

Université de Montréal

**Modélisation des effets réseaux dans le transport des matières
dangereuses**

par

Amina Benterki

Département d'informatique et de recherche opérationnelle

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures

en vue de l'obtention du grade de

Maître ès sciences (M.Sc.)

en informatique



juin 2001

©Amina Benterki, 2001

QA
76
W54
2001
N. 028

300
2001

Université de Montréal

Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

**Modélisation des effets réseaux dans le transport des matières
dangereuses**

présenté par:

Amina Benterki

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

Jacques Ferland

(président-rapporteur)

Michel Gendreau

(directeur de recherche)

Teodor Gabriel Crainic

(co-directeur)

Bernard Gendron

(membre du jury)

Mémoire accepté le:

30 août 2001

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Michel Gendreau, de m'avoir proposé le sujet de ce mémoire et à lui exprimer toute ma gratitude pour son temps, ses idées ainsi que son support financier.

Je voudrais aussi remercier mon codirecteur de recherche, M. Teodor Gabriel Crainic, pour son support, ses encouragements, ses commentaires concernant le mémoire ainsi que ses précieux conseils.

Je remercie le personnel technique et celui du secrétariat du Centre de Recherche sur les Transports pour leur aide.

J'aimerais aussi adresser un grand merci à mes parents, Smail et Latifa, qui m'ont encouragée et soutenue moralement et financièrement, ainsi qu'à mes soeurs Nawel, Selma et Isma pour leurs encouragements.

Ma gratitude va également à mon mari Thami qui, durant ces dernières années, m'a soutenue et encouragée afin que je puisse avancer dans mes recherches.

À mes deux jumeaux, Yassine et Loubna, un grand merci pour leurs grands sourires qui m'ont aidée à surmonter les durs moments des derniers mois.

Enfin, je remercie ma belle-soeur Nawel pour sa disponibilité et son aide, ainsi que tous ceux qui m'ont aidé et encouragé.

Sommaire

Durant les dernières décennies, plusieurs facteurs ont contribué à la prolifération des matières dangereuses : l'évolution du mode de vie, l'aspiration à des déplacements toujours plus fiables, à une hygiène toujours meilleure, à des équipements toujours plus performants et sophistiqués. Des milliers de nouveaux produits dangereux sont ainsi produits chaque année, transportés d'un endroit à l'autre, pour être acheminé soit à leur consommateur final, soit aux usines de traitement dû à l'impossibilité de les entreposer dans leurs sites de production.

Le transport des matières dangereuses comporte évidemment beaucoup de risques. Les conséquences d'un accident impliquant des matières dangereuses peuvent être fâcheuses pour la population, l'environnement et les biens. L'acheminement des matières dangereuses dans le réseau routier soumet la population aux risques, non pas d'une seule route, mais de l'ensemble des routes avoisinantes.

Jusqu'à présent, la plupart des modèles destinés à déterminer les routes pour le transport des matières dangereuses ne tenaient pas compte des effets croisés qui engendrent une accumulation des différents risques sur un certain endroit, provenant de plusieurs routes et concernant plusieurs matériaux, soit de la distribution spatiale du risque, connue dans la littérature sous le nom de l'équité.

Dans ce mémoire, nous proposons un nouveau modèle qui aidera à faire la sélection globale des routes pour le transport des matières dangereuses, entre plusieurs origines et plusieurs destinations, en tenant compte de l'impact possible en terme de coût, de risque et d'équité. Nous avons

généralisé 11 réseaux routiers dans lesquels s'effectue le transport des matières dangereuses et sur lesquels nous avons testé notre modèle en utilisant le logiciel d'optimisation linéaire CPLEX comme outil pour la résolution des problèmes. L'analyse des résultats obtenus nous a permis de montrer que notre modélisation de l'équité nous permet d'avoir une meilleure distribution spatiale du risque sur le réseau, comparativement à une sélection individuelle des routes pour laquelle on ne tient pas compte des contraintes d'équité.

Table des matières

Remerciements	iii
Sommaire	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	ix
Table des figures	xi
1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique du transport des matières dangereuses	1
1.2 Problématique du mémoire	4
2 REVUE DE LITTÉRATURE	8
3 MODÉLISATION	19
3.1 Description du modèle	19
3.1.1 Modélisation du risque	20
3.1.2 Modélisation de l'équité	24
3.1.3 Modélisation du coût	25
3.1.4 Notation	26

3.1.5	Les fonctions objectifs	27
3.1.6	Les contraintes	28
3.2	Les modèles	30
3.2.1	Origines-destinations libres	30
3.2.2	Origines-destinations fixes	31
3.3	Conclusion	33
4	RÉSOLUTION ET EXPÉRIMENTATION	34
4.1	Approche de résolution	34
4.2	Génération des problèmes	36
4.3	Plan d'expérimentation	43
4.4	Analyse des résultats	44
4.4.1	Problème 1	46
4.4.2	Problème 9	53
4.4.3	Problème 10	58
4.4.4	Résumé des résultats	63
	Conclusion	71
	Bibliographie	72
	A Graphes du problème 1	xiv
	B Graphes du problème 9	xix
	C Graphes du problème 10	xxiv
	D Résultats du problème 2	xxix

E	Graphes du problème 2	xxxiii
F	Résultats du problème 3	xxxviii
G	Graphes du problème 3	xlii
H	Résultats du problème 4	xlvii
I	Graphes du problème 4	li
J	Résultats du problème 5	lvi
K	Graphes du problème 5	lx
L	Résultats du problème 6	lxv
M	Graphes du problème 6	lxix
N	Résultats du problème 7	lxxiv
O	Graphes du problème 7	lxxviii
P	Résultats du problème 8	lxxxiii
Q	Graphes du problème 8	lxxxvii
R	Résultats du problème 11	xcii
S	Graphes du problème 11	xcvi

Liste des tableaux

4.1	Résumé des problèmes générés	42
4.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 1	50
4.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 1	51
4.4	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 1	52
4.5	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 9	55
4.6	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 9	56
4.7	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 9	57
4.8	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 10	60
4.9	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 10	61
4.10	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 10	62
4.11	Résumé des résultats sur tous les problèmes pour $(\lambda_1=1,\lambda_2=0)$	65
4.12	Résumé des résultats sur tous les problèmes pour $(\lambda_1=0,\lambda_2=1)$	66
4.13	Résumé des résultats sur tous les problèmes pour $(\lambda_1=0.5,\lambda_2=0.5)$	67
D.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 2	xxx
D.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 2	xxxii
D.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 2	xxxiii
F.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 3	xxxix
F.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 3	xl

F.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 3	xli
H.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 4	xlvi
H.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 4	xlix
H.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 4	l
J.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 5	lvii
J.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 5	lviii
J.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 5	lix
L.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 6	lxvi
L.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 6	lxvii
L.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 6	lxviii
N.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 7	lxxv
N.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 7	lxxvi
N.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 7	lxxvii
P.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 8	lxxxiv
P.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 8	lxxxv
P.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 8	lxxxvi
R.1	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 11	xciii
R.2	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 11	xciv
R.3	Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 11	xcv

Table des figures

3.1	Réseau de transport des matières dangereuses	21
3.2	Différents risques auxquels est exposée la population p	23
A.1	Distribution du risque dû au transport du problème 1 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	xiv
A.2	Distribution du risque dû au transport du problème 1 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	xv
A.3	Distribution du risque dû au transport du problème 1 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	xvi
A.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 1	xvii
A.5	Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 1	xviii
B.1	Distribution du risque dû au transport du problème 9 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	xix
B.2	Distribution du risque dû au transport du problème 9 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	xx
B.3	Distribution du risque dû au transport du problème 9 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	xxi
B.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 9	xxii
B.5	Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 9	xxiii
C.1	Distribution du risque dû au transport du problème 10 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	xxiv
C.2	Distribution du risque dû au transport du problème 10 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	xxv
C.3	Distribution du risque dû au transport du problème 10 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	xxvi
C.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 10	xxvii
C.5	Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 10	xxviii

