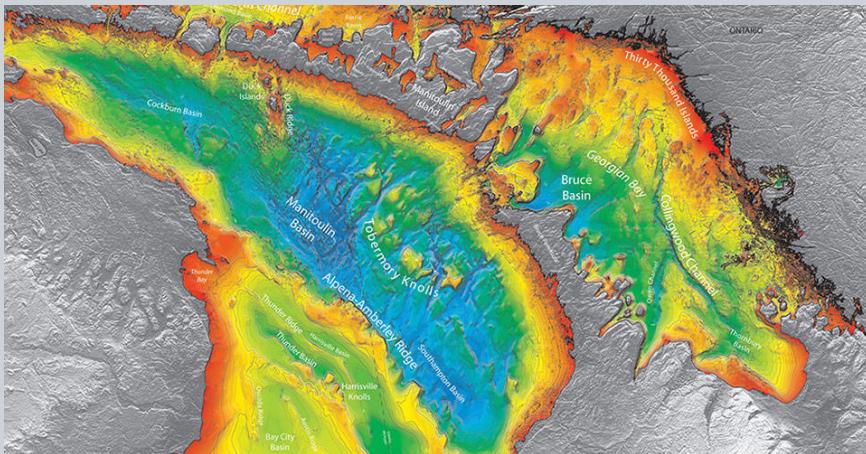
- Voisinage adaptatif: k-exchanges non-séquentiels
- Calcul de bornes: I-tree
- Mémoire \mathcal{M} : Liste des candidats (population) et échange d'information (crossovers)

Solution optimale à toutes les instances dont la solution optimale est connue (**tspLIB**)



Planification de chemin de couverture pour les opérations de déminage

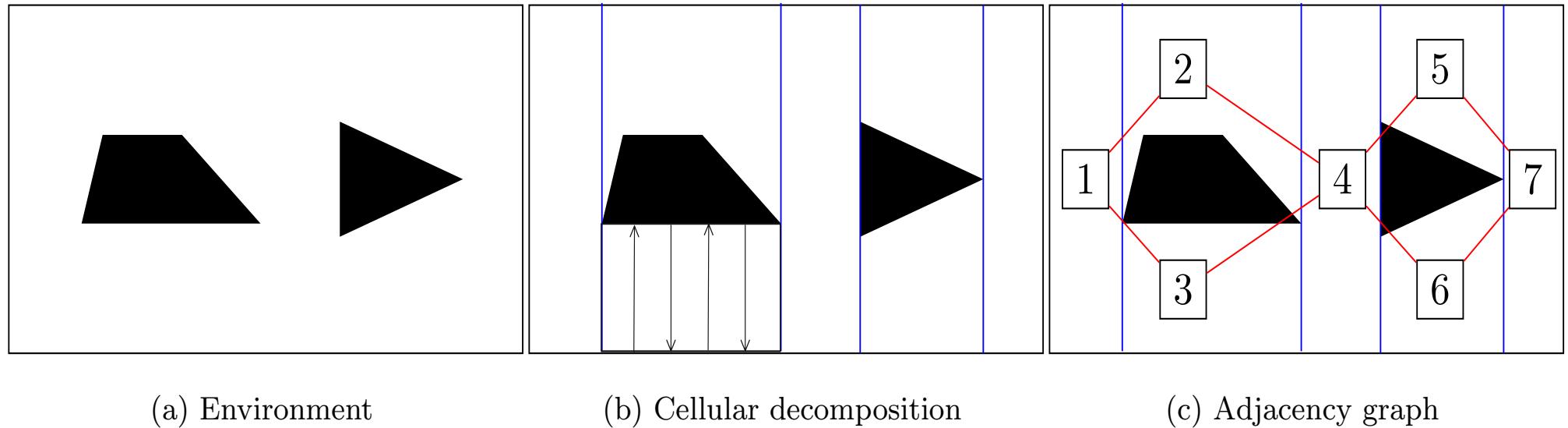
Données en entrée



Objectif stratégique: Minimiser le temps et les coûts opérationnels.



Planification de chemin de couverture pour les opérations de déminage



(a) Environment

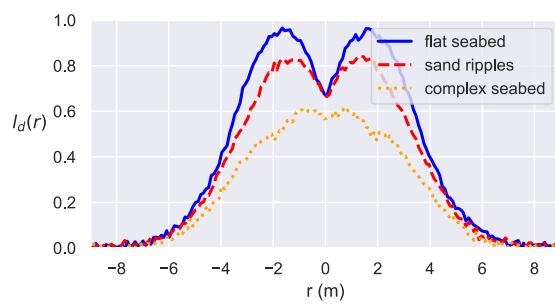
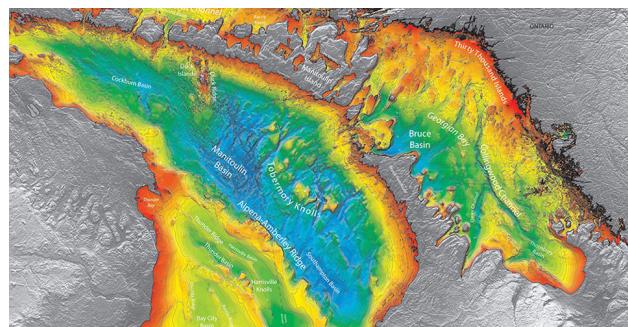
(b) Cellular decomposition

