

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Étude et résolution exacte de problèmes de transport à la demande avec qualité de service

Thierry Garaix^{♠♣}, Christian Artigues[◇]
Dominique Feillet[♣], Didier Josselin[♠]

- ♠ UMR ESPACE 6012 CNRS, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
- ♣ LIA, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
- ◇ LAAS, CNRS 7 avenue du Colonel Roche 31077 Toulouse

Plan

- Contexte, objectifs
- Approche de résolution
- Intégration de la QoS dans le sous-problème
- TAD dans le Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Contexte

- Projet pluridisciplinaire en transport
 - 3 applications de transport à la demande (rurale, bout de ligne, rabattement)
 - Pilotage par des géographes
- Mission
 - Étude et intégration de critères de qualité du service dans le calcul des tournées de véhicules
 - Livraison de "l'application rurale"
- Méthode exacte

Plan

→ Contexte, objectifs

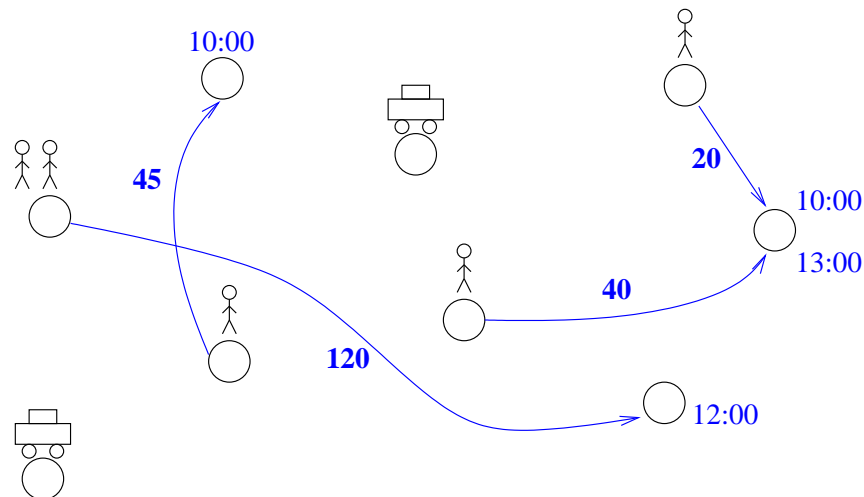
✓ Contexte

- TAD
- DARP

- Résolution
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Transport à la demande (TAD)

- Transporter des passagers d'un point à un autre sous certaines contraintes
- Proposer une méthode de résolution du calcul de tournées
- Analyser l'intégration et le comportement de différents critères de qualité de service



Plan

→ Contexte, objectifs

• Contexte

✓ TAD

• DARP

• Résolution

• Doubs Central

• Conclusion et perspectives

Avantages du TAD

	critère	VP	BUS	TAXI	VÉLO	TAD
U	économique	cher	collectif	cher	sueur	collectif
S	vite	trafic	arrêts	protégé	sueur	protégé
A	loin	choix	fixe	choix	sueur	choix
G	disponible	choix	fixe	réservation	choix	réservation
E	précis	parking	arrêts	choix	vol	choix
R	agréable	conduite	promiscuité	confort	sueur	confort
S	sécuritaire	trafic	pro	pro	fragile	pro
A	économique	contrôle	remplissage	privé	privé	modulable
O	égalitaire	cher	limité	cher	sportif	accessible
T	écologique	individuel	groupé	individuel	sueur	groupé
S**	fluide	individuel	groupé	individuel	petit	groupé
C	économique	privé	lourd	cher	privé	modulable
T*	gestion	aucune	régulière	en direct	aucune	complexe

(*) Autorités Organisatrices du transport.

(*) CT : Compagnies de transporteur.

Plan

→ Contexte, objectifs

- Contexte
- ✓ TAD
- DARP
- Résolution
- Dours Central
- Conclusion et perspectives

Thèmes de recherche liés au TAD

- L'objectif est de trouver des systèmes de transport optimaux en fonction de l'environnement, en terme de fonctionnement, de tarification. . .
 - Nouvelles technologies pour des véhicules intelligents : réseaux de communication, robotique, géolocalisation ;
 - Sociologie : évolution des besoins en mobilité en fonction de l'offre, perception du TAD, système égalitaire ou élitiste ;
 - Géographie : interactions entre territoire, population et TAD : organisation urbaine, évolution des flux ;
 - Recherche Opérationnelle : sous-problèmes d'optimisation NP-complets comme la localisation des dépôts et le calcul de tournées de véhicules.

Plan

→ Contexte, objectifs

● Contexte

✓ TAD

● DARP

● Résolution

● Doubs Central

● Conclusion et perspectives

Pourquoi maintenant

av Les premiers TAD (taxi-brousse, taxi collectif) pas intelligents ;

1970 Début enthousiastes aux E.U., seuls des informaticiens produisent des algorithmes et des simulateurs ;

1980 Maintenu grâce à des niches de personnes captives ;

2000 Une forte incitation politique à repenser les transports combinée à l'arrivée de nouvelles technologies relance les TAD maintenant envisagés pour le plus grand nombre.