E.1	Distribution du risque dû au transport du problème 2 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	xxxiii
E.2	Distribution du risque dû au transport du problème 2 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	xxxiv
E.3	Distribution du risque dû au transport du problème 2 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	xxxv
E.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 2	xxxvi
E.5	Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 2	xxxvii
G.1	Distribution du risque dû au transport du problème 3 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	xlii
G.2	Distribution du risque dû au transport du problème 3 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	xliii
G.3	Distribution du risque dû au transport du problème 3 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	xliv
G.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 3	xlv
G.5	Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 3	xlvi
I.1	Distribution du risque dû au transport du problème 4 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	li
I.2	Distribution du risque dû au transport du problème 4 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	lii
I.3	Distribution du risque dû au transport du problème 4 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	liii
I.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 4	liv
I.5	Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 4	lv
K.1	Distribution du risque dû au transport du problème 5 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	lx
K.2	Distribution du risque dû au transport du problème 5 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	lxi
K.3	Distribution du risque dû au transport du problème 5 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	lxii
K.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 5	lxiii
K.5	Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 5	lxiv
M.1	Distribution du risque dû au transport du problème 6 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)	lxix
M.2	Distribution du risque dû au transport du problème 6 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)	lxx
M.3	Distribution du risque dû au transport du problème 6 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)	lxxi
M.4	Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 6	lxxii

M.5 Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 6 lxxiii

O.1 Distribution du risque dû au transport du problème 7 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$) lxxviii

O.2 Distribution du risque dû au transport du problème 7 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$) lxxix

O.3 Distribution du risque dû au transport du problème 7 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$) lxxx

O.4 Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 7 lxxxii

O.5 Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 7 lxxxii

Q.1 Distribution du risque dû au transport du problème 8 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$) lxxxvii

Q.2 Distribution du risque dû au transport du problème 8 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$) lxxxviii

Q.3 Distribution du risque dû au transport du problème 8 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$) lxxxix

Q.4 Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 8 xc

Q.5 Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 8 xci

S.1 Distribution du risque dû au transport du problème 11 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$) xcvi

S.2 Distribution du risque dû au transport du problème 11 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$) xcvi

S.3 Distribution du risque dû au transport du problème 11 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$) xcvi

S.4 Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 11 xcix

S.5 Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 11 c

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique du transport des matières dangereuses

Nous entendons par matière dangereuse, tout ce qui est explosif, gaz comprimé, liquide et solide inflammables, substance toxique et infectieuse, matière radioactive, corrosive ainsi que les déchets dangereux. La nécessité de transporter les matières dangereuses est due à l'impossibilité technologique et économique de les produire et de les traiter ou les stocker à la même place. Notons quelques exemples de transport des matières dangereuses : le transport du soda du fournisseur d'hydrate de soude jusqu'à la raffinerie, le chlore de son producteur jusqu'à l'usine de traitement chimique et les déchets dangereux des sites industriels jusqu'à l'incinérateur.

On distingue le transport des matières dangereuses des autres catégories de transport, à cause du risque et de la gravité des accidents qui lui sont reliés, autant sur l'environnement que sur la santé des individus (décès, brûlure, maladie incurable). Les effets directs liés aux accidents de transport impliquant les matières dangereuses peuvent parfois s'observer à plusieurs centaines de mètres autour de l'accident ; par exemple, pour les gaz de pétrole liquéfié, l'explosion avec les effets de souffle, le principal danger pour l'homme est la brûlure, et les effets sur l'environnement sont la destruction par le feu d'habitations, d'installations industrielles ou de forêts. Les effets peuvent s'observer à 500 mètres autour du lieu de l'accident. Pour l'ammoniac, l'inflammation et l'ex-

plosion sont possibles ; comme le produit a des propriétés corrosives, les effets peuvent dépasser un kilomètre. À cause de ceci, le problème de la planification du transport des matières dangereuses suscite l'intérêt des gouvernements qui élaborent des lois et des réglementations comme les taxes, et prennent divers moyens de précaution pour assurer la sécurité de la population et de l'environnement. Par exemple, la Loi canadienne sur la protection de l'environnement de 1988 a contraint à l'élaboration d'une étude sur tous les produits chimiques utilisés actuellement au Canada, afin de déterminer l'étendue et la nature du risque associé à chaque substance (Erkut et Verter 1994). En plus, les Nations Unies reconnaissent la gravité de ce problème et mettent des efforts pour minimiser les risques associés aux matières dangereuses. Elles ont élaboré en 1989 un consensus international entre 105 pays et la Communauté européenne afin de régulariser le transport frontalier des matières dangereuses et de sécuriser leur stockage sous certaines conditions environnementales.

Il y a entre 250 000 et 500 000 cargaisons de matières dangereuses chaque jour aux États-Unis d'Amérique, c'est-à-dire entre 1,5 et 4 milliards de tonnes transportées à travers tout le pays. Au Canada, l'estimation en 1992 correspond à 6,5 millions de tonnes. Ce sont donc des quantités très importantes qui se transportent avec des risques élevés. Erkut et Verter (1994) ont cité des exemples de quelques accidents : en 1979, un train transportant des substances chimiques toxiques a déraillé tout près de Mississauga en Ontario, nécessitant l'évacuation de 200000 individus. En 1982, en Afghanistan, 2 700 personnes sont mortes dans un tunnel suite à une explosion d'un camion-citerne transportant de l'essence. Le caractère diffus de ces accidents et la méconnaissance des dangers potentiels conduisent à surestimer la réalité du risque ; le public réagit très mal aux accidents liés au transport de la matière dangereuse comparativement aux accidents de circulation ordinaires, bien que les statistiques indiquent que le taux de mortalité dans le premier genre d'accident est presque négligeable par rapport au deuxième. Aux États-Unis, la moyenne annuelle des individus décédés à cause d'un accident de matière dangereuse est

de 10 comparativement à 35 000 dans des accidents d'auto. Par contre, chaque accident lié au transport de la matière dangereuse est très médiatisé et occupe la première page des journaux. Donc les décisions portant sur la logistique des matières dangereuses sont plus difficiles à établir et à implanter que les autres décisions logistiques.

Un autre facteur vient de se rajouter pour exacerber la sensibilité du public : la distribution inéquitable du risque associé au transport de la matière dangereuse. Les individus qui résident à proximité des routes utilisées par ce genre de transport s'y opposent fermement. Plusieurs gouvernements ont dû reculer et même changer leur décision face aux protestations publiques. Les facteurs qu'on a mentionnés brièvement compliquent l'établissement des décisions concernant la localisation des sites de traitement des matières dangereuses et d'entreposage, ainsi que la sélection des routes empruntées pour leur transport (de la source au site de traitement).

Afin de résoudre ces problèmes de transport des matières dangereuses et d'arriver à un compromis entre tous les membres concernés, plusieurs objectifs doivent être réalisés simultanément lors du choix des itinéraires, les plus importants étant la minimisation du coût, la minimisation du risque et la maximisation de l'équité, qui est la distribution spatiale du risque. Lors de la résolution des problèmes de transport des matières dangereuses, il faut considérer le risque imposé sur la population et l'environnement pour une solution particulière choisie, la distribution spatiale de ce risque, qui est l'équité d'une solution, ainsi que le coût économique de la solution. Lorsqu'on combine ces trois critères : coût, risque et équité, on se trouve dans une situation conflictuelle. Par exemple, si la route la moins coûteuse passe par une ville peuplée, ceci augmente le nombre d'individus exposés au risque, alors que si on veut éviter cette ville, on augmente le coût total. Dans une autre situation, si une route peu coûteuse et moins peuplée semble appropriée pour le transport de plusieurs matières dangereuses, une petite population récolte tout le risque du réseau ; par contre, une distribution équitable du risque dans le réseau augmente le coût total et le risque total.

1.2 Problématique du mémoire

Ce mémoire fait partie d'un projet d'étude entre un groupe de l'Université de l'Alberta et le Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal. L'objectif est de développer des modèles qui aideront les preneurs de décisions à résoudre les compromis difficiles entre les trois critères conflictuels : coût, risque et équité.

Les modèles se concentrent sur deux catégories :

- Les modèles qui aideront à la planification du transport des matières dangereuses.
- Les modèles qui aideront à la planification de la localisation des sites d'entreposage et de traitement.

L'équipe travaille sur un système d'aide à la décision qui a les composantes suivantes :

1. planification du transport

- planification des modes de transport et des véhicules.
- planification individuelle des routes.
- planification globale des routes.
- planification des secours.
- stations d'inspection.

2. planification des sites

- localisation des sites.
- choix de technologie.
- planification de la capacité.
- répartition des matières dangereuses.