(c) Adjacency graph

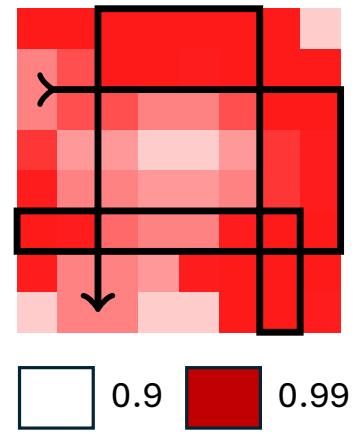
Figure 1: Boustrophedon decomposition



Problème de planification de chemin de couverture avec couverture étendue imparfaite (CPPIED)



1	1	1	1	1	1	1	1	2
2	2	1	1	2	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	1	1	1	2

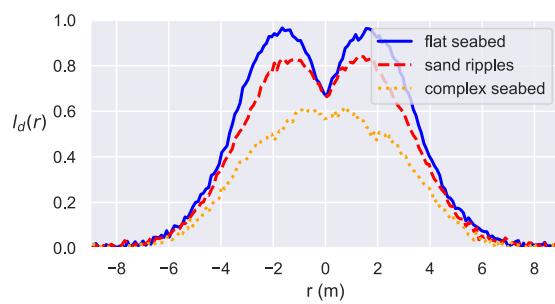
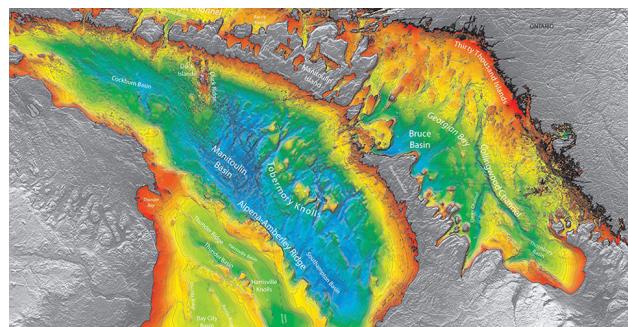


$$\mathcal{P} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.9 \\ 0.8 & 0.7 \\ 0.64 & 0.55 \end{bmatrix}$$

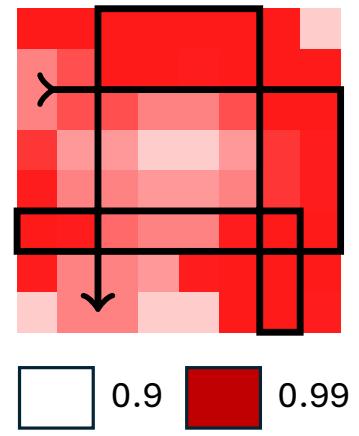
1^{er} Objectif: Minimiser la longueur du chemin d'un robot REMUS100 pour satisfaire une probabilité de détection minimale sur l'ensemble de l'environnement.



Problème de planification de chemin de couverture avec couverture étendue imparfaite (CPPIED)



1	1	1	1	1	1	1	1	2
2	2	1	1	2	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	1	1	1	2



$$\mathcal{P} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.9 \\ 0.8 & 0.7 \\ 0.64 & 0.55 \end{bmatrix}$$

2^e Objectif: Minimiser le nombre de virages du robot.



Problème de planification de chemin de couverture avec couverture étendue imparfaite (CPPIED)

Données

1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
2	2	1	1	2	1	1	1	1	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	3	3	3	3	3	3	3	2	
2	3	3	3	3	3	3	3	2	
2	3	3	3	3	3	3	3	2	
2	3	3	3	3	3	3	3	2	
2	3	3	3	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	1	1	1	2	

$$\mathcal{P} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.9 \\ 0.8 & 0.7 \\ 0.64 & 0.55 \end{bmatrix}$$

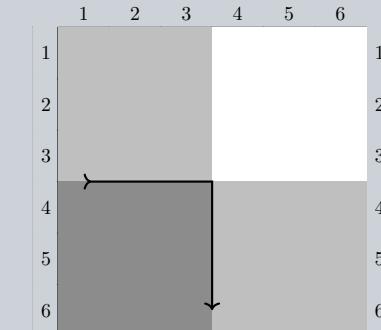
$$\mathbf{D} \in (0, 1)^{m \times n}$$

$\mathcal{F} = \{\text{Toutes les séquences } S_p = (s_{p_1}, \dots, s_{p_n}) \text{ de positions sur la grille,}$