Plan

→ Contexte, objectifs

● Contexte

✓ TAD

● DARP

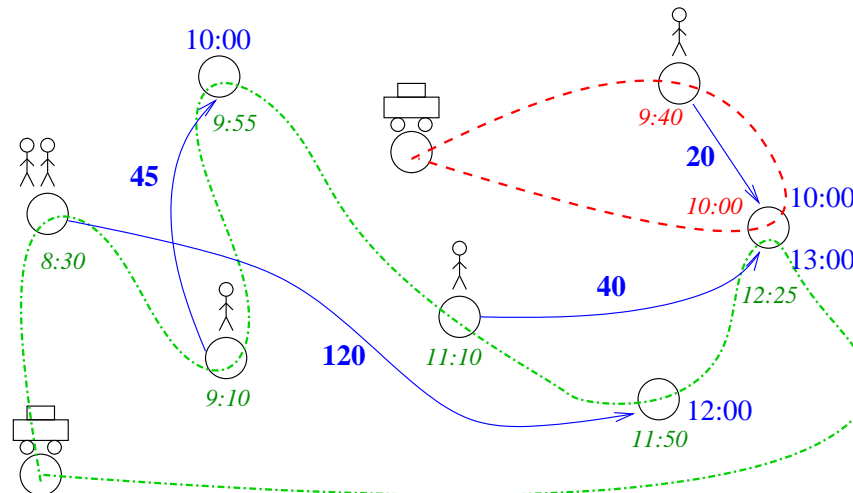
● Résolution

● Doubs Central

● Conclusion et perspectives

Dial-a-ride Problem (DARP)

- *Pick-Up & Delivery with Time Windows Problem* + contraintes QoS
 - résoudre = affecter, ordonnancer, horodater
- Optimiser pour différents acteurs
 - passagers (QoS au sens propre)
 - transporteurs (coût et confort d'exploitation)
 - autorités organisatrices (intérêt général, social)



Plan

→ Contexte, objectifs

- Contexte
- TAD
- ✓ DARP
- Résolution
- Doubts Central
- Conclusion et perspectives

État de l'art

- Problème très étudié
 - Produits industriels
 - Gros volumes de données ou cas dynamiques \Rightarrow Heuristiques
- Critères principaux
 - Temps de transport individuel
 - Écart par rapport à une date de service souhaitée
 - Minimisation de la distance totale parcourue
- Nous : méthode exacte adaptative pour tester d'autres critères

Plan

→ Contexte, objectifs

● Contexte

● TAD

✓ *DARP*

● Résolution

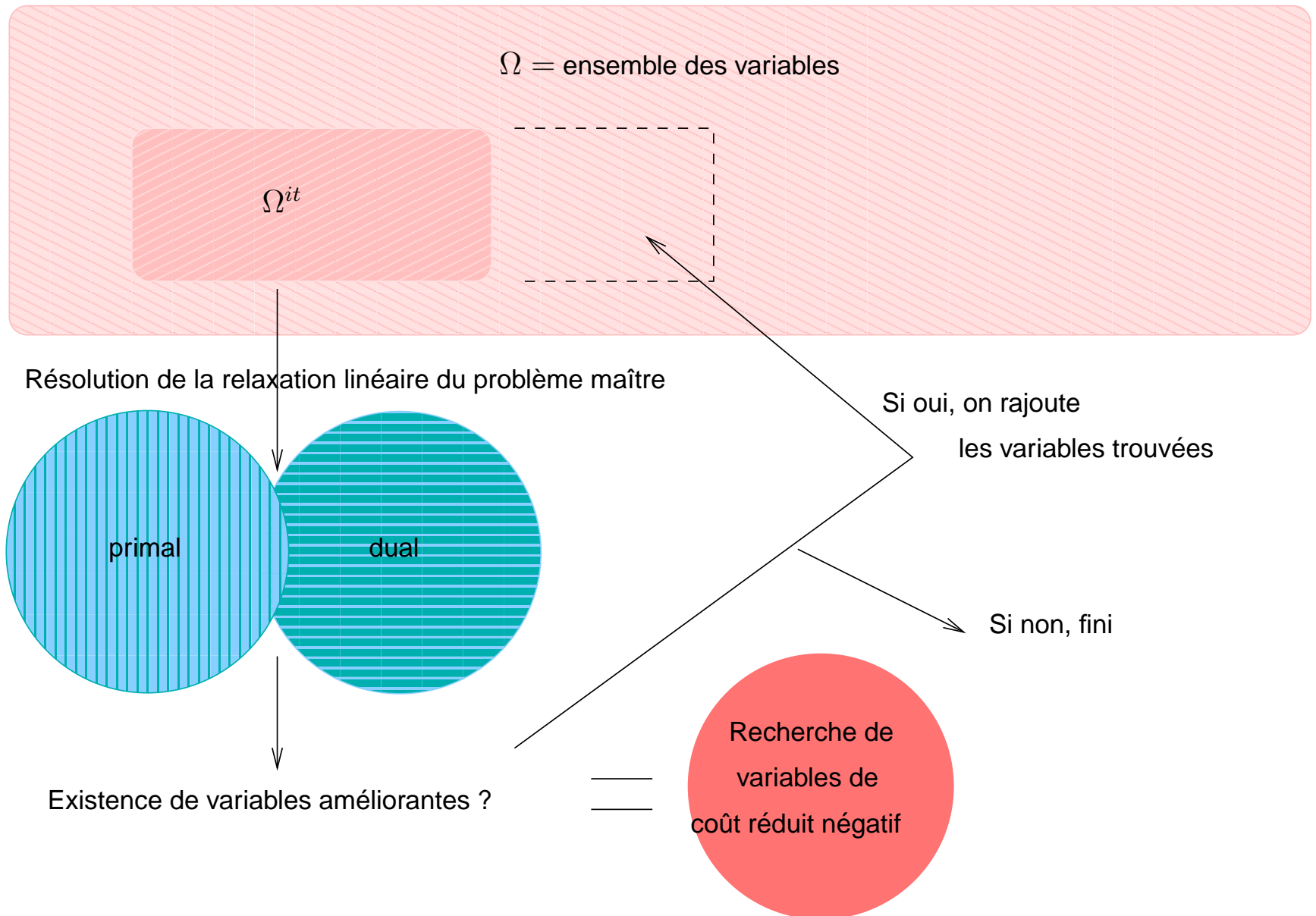
● Doubs Central

● Conclusion et perspectives

Approche par génération de colonnes

Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - ✓ **Méthode**
 - Problème esclave
 - Critères QoS
 - Résultats
- Doubts Central
- Conclusion et perspectives