Les utilisateurs de ces modèles peuvent être de différents paliers du gouvernement, ou du secteur privé. Par exemple :

- Agence du gouvernement fédéral qui est responsable du développement des règlements sur le traitement des matières dangereuses.
- Département du gouvernement provincial responsable de l'instauration des sites de traitements des matières dangereuses.
- Département du transport municipal qui est responsable de la décision sur les routes utilisées pour le transport des matières dangereuses de cette ville.
- Entreprise de transport des matières dangereuses qui a besoin de déterminer les routes utilisées entre des sites d'origines et de destinations.
- Compagnie d'assurance qui veut établir des primes afin d'encourager le comportement de minimisation de risque par les entreprises de transport des matières dangereuses.

La problématique de ce mémoire est liée à la composante de la planification globale des routes. Nous tenons compte de toutes les expéditions des matières dangereuses dans un réseau de transport en déterminant toutes les routes entre plusieurs origines et plusieurs destinations, tout en prenant en considération les critères de sélection qui sont le coût, le risque et l'équité.

La planification globale des routes peut être utilisée d'une manière stratégique pour aider les preneurs de décision à la construction du réseau de transport de marchandises ainsi qu'à établir des règlements pour les contrôler. Cette composante peut être utilisée pour faire une synthèse du réseau. Par des simulations des routes qui peuvent être choisies par les transporteurs, les régulateurs peuvent ainsi analyser les effets des changements sur le réseau en permettant l'utilisation de certaines routes ou l'interdiction du passage de certaines matières sur quelques segments de routes.

Cette composante aussi pourrait être très utile dans une analyse globale du risque et de l'équité du système. Le fait de sélectionner les routes individuellement peut engendrer une surcharge de certains segments routiers du réseau de transport. Ceci peut engendrer une congestion du réseau routier ou une distribution inéquitable du risque. Les régulateurs peuvent ainsi essayer de rendre le système plus sécurisant et plus équitable.

La planification globale des routes est complexe, surtout si on considère plusieurs origines et plusieurs destinations ainsi que plusieurs matières dangereuses. De plus, il ne suffit pas de tenir compte seulement des trois critères que sont le coût, le risque et l'équité pour la sélection des routes, mais il faut aussi tenir compte de l'accumulation des différents risques et de leur distribution spatiale dans le réseau. D'après Erkut (1994), aucune des études portant sur le transport des matières dangereuses n'a tenté de modéliser le problème de la planification globale des routes de cette manière. L'équipe qui s'occupe de ce projet s'attend à ce que notre travail sur la planification globale des routes soit une contribution importante au domaine de recherche sur le transport des matières dangereuses.

Afin de clarifier notre objectif dans ce mémoire, prenons l'exemple suivant : à l'intérieur d'une certaine région, il y a deux usines qui produisent des matières dangereuses. La première usine produit deux types de matières dangereuses et l'autre un seul type. Les produits dangereux doivent être transportés vers trois sites différents. Dans le réseau routier, il y a des routes qui passent par une grande ville comptant des milliers d'individus. D'autres routes passent à côté de petits villages et quelques maisons se trouvent à proximité de la route. Le choix évident des transporteurs est de choisir les chemins les moins coûteux et d'essayer d'éviter le plus possible les zones trop peuplées pour minimiser le risque sur la population résidant à proximité de la route empruntée en cas d'accident. Ce choix est acceptable lorsqu'il y a une seule cargaison qui circule dans ce réseau routier. Par contre, dans le cas de plusieurs cargaisons transportant diverses matières dangereuses, la situation est différente, car si on ne considère pas la sélection globale

des routes, on risque de favoriser une catégorie d'individus par rapport à d'autres en terme de risque. En effet, certaines cargaisons risquent de passer par les mêmes chemins ou par des routes proches les unes des autres, ce qui augmente le risque sur la population qui se trouve à proximité de ces routes.

Notre but est de proposer un modèle qui aidera à faire la sélection globale des routes pour le transport de plusieurs matières dangereuses, entre plusieurs origines et plusieurs destinations, en tenant compte de l'impact possible, en terme de coût, de risque et d'équité. Le modèle est donc une nouvelle contribution dans le domaine des matières dangereuses, car nous tenons compte non seulement de tous les critères (coût, risque et équité), mais aussi de l'accumulation des différents risques, et de leur distribution spatiale dans le réseau.

Au prochain chapitre, nous présentons les différentes perceptions du risque, de l'équité et du coût dans la littérature. Également, nous présentons quelques travaux qui ont traité des problèmes de planification du transport des matières dangereuses. Ensuite, au troisième chapitre, nous proposons une modélisation du problème. Au quatrième chapitre, nous présentons l'approche de résolution et quelques expérimentations. Finalement, nous concluons ce mémoire en résumant notre travail.

Chapitre 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Nous avons mentionné dans le chapitre précédent que les trois critères importants à considérer lors de la modélisation des problèmes de planification du transport des matières dangereuses sont le risque, l'équité et le coût. Dans ce chapitre, nous présentons les différentes perceptions de ces trois critères dans la littérature. Également, nous présentons quelques travaux qui traitent des problèmes de planification du transport des matières dangereuses.

Le risque est la mesure des conséquences des événements indésirables lors de la dispersion des matières dangereuses durant son transport, son utilisation et son entreposage (Erkut et Verter 1994). La dispersion des matières dangereuses peut entraîner des conséquences graves pour la population, les biens ou l'environnement. Notons quelques dangers : l'explosion occasionnée par un choc avec étincelle, par le mélange de produits, entraîne des risques de traumatisme direct ou par onde de choc. L'incendie à la suite d'un choc, d'un échauffement, d'une fuite entraîne des risques de brûlures et d'asphyxie. D'autres risques, comme la dispersion dans l'air (nuage toxique), l'eau et le sol de produits dangereux, mènent à des risques d'intoxication par inhalation, par ingestion ou par contact. On ne peut jamais vraiment évaluer la gravité des dégâts qui peuvent être causés à l'avance. Les conséquences des événements indésirables incluent les décès, les blessures, les dégâts matériels, les pertes des valeurs des propriétés et les dégâts environne-

mentaux.

Dans le modèle du risque traditionnel (Alp 1992, Erkut et Verter 1995b) le risque est défini par la probabilité qu'un événement indésirable se produise durant l'activité multipliée par la conséquence de cet événement. Dans le cas du transport de la matière dangereuse, l'événement indésirable est un accident qui se produit et qu'on appelle incident. Cette définition du risque est appropriée seulement lorsqu'un seul événement est possible ; dans le cas de plusieurs événements, on calcule l'espérance de toutes les conséquences pour tous les incidents possibles.

Afin d'évaluer le risque, on doit estimer les éléments suivants : la probabilité d'incident, les conséquences de chaque incident et le volume de l'activité. La probabilité d'incident doit être estimée par cargaison, par unité de distance, par unité de période de temps ou par unité de montant. Les accidents liés aux matières dangereuses sont des événements très rares, ce qui rend leur estimation non triviale. Le volume de l'activité peut être représenté par le nombre de cargaisons ou la distance totale à parcourir.

Les conséquences indésirables de l'accident peuvent varier : la destruction de l'environnement, les pertes économiques, les blessures des individus. Mais compte tenu de la difficulté de les estimer, le calcul du risque est concentré sur les accidents mortels dus à la dispersion des matières dangereuses.

Les conséquences indésirables sont proportionnelles à la taille de la population qui se trouve à proximité de l'incident. En effet, plus le nombre d'habitants est grand, plus le nombre de personnes affectées par cet accident est élevé. La probabilité de l'incident dépend du type de route empruntée par le transport, la taille de la zone affectée par cet incident dépend de la substance transportée.

Une première simplification du risque traditionnel est le modèle de la population exposée au risque (Batta et Chiu 1988), qui ignore la probabilité de réalisation d'incident et suppose que tous les individus qui résident dans une zone dangereuse sont exposés au même risque. Autre-

ment dit, la probabilité d'incident à l'intérieur des zones proches de segments de route est 1 et ailleurs 0. Ce modèle a été utilisé par Revelle, Cohon et Shobrys (1991) dans une étude dirigée par le Département américain de l'énergie. Ce modèle peut être adéquat si la matière dangereuse impose un risque à la population qui réside à proximité de la route, comme dans le cas des déchets nucléaires de haut niveau.