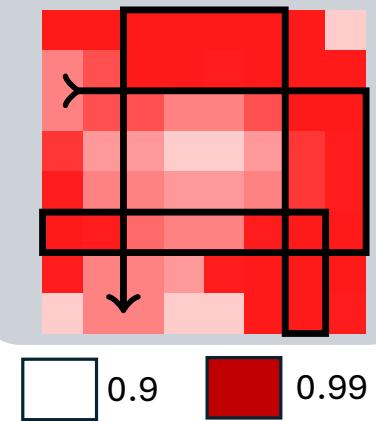
$$\sum_{k=1}^n p_{\text{scan}}(s_{p_k}, (i, j)) \prod_{l=1}^k (1 - p_{\text{scan}}(s_{p_l}, (i, j))) \geq \mathbf{D}_{ij} \quad \forall 1 \leq i, j \leq m, n\}$$

$$c : S_p \longrightarrow \sum_{j=1}^{n-1} d_{s_{p_k} s_{p_{k+1}}}$$

Solution partielle



Solution réalisable



0.9



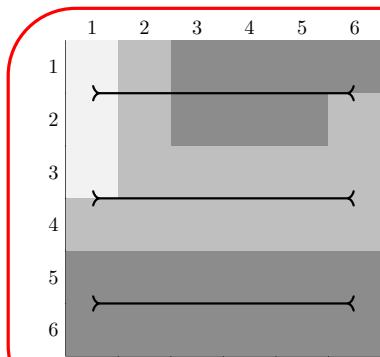
0.99



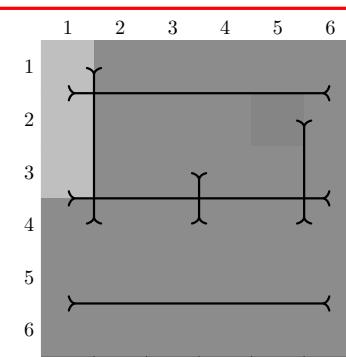
Dynamic programming sweeper (DpSweeper)

	1	2	3	4	5	6
1	c_3	r_2	f_1	f_1	f_1	f_1
2	c_3	r_2	f_1	f_1	f_1	r_2
3	c_3	r_2	r_2	r_2	r_2	r_2
4	r_2	r_2	r_2	r_2	r_2	r_2
5	f_1	f_1	f_1	f_1	f_1	f_1
6	f_1	f_1	f_1	f_1	f_1	f_1