Approche par génération de colonnes

$$\min f(T_1, \dots, T_\omega, \dots, T_\Omega)$$

sous les contraintes

$$\sum_{\omega=1}^{\Omega} \delta_{\omega} \rho_{\omega r} = 1, \forall r = 1, \dots, n \quad [u_r]$$

$$\sum_{\omega=1}^{\Omega} \delta_{\omega} \leq K \quad [v]$$

$$\delta_{\omega} \in \{0, 1\}$$

- $\rho_{\omega r} \in \{0, 1\}$: requête r dans la tournée T_{ω}
- f est linéaire ; les coûts (c_{ω}) des tournées sont indépendants. ex: $f = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \delta_{\omega} c_{\omega}$
- Hormis l'affectation, toutes les contraintes apparaissent dans le sous-problème :

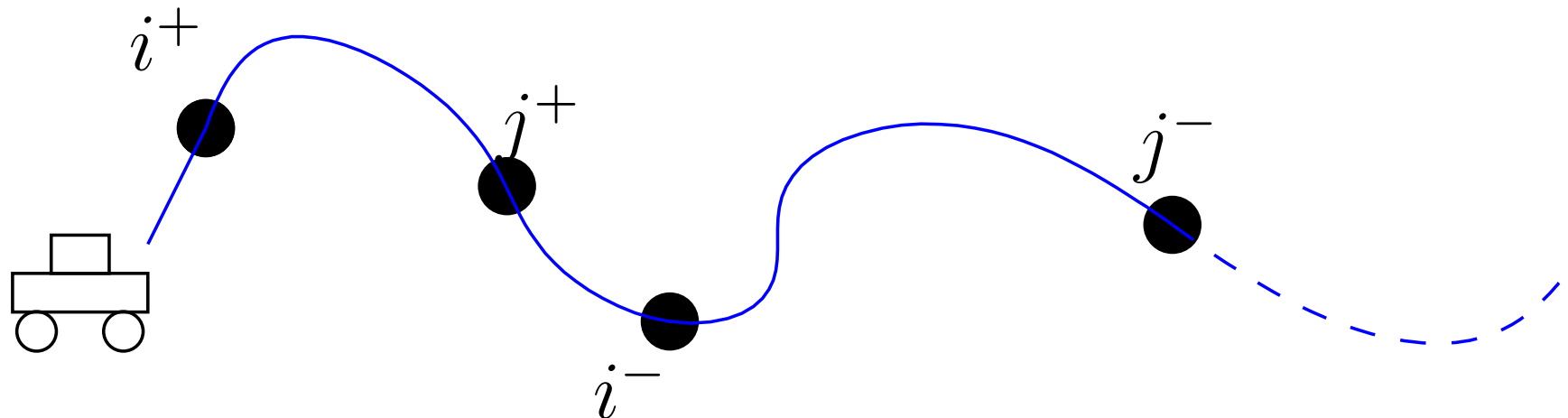
$$\{\omega = 1, \dots, \Omega \mid c_{\omega} - \sum_{r=1}^n \rho_{\omega r} u_r - v < 0\}$$

Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - ✓ **Méthode**
 - Problème esclave
 - Critères QoS
 - Résultats
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Générateur de colonnes (1/4)

- Contraintes de réalisabilité
 - PDP classique : capacité, couplage, précédence, élémentarité
 - Fenêtres de temps (dates de ramassage au plus tôt et de livraison au plus tard)
 - Temps d'attente absurdes



Générateur de colonnes (2/4)

- Objectifs d'optimisation
 - Distance totale parcourue (AOT) ;
 - Temps perdu en transport (passager), ex : partir le plus tard possible de chez soi pour prendre un train ;
 - Regroupement / Taux de remplissage (transporteur) : le rapport entre la distance parcourue et la somme des produit de la charge et longueur de chaque tronçon.

Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - ✓ *Problème esclave*
 - Critères QoS
 - Résultats
- Dubs Central
- Conclusion et perspectives

Générateur de colonnes (3/4)

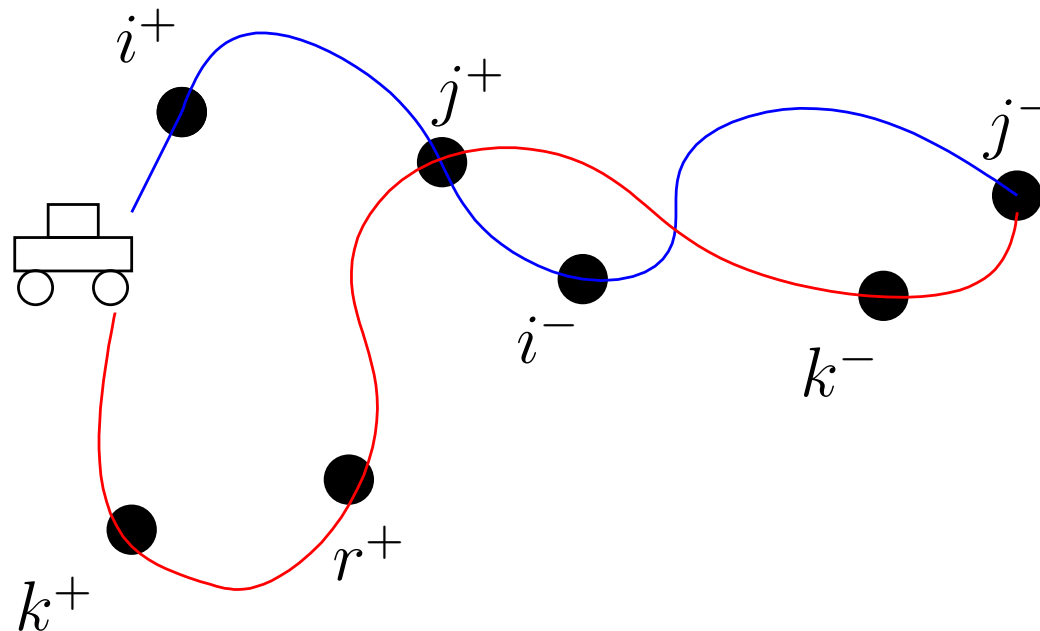
- Plus court chemin avec contraintes de ressources : Programmation dynamique [Desrochers] + accélérations (LDS)
- Extension de chemins (tournées) partiel(le)s
- Dominance possible s'il y a dominance avec toute extension

Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - ✓ *Problème esclave*
 - Critères QoS
 - Résultats
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Générateur de colonnes (4/4)

- Règles de dominance entre 2 chemins partiels L^1 et L^2 au même sommet j^-
 - date de début de service au plus tôt ($T_{i,min}^1 \leq T_{i,min}^2$)
 - nombre de passagers ($Q_i^1 \leq Q_i^2$)
 - nombre de requêtes inaccessibles ($I_i^1 \subseteq I_i^2$)
 - nombre de requêtes en cours ($R_i^1 \subseteq R_i^2$)



Distance totale parcourue (1/2)

- Somme distance des arcs $\min \sum_{(i,j)^e \in S} D_{(i,j)^e}$
- Extension vers un service par tous les arcs sortants
- Difficultés : Compromis temps/distance \Rightarrow choix multiple d'arcs entre deux sommets
 - Résolution sur un graphe idéal
 - Sélection optimale des arcs sur une séquence

Plan

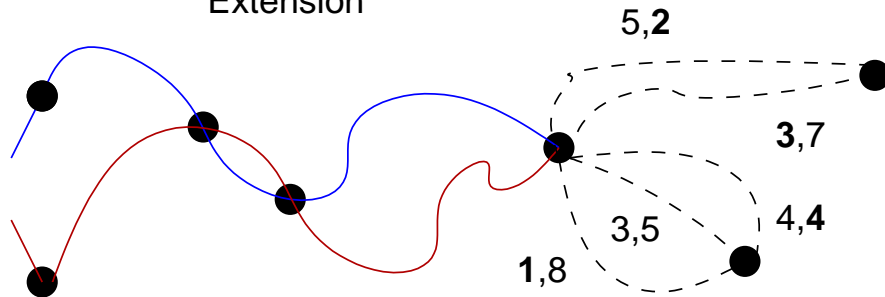
- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - Problème esclave
 - ✓ Critères QoS
 - Résultats
- Dubs Central
- Conclusion et perspectives

Distance totale parcourue (2/2)

Plan

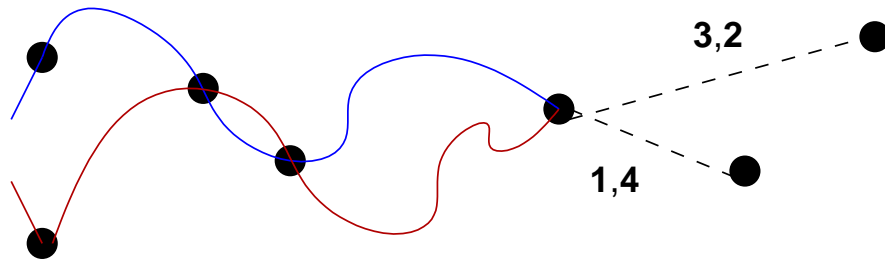
- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - Problème esclave
 - ✓ Critères QoS
 - Résultats
- Dubs Central
- Conclusion et perspectives

Extension

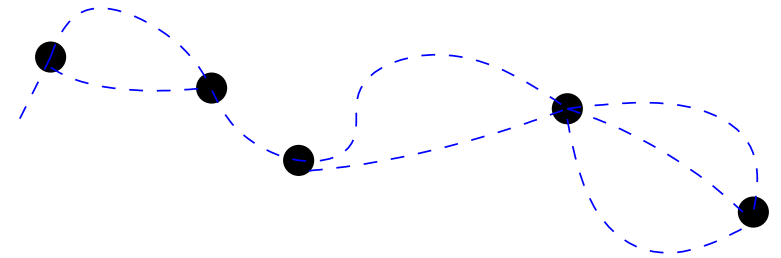


Trajets offrant des compromis
durée/distance

Graphe Idéal



Sélection des arcs = Sac-à-dos



Temps perdu (1/2)

- Écart entre une date butoir de livraison souhaitée et la date de ramassage

$$\min \sum T_{r^-}^{sup} - t_{r^+}$$

- Difficultés : nombre de véhicules ? remise en cause du coût des chemins partiels ?
 - Partir du dépôt d'arrivée
 - Les horodatages au plus tard forment un ensemble dominant \Rightarrow pas de remise en cause par les extensions
 - La dominance en terme de réalisabilité est préservée