Le modèle de la probabilité d'incident (Saccamanno et Chan 1985, Abkowitz, Lepofsky et Cheng 1992) est une deuxième simplification du modèle du risque traditionnel, cette fois-ci en ignorant les conséquences de l'incident et en minimisant la probabilité d'incident. Cette version est appropriée si la matière dangereuse transportée a un très petit rayon de cercle de danger, mais si, par contre, la matière est très dangereuse, alors ce modèle ne peut pas être considéré comme étant valable.

Abkowitz, Lepofsky et Cheng (1992) suggèrent un modèle du risque perçu, qui considère la façon avec laquelle la population perçoit le risque qui lui est imposé. Ainsi, lors du calcul du risque de transport sur un segment, on ne multiplie pas uniquement la probabilité d'incident par le nombre de population, mais on ajoute un paramètre préférentiel de risque. Cette approche peut privilégier un certain segment de route par rapport à d'autres, tout dépend du paramètre qui lui a été attribué.

Une critique adressée à la représentation traditionnelle du risque est de ne pas être appropriée dans les cas de plusieurs transports des matières dangereuses entre une origine et une destination, car dans la définition du risque traditionnel, on permet qu'un chemin soit emprunté autant de fois sans tenir compte du nombre d'incidents sur ce chemin. Cependant, le transport peut être suspendu pour réévaluer la politique routière dès l'arrivée d'un accident catastrophique lors du transport d'une substance extrêmement dangereuse. Pour cela Sivakumar, Batta et Karwar (1993a, 1993 b, 1995) proposent l'utilisation du risque conditionnel, c'est-à-dire les conséquences attendues à la suite de l'arrivée du premier accident, afin de traiter ce type de problème de

transport. Ce risque est calculé en divisant le risque traditionnel (probabilité d'incident multipliée par les conséquences d'événement) par la probabilité d'incident. Ce modèle a été critiqué (Erkut et Verter 1995c, Dinia 1999) à cause de sa forme fonctionnelle qui est basée sur un raisonnement illogique. Le fait que son dénominateur correspond à la probabilité d'incident implique que les routes qui ont des probabilités d'incidents élevées auront des faibles risques conditionnels.

Erkut et Verter (1995c) voulaient déterminer l'impact de la modélisation du risque sur le choix des routes optimales lors du transport des matières dangereuses. Premièrement, ils expliquent pourquoi la majorité des modèles de risque dans le transport de la matière dangereuse utilisent le concept de la zone dangereuse. Ce concept est basé sur le fait que la population qui se situe à l'intérieur de la zone dangereuse, qui a été représentée par un cercle de danger, est exposée aux mêmes conséquences indésirables de la matière transportée. La justification de ce choix est le manque de données nécessaires à l'estimation du risque d'incident.

Ces cinq modèles différents sont discutés :

1. Modèle du risque traditionnel
2. Modèle de la population exposée au risque
3. Modèle de la probabilité d'incident
4. Modèle du risque perçu
5. Modèle du risque conditionnel

Ils ont annoncé les trois axiomes suivants qui doivent être satisfaits par un modèle de risque pour le transport des matières dangereuses :

1. Sitôt qu'un lien est ajouté à un chemin existant, l'impact total de ce chemin ne peut pas diminuer.
2. Tous les sous-chemins d'un chemin optimal sont eux-mêmes optimaux.

3. L'augmentation de la probabilité d'incidence ou la conséquence d'une arête ne peut pas réduire la trajectoire.

Les quatre premiers modèles satisfaisaient aux trois conditions. Par contre, le cinquième, qui est le risque conditionnel, ne satisfaisait à aucun des trois axiomes. De plus, c'est un modèle qui peut conduire à des solutions illogiques pour la résolution des problèmes de transport de matières dangereuses.

Après leurs tests effectués sur un réseau ayant 28 paires origine-destination, Erkut et Verter (1995c) en sont venus à la conclusion suivante : les chemins optimaux obtenus avec les trois modèles correspondant à la minimisation du risque traditionnel, la minimisation de la population exposée au risque et la minimisation de la probabilité d'incident totale ne sont pas similaires. Les chemins trouvés sous la minimisation de la probabilité d'incident utilisent le plus possible les autoroutes. Par contre, les chemins trouvés sous la minimisation de la population exposée utilisent plus les routes secondaires qui ne passent pas par des régions à grande densité de population et sont considérés plus longs que les plus courts chemins. Les chemins trouvés sous la minimisation du risque sont légèrement identiques à ceux de la minimisation de la population exposée. Les solutions trouvées sous un des objectifs ne sont pas proches de celles trouvées sous un autre objectif ; autrement dit, les trois objectifs ont des critères conflictuels qui mènent, lors de leur résolution, à des solutions différentes.

Ils concluent qu'étant donné les objectifs conflictuels des différents modèles proposés dans la littérature, on ne peut pas suggérer un modèle commun pour tous les problèmes de transport de la matière dangereuse. Les objectifs des preneurs de décision et la nature de la matière transportée décident du modèle à adopter.

L'évaluation de la quantité du risque imposé sur le public par les activités des matières dangereuses est la première étape qui a conduit au développement des modèles analytiques pour la

gestion des matières dangereuses. La compréhension du risque auquel la population est exposée lors des activités dangereuses a conduit à l'apparition de la question d'équité (Erkut et Verter 1994).

L'équité est la distribution la plus égale des probabilités marginales individuelles de décès et de risque dus au mouvement des matières dangereuses. Morell (1984) suggère que la perception de l'inéquité peut être une des raisons primordiales d'une opposition publique face à une décision de localisation d'un site de traitement. Une décision plus équitable n'est pas seulement supérieure à une décision moins équitable d'un point de vue philosophique, mais aussi d'un point de vue pratique, elle a une meilleure chance d'être approuvée par le public.

La majorité des travaux portant sur l'équité sont apparus dans la littérature économique. Par contre, il y a eu plusieurs tentatives dans la littérature de l'analyse décisionnelle pour modéliser l'équité (Erkut et Verter 1994). Ces études se sont concentrées sur les mortalités comme l'importante conséquence indésirable de l'activité dangereuse. Ainsi, comme résultat d'une activité potentiellement dangereuse, chaque individu va mourir ou non.

La difficulté de considérer le critère de l'équité est liée à sa définition. Il n'y a pas de consensus sur la façon de modéliser l'équité dans la littérature. En recherche opérationnelle, différentes approches ont été proposées : imposer une borne supérieure sur le nombre de cargaisons dans chaque segment de route, utiliser une borne supérieure sur le risque imposé sur chaque individu, etc. Zografos et Davis (1989) utilisent un ensemble de contraintes de capacité sur les arcs du réseau de transport. Batta, Karwan, Gopalan et Kolluri (1990) imposent une borne supérieure sur la différence de risque entre chaque paire de centre de population. Nous allons revenir plus loin sur ces différents modèles proposés.

Il y a un troisième critère à considérer lors de la modélisation du transport des matières dangereuse, qui est le coût. Du point de vue public, le plus important en ce qui concerne les décisions

de la logistique des matières dangereuses, ce sont les conséquences indésirables qui peuvent se produire (Erkut et Verter 1994). Par contre, les retombées économiques des décisions logistiques sur les entreprises sont plus importantes que l'impact négatif des conséquences liées aux matières dangereuses. Le risque et l'équité étant des critères sociaux, on ne peut pas s'attendre à ce que les responsables d'industries en tiennent compte, sauf lorsqu'ils sont imposés par les politiques gouvernementales ou pour sauver la réputation de la compagnie vis-à-vis du public.

Dans les modèles de planification du transport, le but est de choisir les routes à plus bas coût, entre les origines et les destinations, où le coût est calculé en fonction de la distance. Mais dans le contexte du transport des matières dangereuses, l'estimation du coût est un peu difficile ; en plus du coût calculé en fonction de la distance à parcourir, on ajoute le coût d'un accident s'il a lieu sur la route, le coût du nettoyage, celui des dégâts, les indemnités versées aux familles des victimes et le coût d'un éventuel encombrement causé par l'accident. Ce qui fait qu'il y a une incertitude considérable pour estimer les coûts. Par exemple, Wright (1993) a montré que le coût moyen par accident, basé sur 70 accidents de matières dangereuses au Canada, est égal à 600 000 dollars, alors que le coût estimé est supérieur à 10 millions de dollars dans le cas d'un accident de camion-citerne transportant du propane. Il est évident que le coût des accidents varie selon les routes empruntées et selon l'objectif de l'analyse. Lorsqu'il s'agit de la modélisation d'un système au niveau stratégique, ces coûts vont être considérés comme des coûts sociaux et doivent être inclus dans le modèle. Du point de vue du transporteur, tout dépend de qui paie les coûts des accidents, l'importance d'inclure les coûts dans les décisions étant moindre si les assurances paient les coûts des accidents.