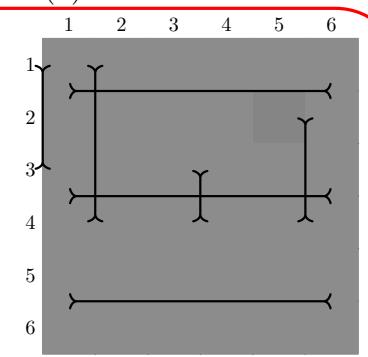
(a) Environnement \mathbf{O}



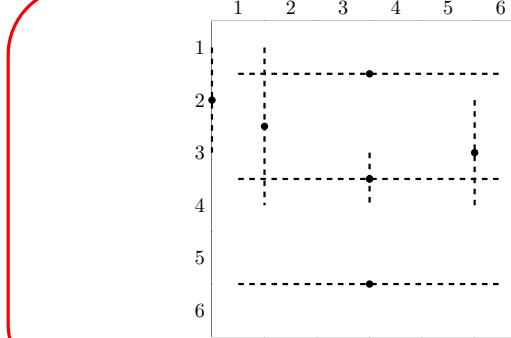
(b) Trois segments H



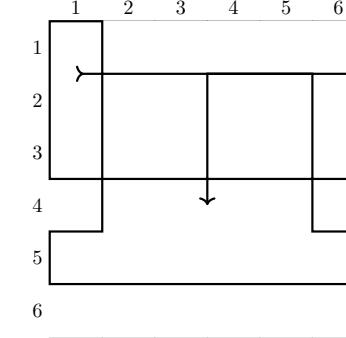
(c) Trois segments V



(d) Un segment V



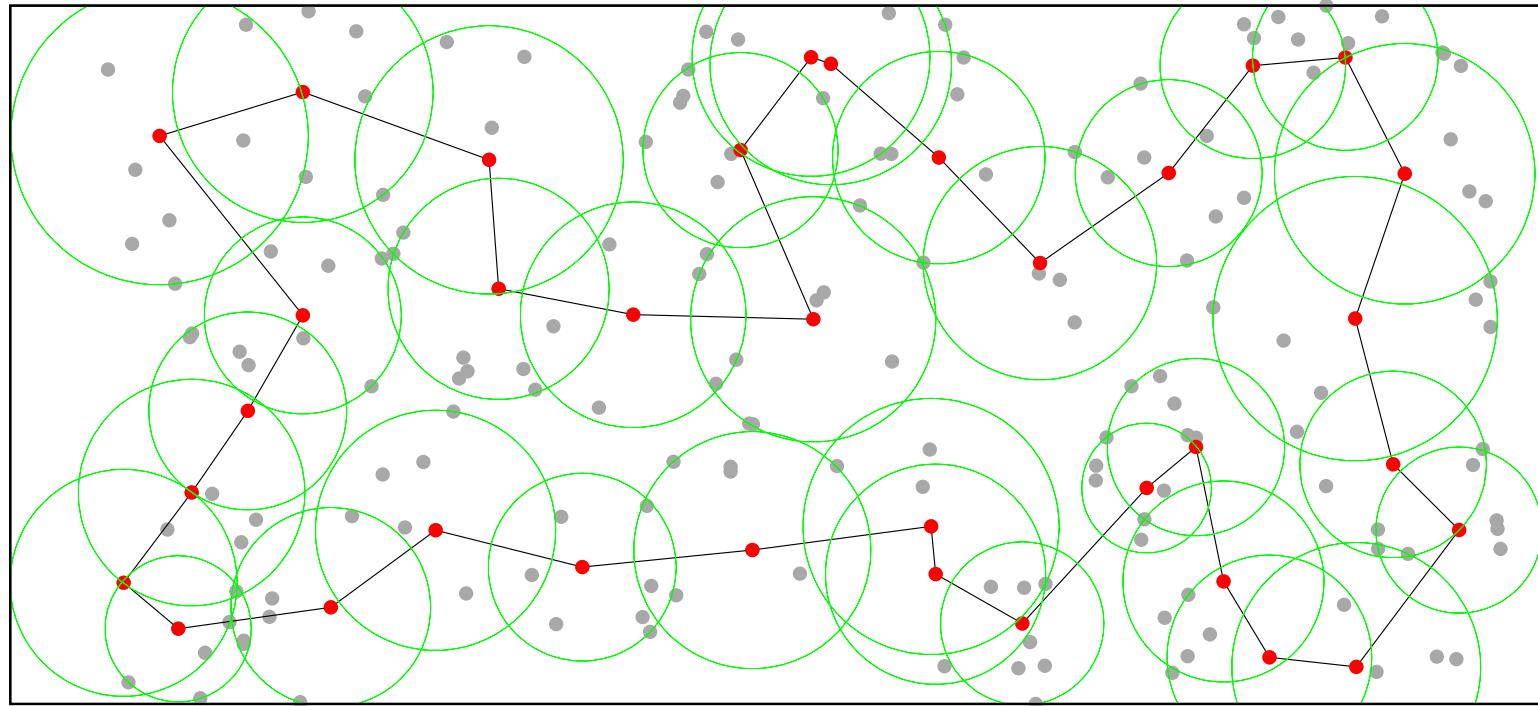
(e) Réduction au TSP



(f) Chemin réalisable S_p



Covering salesman problem





Heuristique de recherche locale LS2

Voisinage variable

Extraction-Insertion

2-exchanges

LKH

Stratégies de recherche

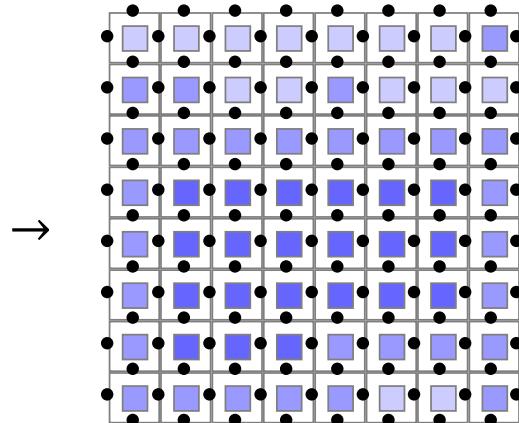
Vorace

Kicks aléatoires



Recherche locale pour la planification de chemin de couverture avec visibilité étendue imparfaite (CPPIED)

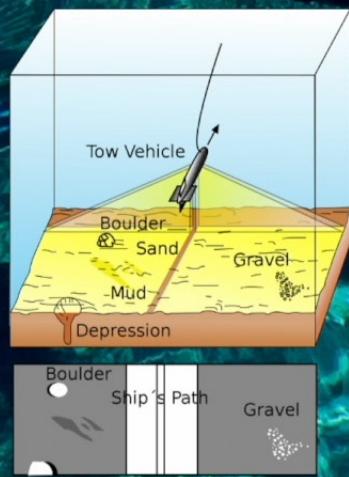
1	1	1	1	1	1	1	1	2
2	2	1	1	2	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	2
2	3	3	3	3	2	2	2	2
2	2	2	2	2	1	1	1	2



→ Appliquons LS2! → Mais...

Notre adaptation de LS2 consiste en:

- Identification des mauvaises trajectoires de recherche de solution à temps constant.
- Facteurs aléatoires basé sur un ratio de sur-couverture pour accélérer la recherche.
- Méthode de réduction au commis voyageur encodant les contraintes de direction pour 2-opt et LKH.