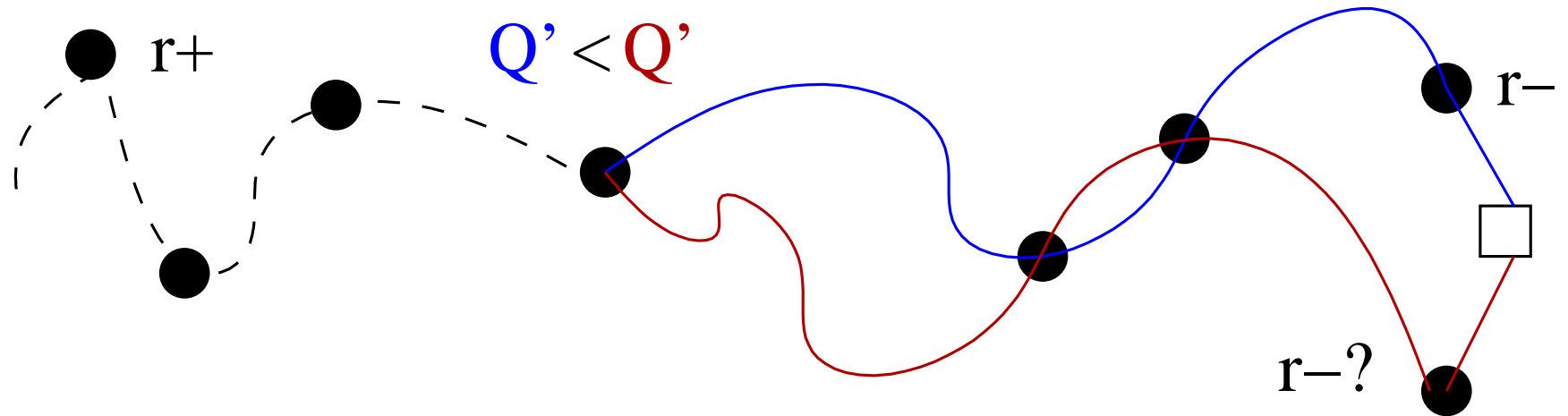
Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - Problème esclave
 - ✓ Critères QoS
 - Résultats
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Temps perdu (2/2)

$$T_{\max} > T_{\max}$$

$$Q' < Q'$$



- Pour dominer, le chemin partiel bleu ne doit pas avoir d'autres requêtes en cours que le rouge

Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - Problème esclave
 - ✓ Critères QoS
 - Résultats
- Doubts Central
- Conclusion et perspectives

Regroupement (1/2)

- Taux de remplissage : $\min \frac{\sum_{(i,j) \in S} T_{ij}}{\sum_{(i,j) \in S} T_{ij} q_{ij}} = \frac{D_\omega}{E_\omega}$
- Difficultés
 - fonction objectif fractionnaire : deux algorithmes de résolution ;
 - une adaptation de l'algorithme de Dinkelbach,
 - une adaptation du changement de variable de Charnes et Cooper ;
 - on considère uniquement les durées roulées \Rightarrow la fonction d'extension des coûts est non décroissante ;
 - mais l'inégalité triangulaire des coûts (dans le problème esclave) n'est pas conservée \Rightarrow affaiblissement de la dominance.

Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - Problème esclave
 - ✓ Critères QoS
 - Résultats
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives

Regroupement (2/2)

- Dinkelbach, modification de la fonction objectif. $coef_n$ est une suite convergente. $\min \sum_{\omega \in \Omega} D_{\omega} \delta_{\omega} - coef_n \sum_{\omega \in \Omega} E_{\omega} \delta_{\omega}$
scq.

$$\sum_{\omega \in \Omega} \delta_{\omega} \rho_{\omega r} = 1 \quad , \forall r = 1, \dots, n \quad [u_r]$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \delta_{\omega} \leq K \quad [v]$$

$$\delta_{\omega} \in \{0, 1\}$$

- Charnes-Cooper, ajout d'une variable et d'une contrainte.

$$\min \sum_{\omega \in \Omega} D_{\omega} \delta_{\omega}$$

scq.

$$\sum_{\omega \in \Omega} \delta_{\omega} \rho_{\omega r} - t = 1 \quad , \forall r = 1, \dots, n \quad [u_r]$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} \delta_{\omega} - Kt \leq 0 \quad [v]$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} E_{\omega} \delta_{\omega} = 1 \quad [w]$$

$$t > 0$$

$$\delta_{\omega} \in \{0, 1\}$$

Plan

- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - Problème esclave
 - ✓ Critères QoS
 - Résultats
- Douts Central
- Conclusion et perspectives

Résultats

instance	densité	tour.	dist.	sec.	heu
b2-16_b0,5	0,1289	5	294,289	18,21	299,688
<i>b2-16_b0,5_m0,5</i>	<i>0,7412</i>	<i>4</i>	<i>221,398</i>	<i>21,47</i>	<i>234,777</i>
b2-20_b0,5	0,1263	6	313,974	18,73	315,043
<i>b2-20_b0,5_m0,5</i>	<i>0,9594</i>	<i>6</i>	<i>226,423</i>	<i>41,89</i>	<i>235,536</i>
b2-24_b0,5	0,1272	4	443,716	19,44	430,306
<i>b2-24_b0,5_m0,5</i>	<i>0,8689</i>	<i>5</i>	<i>311,437</i>	<i>115,61</i>	<i>316,025</i>
b3-18_b0,5	0,1227	3	309,871	18,22	309,871
<i>b3-18_b0,5_m0,5</i>	<i>0,7338</i>	<i>4</i>	<i>233,719</i>	<i>20,26</i>	<i>245,119</i>
b3-24_b0,5	0,1207	6	369,713	18,37	350,274
<i>b3-24_b0,5_m0,5</i>	<i>0,9115</i>	<i>6</i>	<i>272,027</i>	<i>49,71</i>	<i>261,605</i>
b3-36_b0,5	0,1233	6	600,517	25,16	614,365
<i>b3-36_b0,5_m0,5</i>	<i>1,2218</i>	<i>6</i>	<i>422,991</i>	<i>504,66</i>	<i>440,283</i>
b4-24_b0,5	0,1198	6	395,459	18,38	406,14
<i>b4-24_b0,5_m0,5</i>	<i>0,6766</i>	<i>7</i>	<i>300,79</i>	<i>29,02</i>	<i>312,324</i>
b4-32_b0,5	0,1240	7	515,568	20,16	549,139
<i>b4-32_b0,5_m0,5</i>	<i>1,0930</i>	<i>7</i>	<i>362,987</i>	<i>206,46</i>	<i>400,883</i>
b4-40_b0,5	0,1222	8	653,655	27,5	643,655
<i>b4-40_b0,5_m0,5</i>	<i>1,1678</i>	<i>7</i>	<i>462,258</i>	<i>660,5</i>	<i>503,742</i>
b4-48_b0,5	0,1233	9	695,61	49,75	781,655
<i>b4-48_b0,5_m0,5</i>	<i>1,2195</i>	<i>8</i>	<i>504,179</i>	<i>1784,41</i>	<i>585,287</i>
b5-40_b0,5	0,1213	7	676,92	24,21	697,645
<i>b5-40_b0,5_m0,5</i>	<i>1,3150</i>	<i>7</i>	<i>478,076</i>	<i>1366,49</i>	<i>531,843</i>