Au début, les auteurs s'intéressaient aux problèmes de transport avec un seul objectif qui est le coût, probablement parce qu'ils ne considéraient pas le risque comme étant très important (Erkut et Verter 1994). Par la suite, plusieurs auteurs ont suggéré que la minimisation du risque est

d'une ultime importance, ce qui fait que la majorité des travaux dans le transport des matières dangereuses considèrent uniquement le risque dans leurs objectifs.

Parmi les premiers travaux qui ont adopté les approches multi-objectives pour le transport des matières dangereuses se trouve celui de Robbins (1981). Ses objectifs étaient de minimiser la longueur totale des routes et de minimiser la population exposée au risque. Une analyse statistique sur 105 paires d'origine-destination, sélectionnées à partir des autoroutes inter-états aux États-Unis, a montré que la faible longueur des routes explique la population exposée, ce qui fait que la réduction du risque procuré par les routes de population minimum comparativement aux routes de longueur minimum est statistiquement significative. L'analyse multi-objective a montré qu'il y a des routes qui réduisent la taille de la population en danger, mais n'augmentent pas la longueur du chemin de la même importance que les routes de population minimum.

Abkowitz et Chang (1988) ont développé une méthodologie afin d'incorporer le risque et le coût dans une structure pour optimiser les routes utilisées lors du transport des matières dangereuses. Le modèle minimise la somme pondérée du coût et du risque. Ils ont utilisé deux types de variables décisionnelles qui sont la quantité de la matière transportée du point d'expédition vers la destination et, comme deuxième type une variable binaire qui vaut 1 si la route est choisie et 0 si elle ne l'est pas. Les contraintes étaient de garantir que toutes les matières seraient livrées sans dépasser la capacité de la réception. Une attention particulière a été accordée à l'estimation du risque.

Zografos et Davis (1989) ont proposé un modèle pour réduire la menace sur les individus qui résident le long des routes dans le réseau de transport. Ils ont introduit une formulation multi-objective du problème du transport de la matière dangereuse en incorporant les quatre critères suivants :

- 1) minimiser le risque.
- 2) minimiser le risque sur certaines catégories de population.

3) minimiser le temps de transport.

4) minimiser les dégâts matériels.

Pour ce faire, ils proposent des contraintes de capacité sur les arcs pour satisfaire l'équité. Le choix est justifié par le fait que la majorité des modèles existants concernant le transport des matières dangereuses supposent que les arcs du réseau routier ont une capacité illimitée quant au nombre de cargaisons transportant les matières dangereuses. Cette supposition donne la possibilité qu'un petit nombre d'arcs reçoive la plus grande partie des cargaisons ; une conséquence immédiate d'une telle procédure est donc l'attribution d'un grand risque sur la population qui réside à proximité de ces arcs. Concernant l'approche de résolution, ces auteurs considèrent deux problèmes (modèle multi-objectif avec capacité et sans capacité) à buts multiples, tel que chaque fonction est transformée en contrainte, qui est bornée supérieurement par la valeur cible. Ils minimisent la nouvelle fonction objectif, qui est le produit du vecteur des termes de droite multiplié par les poids correspondant à la fonction initiale.

Batta, Karwan, Gopalan et Kolluri (1990) considèrent quant à eux les régions géographiques englobées par le réseau de transport, qu'ils divisent en k zones mutuellement disjointes, le nombre maximum T de trajets entre les origines (O) et les destinations (D) durant le temps pendant lequel ils veulent satisfaire l'équité. L'objectif est de trouver un ensemble T de routes (pas nécessairement distinctes) qui minimisent le risque total du transport. Afin de distribuer le risque équitablement le long des zones géographiques, ils imposent une borne supérieure sur la différence de risque entre chaque deux zones.

Quant à McCord et Leu (1995), ils ont présenté une approche d'utilité avec attributs multiples pour résoudre le problème du choix de route optimale des matières dangereuses, avec expédition unique, qui minimise les coûts de transport des matières dangereuses et leur exposition à la population. Ils ont montré que ce problème peut être résolu par des algorithmes traditionnels du plus court chemin. Ils ont discuté du fait que les paramètres des fonctions d'utilité avec attribut

multiple, celui liant la fonction de désutilité avec attribut de coût unique en une fonction de désutilité avec deux attributs de coût et exposition, ne peuvent être estimés avec exactitude. Dans l'étude numérique qu'ils présentent, ils montrent qu'une telle estimation n'est pas suffisante pour assurer que la route optimale soit unique ou pour éliminer un nombre substantiel de routes sous-optimales lorsque la route optimale est autre que celle avec coût minimum, ou celle qui minimise l'exposition de la population. Le nombre de routes générées par la variation du paramètre à l'intérieur des valeurs permises est suffisamment petit ; cependant, le modèle peut être utilisé pour générer des routes d'utilité avec attribut multiple non inférieur avant d'échanger avec les preneurs de décisions.

Lors de plusieurs affectations simultanées des demandes dans un réseau routier, les risques ont tendance à s'accroître sur certains segments de route. Cet accroissement s'explique par la présence des effets croisés qui sont dus à plusieurs flux de transport provenant de diverses régions et qui se recoupent en plusieurs points uniques. Dans une étude, Mohammed Karim Dinia (1999) a porté attention à l'accroissement des différents risques et à leur distribution spatiale. Il a déterminé une approximation des effets croisés. Pour cela, en premier lieu, il a fait l'affectation de 14 demandes de matières dangereuses, individuellement et simultanément, pour déterminer les chemins empruntés par leur transport. Cette première affectation avait pour objectif la minimisation du coût et du risque. L'analyse des résultats a permis de constater que les routes obtenues pendant l'affectation des demandes correspondent individuellement aux plus courts chemins. Cela lui a permis également d'identifier les effets croisés lors des affectations simultanées.

En deuxième lieu, Dinia (1999) a fait l'affectation de toutes les demandes simultanément, cette fois comme objectif, en plus de la minimisation du coût et du risque et la maximisation de l'équité. Les résultats obtenus ont montré que les risques ont été répartis sur plusieurs segments de tout le réseau, mais sans atteindre une distribution équitable.

Une comparaison entre l'affectation des demandes individuellement et celle de toutes les demandes simultanément a montré que, lors de l'affectation simultanée des demandes, les chemins ont changé quant à leur nombre et à leurs longueurs. Ceci est dû à l'objectif de la maximisation de l'équité. Dinia (1999) a conclu que malgré qu'il ait développé une méthode qui lui a permis de résoudre la problématique par un outil déjà existant, STAN (un système graphique et interactif, conçu spécifiquement pour la planification stratégique du transport au niveau national et régional), et qu'il ait réussi à faire une approximation des effets croisés, il n'a pas réalisé une distribution équitable des risques sur la totalité des liens du réseau routier. Il a proposé quelques réglementations, mais il recommande d'intégrer l'équité de façon parfaite dans un modèle.

Nous avons présenté les différentes manières de modéliser le risque et l'équité ainsi que les différents aspects du coût dans la littérature. Également, nous avons fait un survol sur certains travaux qui ont traité des problèmes de planification du transport des matières dangereuses. Ceci nous a permis de voir qu'aucun modèle n'a été proposé pour déterminer les routes pour le transport des matières dangereuses, en tenant compte du coût, du risque et de l'équité ainsi que de l'accumulation des différents risques sur certaines routes, provenant de plusieurs routes et de plusieurs matériaux. Notre modèle, qui tient compte des éléments mentionnés précédemment est donc une nouvelle contribution dans le domaine du transport de la matière dangereuse qui va donner une nouvelle approche pour réaliser la distribution spatiale du risque ou l'équité. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter notre modélisation du problème.

Chapitre 3

MODÉLISATION

Dans le premier chapitre, nous avons présenté notre problème, qui est la sélection globale des routes pour le transport de plusieurs matières dangereuses, entre plusieurs origines et plusieurs destinations, en tenant compte de l'impact possible en terme de coût, de risque et d'équité. La difficulté de cette modélisation est due au caractère conflictuel des trois critères, à la modélisation de l'équité, ainsi qu'à la représentation de la population distribuée à travers le réseau.