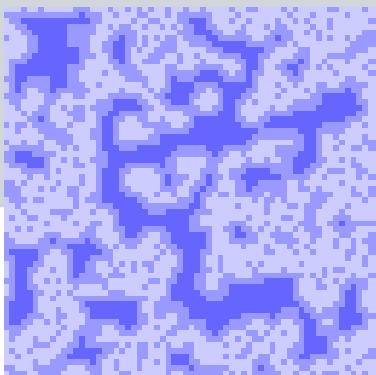




Expérimentations et résultats

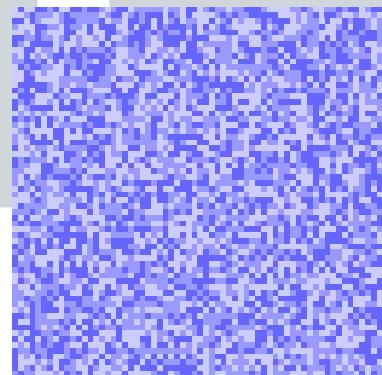
Données

- 236 instances tests
- Générateur aléatoire
- Structurée - Bruit



Initialisation (DpSweeper)

- Solveur Concorde
- Chained Lin-Kernighan (CLK)
- Nearest neighbor (NN)
- 3-opt



Configuration d'algorithme

- 36 instances de configuration
- | | |
|---------------|---------------------------------|
| ϵ | 0.5 |
| I | 150 |
| k_i | $\mathcal{W}^2 + \mathcal{W}/2$ |
| \mathcal{W} | $d/3$ |
| k_p | 15 |

Table 1: Mean relative cost difference between DpSweeper and our LS2 with standard deviation (SD) and init. time in seconds w.r.t. to different data groups and initialization tsp algorithm

Initializer	n	Mean rel. diff. (SD) (%)			
		Cost	Moves	Turns	T_{init} (sec)
<i>Structured test instances</i>					
Concorde [†]	16	-26(8)	-26(8)	3(21)	< 1
	64	-18(5)	-18(5)	25(14)	27(93)
	128	-17(6)	-18(6)	36(11)	328(770)
NN	16	-25(8)	-26(7)	15(27)	< 1
	64	-17(6)	-17(6)	45(19)	< 1
	128	-15(7)	-16(7)	58(12)	< 1
3-opt	16	-25(7)	-25(7)	-2(19)	< 1
	64	-18(5)	-18(5)	30(17)	< 1
	128	-15(7)	-16(7)	50(11)	11(22)
CLK	16	-26(8)	-26(8)	-5(19)	< 1
	64	-18(5)	-18(5)	24(13)	< 1
	128	-17(6)	-17(6)	33(11)	4(4)

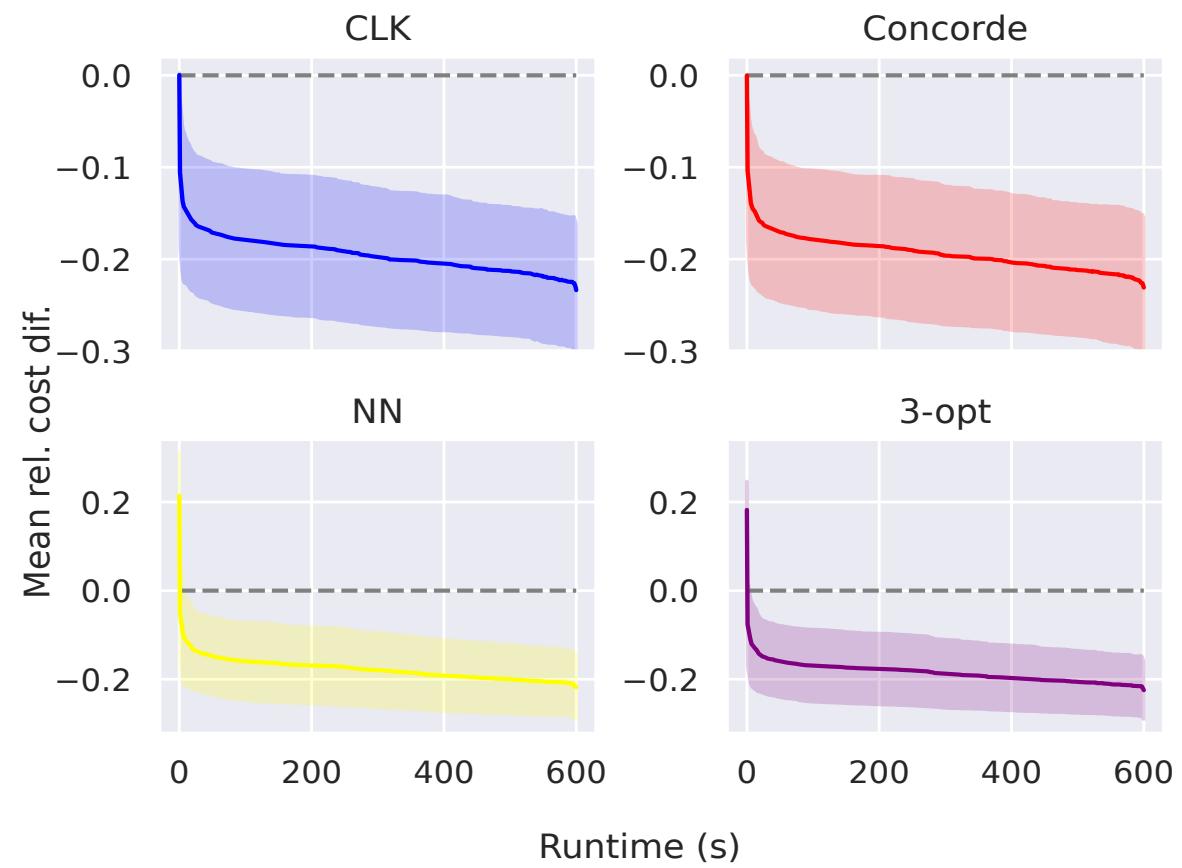


Table 1: Mean relative cost difference between DpSweeper and our LS2 with standard deviation (SD) and init. time in seconds w.r.t. to different data groups and initialization tsp algorithm