Plan

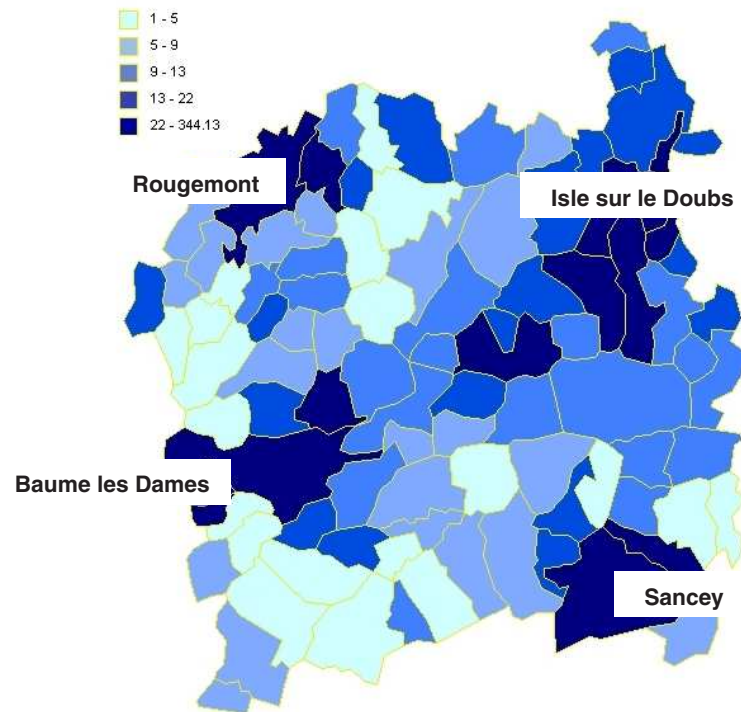
- Contexte, objectifs
- **Résolution**
 - Méthode
 - Problème esclave
 - Critères QoS
 - ✓ **Résultats**
- Douts Central
- Conclusion et perspectives

TAD Doubs Central

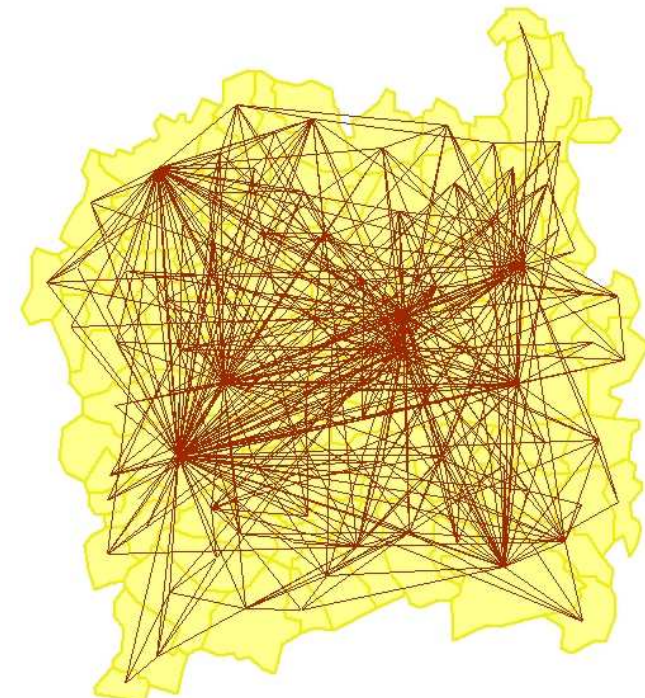
- Zone rurale de 25000 habitants pour 100 communes ;
- Sous-traitance avec les compagnies de taxi ;
- Effort de regroupement.

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - ✓ TAD
 - Résultats
 - Forme
- Conclusion et perspectives



DENSITE DE POPULATION
(habitants / km²)



MIGRATIONS DOMICILE-TRAVAIL
(occurrences)

TAD Doubs Central

- Particularités du problème
 - Une flotte hétérogène et différents dépôts ;
 - Les compagnies de taxi peuvent refuser des tournées ;
 - Les véhicules ne sont pas dédiés au TAD et peuvent prendre des clients s'ils sont libres ;
 - La tarification incite aux regroupements en amont du système.

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - ✓ **TAD**
 - Résultats
 - Forme
- Conclusion et perspectives

TAD Doubs Central

- L'application TADOU
 - Un système de gestion des usagers et des voyages ;
 - Un noyau d'optimisation basé sur une heuristique d'insertion ;
 - Un éditeur de tournées.