3.1 Description du modèle

Nous avons un réseau de transport des matières dangereuses constitué d'un ensemble d'origines O et de destinations D . Il y a un ensemble de cargaisons constitué de M produits (matières dangereuses) qui doivent être transportés depuis des origines vers des destinations. Le réseau routier se situe au milieu de différentes concentrations d'individus (la population est distribuée à travers le réseau). Certaines routes passent par de grandes villes comptant des milliers d'individus, d'autres routes passent par de petits villages ou quelques maisons à proximité de la route.

La première difficulté rencontrée lors de la modélisation du problème est la représentation de la population. En effet, les individus qui se trouvent dans le réseau routier ne sont pas tous exposés

au même risque du fait qu'ils ne se trouvent pas tous à la même distance des routes. Certains sont proches de quelques segments de routes et loin d'autres. Afin de résoudre ce problème, nous avons procédé comme suit :

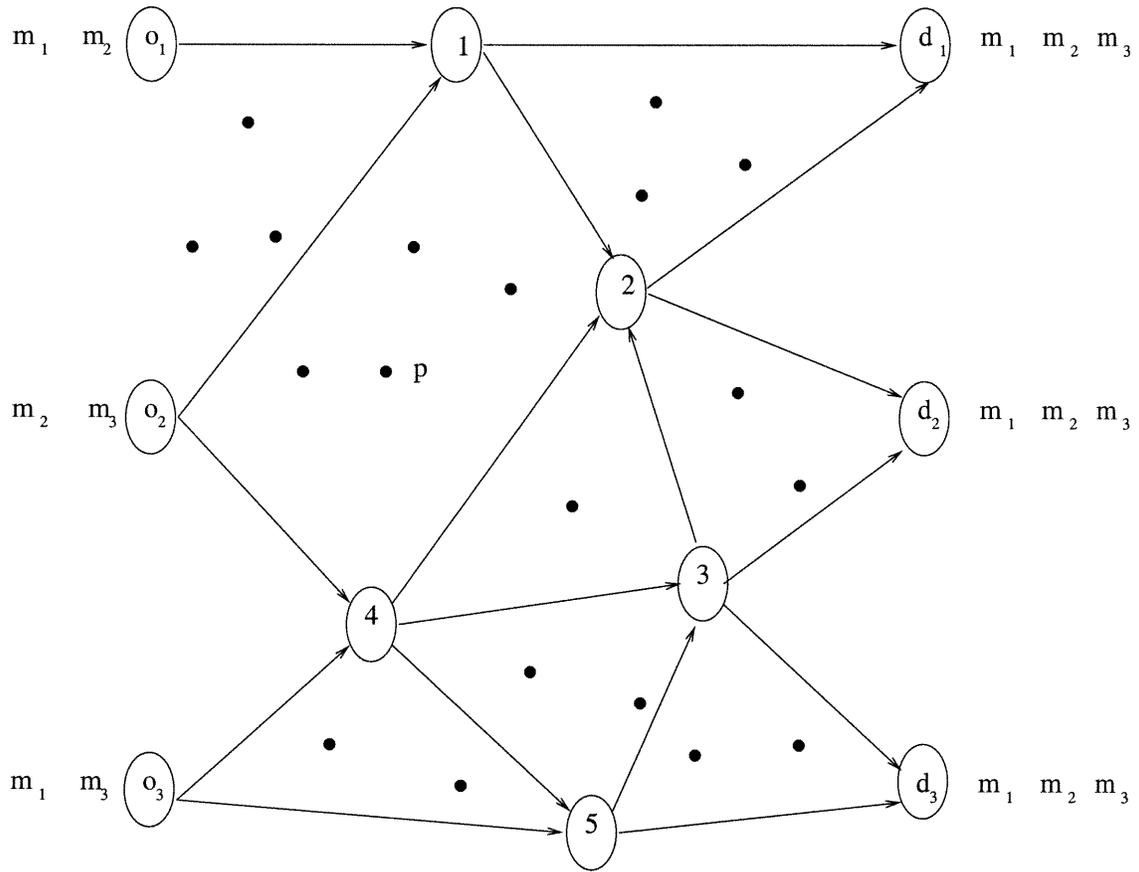
- Nous avons regroupé les individus qui se trouvent dans la même région et qui sont exposés au même risque, dû au mouvement d'une cargaison transportant une matière dangereuse, tel que chaque groupe est représenté par un **centre de population** p , qui représente N_p individus. Nous obtiendrons ainsi un ensemble de centres de population P (nous reviendrons plus loin sur l'estimation du risque auquel est exposée chaque population).
- Nous avons divisé les routes en segments représentés par des arcs, relativement uniformes en ce qui a trait au risque imposé sur le centre de population p lors du passage d'une cargaison transportant une matière dangereuse m (Erkut et Verter 1995c). Cela nous donne un ensemble d'arcs A . La figure 3.1 représente un exemple d'un réseau de transport des matières dangereuses. Les points noirs qui se trouvent distribués à travers le réseau représentent les centres de population P .

3.1.1 Modélisation du risque

Après avoir eu un aperçu des différents modèles de risque dans la littérature ainsi que les critiques qui leur ont été adressées, nous avons choisi de calculer le risque selon le modèle du risque traditionnel pour les raisons suivantes :

- le modèle de la population exposée au risque est adéquat dans le cas des matières extrêmement nuisibles. Nous voulons construire un modèle qui peut être utilisé pour n'importe quel type de matières dangereuses.
- Le modèle de la probabilité d'incident est approprié pour les matières qui ne sont pas très dangereuses. Notre objectif est d'avoir un modèle utilisé par tout type de matières dangereuses, qu'elles soient extrêmement dangereuses ou non.

FIG. 3.1 – Réseau de transport des matières dangereuses



- Le modèle du risque perçu peut privilégier certains segments de routes par rapport à d'autres, ce qui ne correspond pas à notre objectif.
- Le modèle du risque conditionnel peut conduire à des solutions illogiques, donc on ne le considère pas dans notre modélisation.

Le risque traditionnel est donc défini comme suit : la probabilité qu'un événement indésirable se produise multipliée par les conséquences de cet événement. En raison de la difficulté d'estimer les conséquences indésirables de l'accident, nous nous concentrons sur les accidents mortels dus à la dispersion des matières dangereuses.

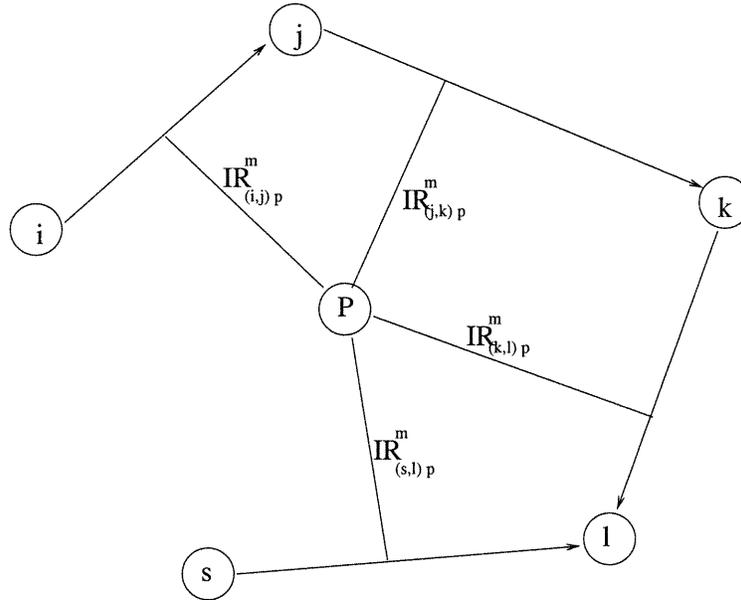
Nous avons mentionné précédemment que nous regroupons les individus qui se trouvent dans la même région et qui sont exposés au même risque dû au mouvement d'une cargaison transportant une matière dangereuse. Tous les individus qui se trouvent proches les uns des autres et pour lesquels le risque auquel ils sont exposés est à peu près le même seront représentés par un centre de population p auquel on associe un risque individuel $IR_{(i,j)p}^m$; le risque qui est imposé sur l'ensemble des individus représentés par le centre de population p est $R_{(i,j)p}^m$ et est calculé par le risque individuel multiplié par le nombre d'individus représenté par p

$$R_{(i,j)p}^m = IR_{(i,j)p}^m N_p.$$

Maintenant considérons le cas d'une ville qui se trouve entre deux routes nationales ; les habitants de cette ville ne sont pas seulement exposés au risque provenant d'une seule route à la fois lors du passage des cargaisons des matières dangereuses, mais au risque provenant des deux routes. Le centre de population p n'est pas seulement sujet au risque dû à un seul arc, il y a une accumulation des différents risques provenant de plusieurs arcs. Cette quantité d'accumulation

est proportionnelle à la situation du centre de population p dans le réseau ; certains sont entourés de plusieurs arcs et sont exposés à tous les risques provenant de ces arcs. La figure 3.2 présente l'exemple d'un centre de population p qui est exposé à des risques provenant de 4 arcs.