Initializer	<i>n</i>	Mean rel. diff. (SD) (%)			
		Cost	Moves	Turns	T_{init} (sec)
<i>Noisy test instances</i>					
Concorde†	16	-27(8)	-27(8)	0(21)	< 1
	64	-21(4)	-21(4)	57(27)	160(500)
	128	-19(6)	-19(6)	71(27)	770(2055)
NN	16	-26(6)	-27(6)	12(20)	< 1
	64	-20(5)	-21(5)	74(25)	< 1
	128	-16(6)	-17(6)	109(22)	< 1
3-opt	16	-26(7)	-26(7)	3(17)	< 1
	64	-20(6)	-21(6)	67(17)	2(4)
	128	-18(6)	-18(6)	83(23)	10(15)
CLK	16	-27(7)	-27(7)	2(24)	< 1
	64	-21(5)	-21(6)	55(33)	1(2)
	128	-18(6)	-19(6)	71(26)	4(4)

† For 3 instances, Concorde took more than 10 minutes to find an initial solution.

‡ For 9 instances, Concorde took more than 10 minutes to find an initial solution.



Local Search for Coverage Path Planning with Imperfect Extended Detection

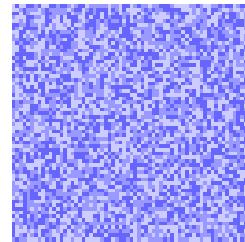
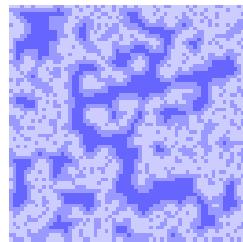
Dominik Richard^a, Michael Morin^b, Claude-Guy Quimper^a

^a*Department of Computer Science and Software Engineering, Université Laval, 1045, avenue de la Médecine, Québec, G1V 0A6, Québec, Canada*

^b*Department of Operations and Decision Systems, Université Laval, 1045, avenue de la Médecine, Québec, G1V 0A6, Québec, Canada*

Instances et code source

https://github.com/doric35/cppied_ls2



Portée de la recherche

- Dominik Richard, Michael Morin, Claude-Guy Quimper (2025),
Local Search for Coverage Path Planning with Imperfect
Extended Detection
(Will be submitted for review to EJOR)
- Dominik Richard, Michael Morin, Claude-Guy Quimper (2024),
Local Search for Coverage Path Planning with Imperfect
Extended Detection
(Presented at *Optimization days 2024*)



Centre de recherche en modélisation, information et décision



Perspectives de recherche

- Intégration des faux positifs dans le modèle: sensitivity vs specificity
- Traiter d'autre familles de problème, e.g. Next best view.
- Intégration de la visibilité non uniforme en recherche optimale.
- Généralisation de LKH aux problèmes de recherche optimale.
- Formulation multi-chercheurs.
- ...

Take Home

- Utilisation de LKH pour la résolution de sous-problèmes de planification.
- Les problèmes de tournées de véhicule, de recherche optimale et de planification de chemin de couverture ont beaucoup en commun.
- La recherche locale est bien adaptée aux problèmes de grande taille.

International Series in
Operations Research & Management Science

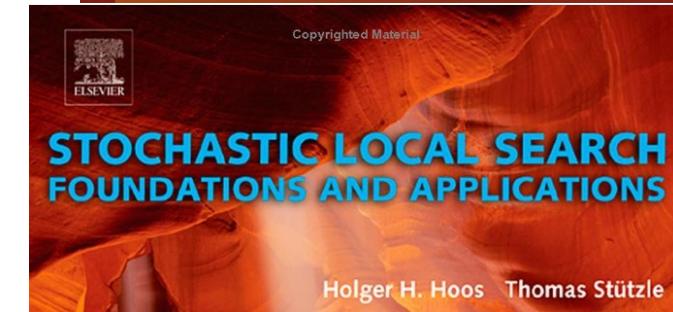
Lawrence D. Stone
Johannes O. Royset
Alan R. Washburn