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - ✓ TAD
 - Résultats
 - Forme
- Conclusion et perspectives

Expérimentations

- environnement : Plateforme SIG basée sur des projets OpenSource (Postgres, Postgis, Qgis, MapServer, Apache)
- données
 - réseau routier détaillé \Rightarrow des détours imposés qui favorisent le regroupement
 - requêtes extrapolées en 4 scénarios :

Scénario \ Dimension	espace	temps	détour
aléa	$n \rightarrow n$	[8.00 18.00]	1/3
évènement	$n \rightarrow 1$	[8.00 18.00]	1/3
travail	$n \rightarrow 1$	[13.00 14.40]	1/3
pôles	$4 \rightarrow 4$	[8.00 18.00]	1/3

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - TAD
 - ✓ Résultats
 - Forme
- Conclusion et perspectives

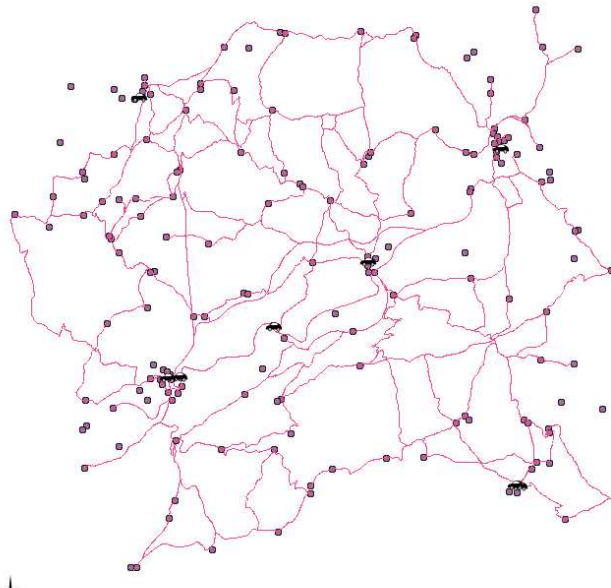
Expérimentations

instance	critère	durée	distance	tps perdu	tx remp.	sec.	node
aléa	distance S	4445,93	1592,06	43,5351	0,6657	29,74	5
	distance M	4598,95	1463,61	88,3749	0,6599	1010,15	1
	temps perdu	3982,28	2363,95	0	0,9647	0,91	4
	taux remp.	3873,48	1596,02	55,8592	0,6473	18,87	2
évènement.	distance S	3591,95	1424,98	24,8603	0,9098	48,32	10
	distance M	3377,74	1273,33	41,1898	0,9137	460,8	5
	temps perdu	3534,1	1685,54	0	1,1021	2,06	8
	taux remp.	3086,61	1426,03	27,6072	0,9085	19,91	1
travail	distance S	1088,04	1253,21	141,281	0,6171	112	161
	distance M	1133,29	1173,17	149,168	0,6394	1222,7	44
	temps perdu	1428,36	1977,36	5,6011	1,0135	9,91	1
	taux remp.	1085,05	1264,7	152,91	0,5947	23,48	15
pôles	distance S	3649,13	1350,46	73,6975	0,5203	73,41	21
	distance M	3426,83	1154,85	85,3743	0,5225	5589,55	1
	temps perdu	2892,52	2155,49	0	0,8548	81,46	7
	taux remp.	3329,18	1354,94	79,8636	0,5134	33,91	1

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - TAD
 - ✓ Résultats
 - Forme
- Conclusion et perspectives

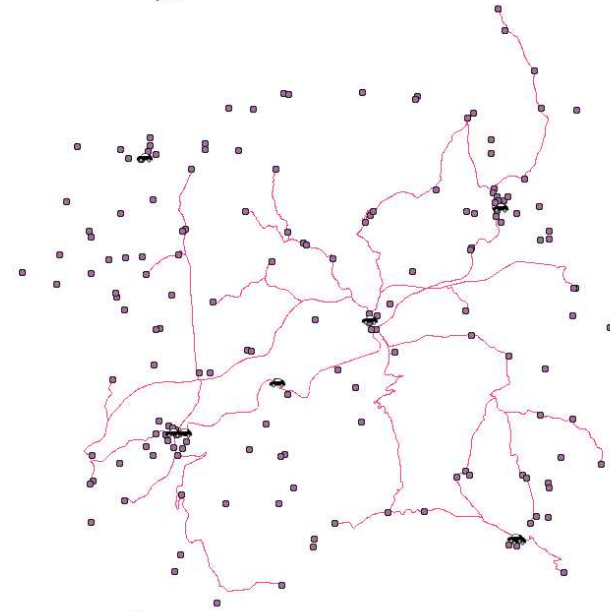
0 8 km



aléa

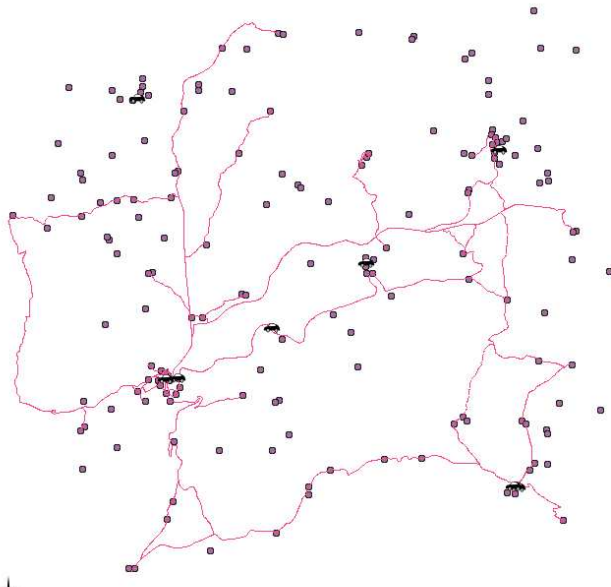
© QGIS 2006

0 9 km



© QGIS 2006 évè.