FIG. 3.2 – Différents risques auxquels est exposée la population p



Nous calculons le risque accumulé sur le centre de population p comme suit :

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} IR_{(i,j)p}^m$$

Le risque accumulé sur l'ensemble des individus représentés par le centre de population p est calculé comme suit en sachant que $R_{(i,j)p}^m = IR_{(i,j)p}^m N_p$

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} R_{(i,j)p}^m$$

tel que α_m est le facteur de pondération de la matière m . Ce facteur est attribué en fonction du danger de la matière dangereuse. Plus la matière m est dangereuse pour la population, plus son facteur de pondération est élevé. Si toutes les matières ont le même danger sur le même réseau,

alors tous les facteurs sont égaux et dans ce cas on peut les ignorer.

3.1.2 Modélisation de l'équité

Nous avons un objectif important à atteindre lors de la résolution de notre problème qui est d'assurer une répartition équitable des risques entre les populations de la région étudiée. Nous avons vu au chapitre précédent qu'il n'existait pas de consensus sur la façon de modéliser l'équité dans la littérature. Nous aurions pu, par exemple, tenir compte de cette préoccupation relativement à l'équité en ajoutant à la fonction objectif un terme correspondant à l'écart maximal entre les risques encourus par deux individus. De tels modèles pouvant aisément mener à des solutions aberrantes, comme de détériorer la situation des personnes aux risques les plus faibles, nous avons préféré une approche plus simple et plus aisée à manipuler : l'imposition de contraintes permettant de borner les risques individuels de chaque individu.

Afin de pouvoir contrôler et ajuster le risque imposé à chaque centre de population p , nous avons retenu les contraintes suivantes : contraintes de risque dû à chaque produit, contraintes de risque dû à l'ensemble des matières dangereuses. Dans ce qui suit, nous allons présenter cette modélisation en détail :

1. Contraintes de risque

Afin de pouvoir contrôler le risque auquel chaque individu est exposé, nous avons imposé deux bornes différentes et complémentaires sur le risque. La première est due à une seule matière dangereuse à la fois et la deuxième est due à l'accumulation de plusieurs matières dangereuses, ainsi :

– Pour chaque matière dangereuse

Le risque sur le centre de population p dû au transport de la matière m ne doit pas dépasser une limite Y_p^m . Y_p^m est une valeur fixe qu'on précise lors de la résolution du

problème. Cette contrainte nous permet d'imposer le risque maximum toléré sur chaque centre de population p dû au passage de la matière m ,

$$\sum_{(i,j) \in A} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m \leq Y_p^m, \quad \forall m \in M, p \in P.$$

$x_{(i,j)}^m$ est la variable représentant le nombre de cargaisons transportant la matière m sur l'arc (i, j) .

– Pour l'ensemble des matières dangereuses

Le risque total sur le centre de population p dû au transport de toutes les matières ne doit pas dépasser Z_p . Z_p est une valeur fixe qu'on précise lors de la résolution. Ceci nous permet de contrôler le risque total imposé sur le centre de population p ,

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m \leq Z_p, \quad \forall p \in P.$$

3.1.3 Modélisation du coût

Nous avons vu lors du chapitre précédent que l'estimation du coût dans le contexte du transport des matières dangereuses est composée de plusieurs éléments ; en plus du coût calculé en fonction de la distance à parcourir, on ajoute le coût d'un accident s'il a lieu sur la route, le coût du nettoyage, celui des dégâts, les indemnités versées aux familles des victimes et le coût d'un éventuel encombrement causé par l'accident. Ce qui fait qu'il y a une incertitude considérable pour estimer les coûts. Mais l'importance d'inclure ces derniers coûts d'accidents dépend de l'utilisateur du modèle. Vu que notre modèle est destiné à des utilisateurs de différents paliers du gouvernement et du secteur privé et dans le souci de ne pas rendre l'estimation du coût très complexe et se concentrer plutôt sur la modélisation de l'équité, nous avons décidé de considérer

le coût en fonction de la distance à parcourir ce qui est en général une bonne représentation du coût. Nous avons associé à chaque arc (i, j) un coût $C_{(i,j)}^m$ qui est celui du passage de la cargaison transportant la matière m .

Dans ce qui suit, nous allons présenter la notation utilisée dans le modèle, puis la formulation du modèle (fonctions objectifs et contraintes).

3.1.4 Notation

$G = (N, A)$ graphe orienté;

N : ensemble de noeuds;

O : ensemble d'origines;

O^m : ensemble d'origines d'où provient la matière dangereuse m ;

D : ensemble de destinations;

D^m : ensemble de destinations où doit être acheminée la matière dangereuse m ;

M : ensemble de matières dangereuses;

O_i^m : offre du noeud d'origine i en nombre de cargaisons transportant la matière dangereuse m ;

D_i^m : demande du noeud de destination i en nombre de cargaisons transportant la matière dangereuse m ;

A : ensemble d'arcs (i, j) ;

P : ensemble de centres de population p ;

N_p : nombre d'individus qui sont représentés par le centre de population p ;

$K_{(i,j)}^m$: capacité maximum du nombre de cargaisons transportant la matière m sur l'arc (i, j) ;

α_m : facteur de pondération de la matière m ;

$C_{(i,j)}^m$: coût du passage de la cargaison transportant m par l'arc (i, j) ;

$IR_{(i,j)p}^m$: risque individuel imposé sur chaque individu qui appartient au centre de population p lors du passage d'une cargaison transportant la matière m par l'arc (i, j) ;

$R_{(i,j)p}^m$: risque imposé sur l'ensemble du centre de population p lors du passage de la cargaison transportant la matière m par l'arc (i, j) , qu'on calcule comme suit : $R_{(i,j)p}^m = IR_{(i,j)p}^m N_p$;

$x_{(i,j)}^m$: la variable représentant le nombre de cargaisons transportant la matière m sur l'arc (i, j) .

3.1.5 Les fonctions objectifs

3.1.5.1 Minimisation du coût

Notre premier objectif est de minimiser le coût total pour le transport. Alors nous minimisons la somme sur toutes les matières dangereuses, sur tous les arcs, des coûts du passage de la cargaison transportant la matière m sur l'arc (i, j) :

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} C_{(i,j)}^m x_{(i,j)}^m.$$

3.1.5.2 Minimisation du risque

Notre deuxième objectif est de minimiser le risque total sur le réseau. Alors nous minimisons la somme sur toute la population, sur toutes les matières dangereuses, sur tous les arcs, du risque imposé sur l'ensemble du centre de population p multiplié par le nombre de cargaisons transportant la matière m sur l'arc (i, j) multiplié par le facteur de pondération de la matière m :

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} R_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m.$$

Les deux fonctions objectifs celle du coût et du risque sont traité simultanément, nous avons ainsi un problème multicritères.

3.1.6 Les contraintes

3.1.6.1 Contraintes de conservation de flot

–

$$\sum_{j \in N | (i,j) \in A} x_{ij}^m = O_i^m, \quad \forall i \in O, m \in M \quad (3.1)$$

nous garantissant que les offres seront satisfaites.

–

$$\sum_{j \in N | (j,i) \in A} x_{ji}^m = D_i^m, \quad \forall i \in D, m \in M \quad (3.2)$$

nous garantissant que les demandes seront satisfaites.

–

$$\sum_{j \in N | (i,j) \in A} x_{ij}^m - \sum_{j \in N | (j,i) \in A} x_{ji}^m = 0, \quad \forall i \notin O^m, i \notin D^m, m \in M \quad (3.3)$$

sont les équations de conservation de flot pour les noeuds intermédiaires.