Optimal Search for Moving Targets



EXTRAS ONLINE

Springer



CERMID

Centre de recherche en modélisation, information et décision

UNIVERSITÉ
LAVAL

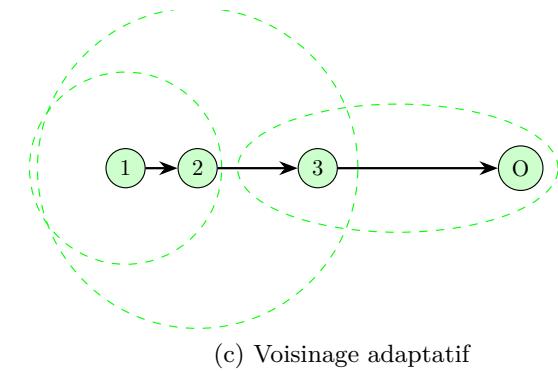
Matériel supplémentaire





Recherche locale à voisinage variable et adaptatif

	Critères de voisinage
Heuristique	2
Temps de recherche	t_2
Ratio d'optimalité	p_2
Objectif	$(1 - p_i)^{t/t_i}$



(c) Voisinage adaptatif

Recherche locale à voisinage large



Taille de voisinage

$$g(n) = \max\{|\mathcal{N}(f)| : \mathcal{F} \in \mathcal{F}_n, f \in \mathcal{F}\}$$

Voisinage large*

$$\nexists k \in \mathbb{N} : g(n) \in \mathcal{O}(n^k)$$

*Similaire à la définition associé à la recherche locale à voisinage très large de la littérature



$$\text{poc}(j, t) = \sum_{i \in \mathcal{R}} \Gamma_{ji} [\text{poc}(i, t-1) - \text{pos}(i, t-1)]$$

$$\text{pos}(j, t) = \text{pod}(j, t) \times \text{poc}(j, t)$$

$\mathcal{F} = \{\text{Toutes les séquences de cellules formant un chemin}$

S_p sur l'environnement de recherche}

$$c : S_p \longrightarrow \sum_{t \in \mathcal{T}} \text{pos}(s_{p_t}, t)$$

Données

$$\mathcal{R} = \{1, \dots, N\} \quad \mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$$

$$POD_t \quad \Gamma = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 & 0.3 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{pmatrix}$$



$$\mathbf{POC}_t = [\mathbf{POC}_{t-1} - \mathbf{POS}_{t-1}] \Gamma^\top$$

$$\mathbf{POS}_t = \mathbf{POD}_t \odot \mathbf{POC}_t$$

\mathcal{F} = {Toutes les séquences de cellules formant un chemin

S_p sur l'environnement de recherche}

$$c : S_p \longrightarrow \sum_{t \in \mathcal{T}} \mathsf{pos}(s_{p_t}, t)$$

Données

$$\mathcal{R} = \{1, \dots, N\} \quad \mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{POD}_t &= \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 & 0.3 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{pmatrix} \\ \mathbf{POC}_0 &= \Gamma = \end{aligned}$$



Problème du chemin de recherche optimal (OSP)

Données

$$\mathcal{R} = \{1, \dots, N\}$$

$$\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$$

$$POC_0 \quad POD_t$$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 & 0.3 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{pmatrix}$$

Solution

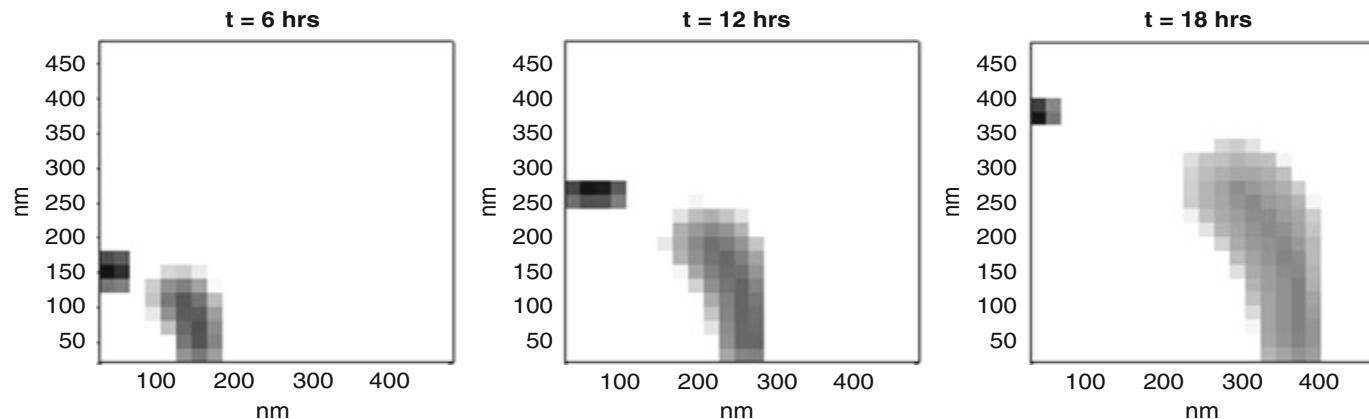


Fig. 3.1 Target location distributions – *dark cells* indicate high probability

Stone, L. D., J. O. Royset and A. R. Washburn (2016). Optimal Search for Moving Targets.

Berger, J., M. Barkaoui and N. Lo (2021). Near-optimal search-and-rescue path planning for a moving target.