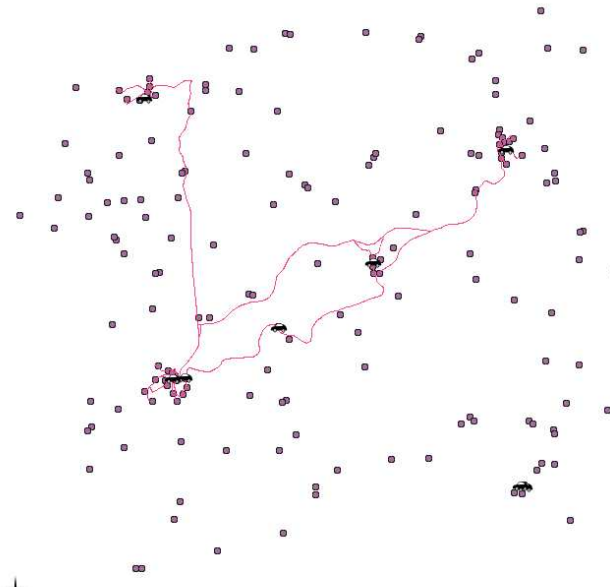
0 8 km



trav.

© QGIS 2006

0 8 km



© QGIS 2006 pôle

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - TAD
 - ✓ Résultats
 - Forme
- Conclusion et perspectives

Forme des tournées

- Point de vue du passager
 - Ne pas passer 2 fois au même endroit ou pire passer près de son arrêt d'arrivée
 - un véhicule passe près de son arrêt de ramassage
 - s'éloigner de la destination
- Point de vue du décideur
 - croisements
 - équilibrées
 - pour évaluer l'ensemble, il faut des représentations dans des dimensions spatiales et temporelles.

Plan

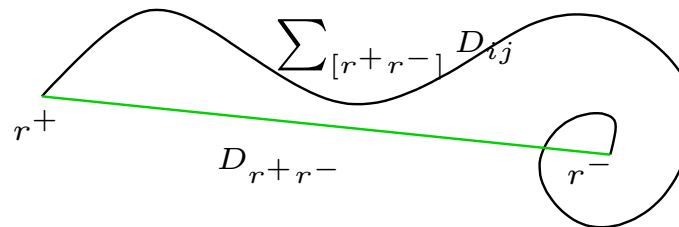
- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - TAD
 - Résultats
 - ✓ **Forme**
- Conclusion et perspectives

Sinuosité

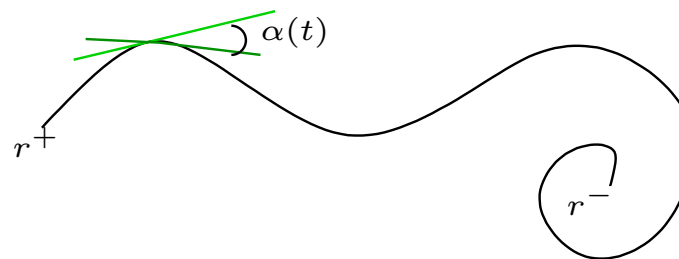
- Critère de confort individuel et peut-être un critère d'optimisation global.

- 4 indices cumulatifs :

- Efficacité =
$$\frac{D_{r^+r^-}}{\sum_{[r^+r^-]} D_{ij}}$$



- Tours de volant = $\int_{r^+}^{r^-} \alpha(t) dt$. Ne tient pas compte de la distance à la destination.



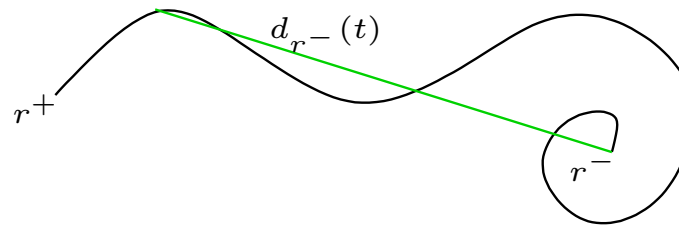
Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - TAD
 - Résultats
 - ✓ **Forme**
- Conclusion et perspectives

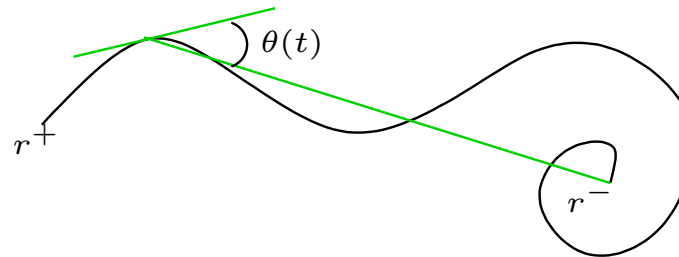
Sinuosité

- indices suite...

- Distance à la destination = $\int_{r^+}^{r^-} d_{r^-}(t) dt$.
Observer la vitesse et l'accélération pour pénaliser les éloignements.



- Angle entre la trajectoire et la ligne droite = $\int_{r^+}^{r^-} \theta(t) dt$



Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- **Doubs Central**
 - TAD
 - Résultats
 - ✓ **Forme**
- Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

- Étude de différents types de critères d'optimisation à l'aide d'une méthode exacte
- Adaptation aux problèmes opérationnels plus généraux avec gestion des imprévus, la réservation temps réel...
- Aborder la qualité de service d'un point de vue global (service public)
 - Passer de sommes de fonctions de satisfactions à une évaluation de type *minimax*
- Intégrer des critères de qualités de services spatiaux
 - Forme des tournées
 - Problème de l'interdépendance des tournées dans l'évaluation d'une solution (ex: modification du problème maître)
- Évaluation globale des solutions obtenues
- Combinaison de certains critères

Plan

- Contexte, objectifs
- Résolution
- Doubs Central
- Conclusion et perspectives