Méthodologie



Branch & Bound

- Adaptation des méthodes de Sato
- Planification par construction de segments



Recherche locale stochastique

- Généralisation de LKH
- Utilisation du B&B dans une recherche à voisinage large



Considération temps de calcul

- Utilisation du GPU pour le calcul du POC



Rappel: Propriété de Markov

$$Pr\{X_{t+1}|X_t, X_{t-1}, \dots, X_0\} = Pr\{X_{t+1}|X_t\} \quad \text{POUR TOUT} \quad t \in \{1, \dots, \mathcal{T}\}$$

Modèle linéaire en espace d'états

$$X_{t+1} = \Gamma X_t$$

$$\text{poc}(j, t) = \sum_{i \in \mathcal{R}} \Gamma_{ji} [\text{poc}(i, t-1) - \text{pos}(i, t-1)]$$

$$\text{pos}(j, t) = \text{pod}(j, t) \times \text{poc}(j, t)$$

$\mathcal{F} = \{\text{Toutes les séquences de cellules formant un chemin } S_p \text{ sur l'environnement de recherche}\}$

$$c : S_p \longrightarrow \sum_{t \in \mathcal{T}} \text{pos}(s_{p_t}, t)$$

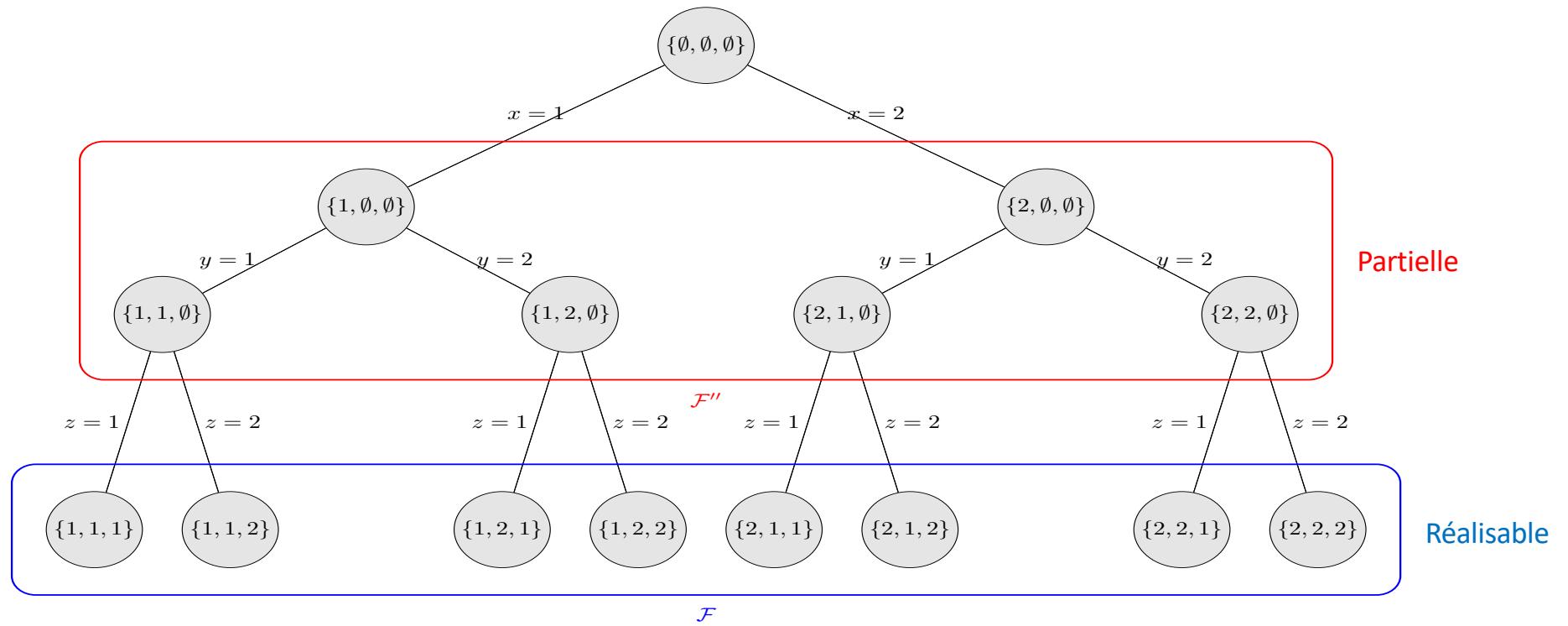
Données

$$\mathcal{R} = \{1, \dots, N\} \quad \mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$$

$$POD_t \quad \Gamma = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 & 0.3 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{pmatrix}$$



Systematic search: Search tree



Vehicle routing problems with spatial coverage (VRPSCOV)



Objective function

Min length ;
Min allocation ;
Max Profit



Coverage

Complete ;
Partial ;
Probabilistic



Graph node types

Actives ;
Passives ;
Mandatory ;
Optionnal



Model features

Discrete ;
Continuous ;
Multi-vehicles