3.1.6.2 Contraintes d'équité

1. Contraintes de risque :

– Pour chaque matière dangereuse

$$\sum_{(i,j) \in A} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m \leq Y_p^m, \quad \forall m \in M, p \in P.$$

– Pour l'ensemble des matières dangereuses

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m \leq Z_p, \quad \forall p \in P.$$

3.1.6.3 Contraintes de capacité

$$x_{ij}^m \leq K_{(i,j)}^m, \quad \forall (i, j) \in A, m \in M.$$

$K_{(i,j)}^m = 0$ si le transport de la matière m n'est pas permis sur l'arc (i, j) .

Dans ce qui suit, nous présentons deux formulations pour notre modèle. La première est utilisée lorsque l'on se contente de spécifier pour chaque sommet son niveau d'offre (ou de demande) pour chacun des produits considérés. Nous appelons ce cas origines-destinations libres. Cette formulation permet aussi de savoir entre quelle origine et quelle destination chaque cargaison se déplacera. Cette formulation s'applique bien à des situations où une agence centrale coordonne les mouvements des matières dangereuses dans le but d'en limiter les impacts négatifs. La deuxième formulation correspond à un cas plus contraint que le premier, lorsque chaque offre est destinée spécialement à une demande. On l'appelle le cas des origines-destinations fixes. Cette formulation est plus proche de la situation à laquelle font face les transporteurs à qui il ne reste ordinairement qu'à déterminer le chemin que suivra une cargaison entre son origine et sa destination.

3.2 Les modèles

3.2.1 Origines-destinations libres

Dans ce modèle, les produits d'origine o peuvent être envoyés vers n'importe quelle destination d dans la mesure où on respecte les demandes. On obtient le modèle suivant :

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} R_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m \quad (3.4)$$

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} C_{(i,j)}^m x_{(i,j)}^m \quad (3.5)$$

s.à.

$$\sum_{j \in N | (i,j) \in A} x_{ij}^m = O_i^m, \quad \forall i \in O, m \in M \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in N | (j,i) \in A} x_{ji}^m = D_i^m, \quad \forall i \in D, m \in M \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in N | (i,j) \in A} x_{ij}^m - \sum_{j \in N | (j,i) \in A} x_{ji}^m = 0, \quad \forall i \notin O^m, i \notin D^m, m \in M \quad (3.8)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m \leq Y_p^m, \quad \forall m \in M, p \in P \quad (3.9)$$

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^m \leq Z_p, \quad \forall p \in P \quad (3.10)$$

$$x_{ij}^m \leq K_{(i,j)}^m, \quad \forall (i,j) \in A, m \in M \quad (3.11)$$

$$x_{ij}^m \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A, m \in M \quad (3.12)$$

3.2.2 Origines-destinations fixes

Ce modèle correspond au cas où chaque produit d'une origine o doit être envoyé vers une destination fixe d .

3.2.2.1 Notation

$x_{(i,j)}^{m(o,d)}$: variable qui représente le nombre de cargaisons transportant la matière m sur l'arc (i, j) , de l'origine o à la destination d ;

F^m : ensemble des paires origine-destination du produit m ;

$O_i^{m(i,d)}$: offre du noeud d'origine i en nombre de cargaisons transportant la matière dangereuse m à la destination d .

$$O_i^m = \sum_{(i,d) \in F} O_i^{m(i,d)}$$

$D_i^{m(o,i)}$: demande du noeud de destination i en nombre de cargaisons transportant la matière dangereuse m de l'origine o .

$$D_i^m = \sum_{(o,i) \in F} D_i^{m(o,i)}$$

3.2.2.2 Le modèle

On obtient le modèle (O, D) suivant :

$$\min \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} \sum_{(o,d) \in F^m} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^{m(o,d)} \quad (3.13)$$

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{(o,d) \in F^m} C_{(i,j)}^m x_{(i,j)}^{m(o,d)} \quad (3.14)$$

s.à.

$$\sum_{j \in N | (i,j) \in A} x_{ij}^{m(i,d)} = O_i^{m(i,d)}, \quad \forall i \in O, m \in M, (i,d) \in F^m \quad (3.15)$$

$$\sum_{j \in N | (j,i) \in A} x_{ji}^{m(o,i)} = D_i^{m(o,i)}, \quad \forall i \in D, m \in M, (o,i) \in F^m \quad (3.16)$$

$$\sum_{j \in N | (i,j) \in A} \sum_{(o,d) \in F^m} x_{ij}^{m(o,d)} - \sum_{j \in N | (j,i) \in A} \sum_{(o,d) \in F^m} x_{ji}^{m(o,d)} = 0, \quad \forall i \neq o, i \neq d, m \in M, (o,d) \in F^m \quad (3.17)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{(o,d) \in F^m} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^{m(o,d)} \leq Y_p^m, \quad \forall m \in M, p \in P \quad (3.18)$$

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A} \sum_{(o,d) \in F^m} IR_{(i,j)p}^m x_{(i,j)}^{m(o,d)} \leq Z_p, \quad \forall p \in P \quad (3.19)$$

$$\sum_{(o,d) \in F^m} x_{ij}^{m(o,d)} \leq K_{(i,j)}^m, \quad \forall (i,j) \in A, m \in M \quad (3.20)$$

$$x_{ij}^{m(o,d)} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A, m \in M, (o,d) \in F^m. \quad (3.21)$$

3.3 Conclusion

Nous avons proposé une nouvelle modélisation pour la sélection globale des routes pour le transport de plusieurs matières dangereuses, entre plusieurs origines et plusieurs destinations, en tenant compte de l'impact possible, en terme de coût, de risque et d'équité. La difficulté de cette modélisation est due au caractère conflictuel des trois critères, à la modélisation de l'équité ainsi qu'à la représentation de la population distribuée à travers le réseau. Pour cela, nous avons regroupé les individus qui se trouvent dans la même région et qui sont exposés au même risque dû au mouvement d'une cargaison transportant une matière dangereuse puis, nous les avons représentés par des centres de populations. Nous avons choisi de satisfaire l'équité par des contraintes afin de pouvoir analyser chaque individu sur le réseau. Dans le prochain chapitre, nous présentons la méthode de résolution suivie d'une analyse des résultats obtenus lors de l'expérimentation du modèle.

Chapitre 4

RÉSOLUTION ET EXPÉRIMENTATION

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une nouvelle modélisation pour la sélection globale des routes pour le transport de plusieurs matières dangereuses, entre plusieurs origines et plusieurs destinations, en tenant compte de l'impact possible, en terme de coût, de risque et d'équité. Nous présentons dans ce qui suit la méthode de résolution, ensuite nous expliquons la façon avec laquelle nous avons généré les données afin de pouvoir tester notre modèle. Par la suite, nous présentons le plan d'expérimentation, l'analyse détaillée de trois problèmes, suivie d'une analyse globale de tous les problèmes résolus.

4.1 Approche de résolution

Nous avons un problème linéaire avec deux objectifs. Afin de le résoudre nous devons d'abord choisir une méthode pour le problème multicritères.

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation multicritères. Dans ce qui suit nous allons donner un aperçu global de quelques-unes, puis nous présentons la méthode que nous avons choisie.

- Méthode de réduction du domaine réalisable (Benayoun, Montgolfier, Tergny et Laritchev 1971). À partir du domaine réalisable S on ajoute des contraintes puis on résout le problème d'optimisation dans un domaine de plus en plus petit.

- Méthode de recherche en ligne (Geoffrion, Dyer et Feinberg 1972). À partir d'une solution initiale réalisable on essaie d'améliorer la solution à chaque itération. Le gradient d'une fonction d'utilité est utilisée afin d'améliorer la direction.
- Méthode de réduction de l'espace des vecteurs poids (Zionts et Wallenius 1983). Cette méthode consiste à ramener le problème multicritères à un problème de programmation paramétrique, puis à chaque itération (en demandant à l'utilisateur de choisir entre un point proposé et les autres points extrêmes) de réduire l'espace des vecteurs poids $\Lambda = \{\lambda \in R^k / \lambda_i > 0, \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1\}$. Le processus continue jusqu'à ce que Λ soit réduit à un petit ensemble pour qu'une solution finale soit identifiée.
- Othmani (1998) a proposé une nouvelle approche appelée OMAP (Optimisation Multicritère utilisant une Analyse Partielle), qui consiste à mener une analyse plus détaillée des différentes facettes du problème lorsqu'une analyse générale est insuffisante. Cette étude détaillée se traduit par un passage d'une analyse globale du problème, dans laquelle il examine le "comportement" des solutions par rapport à tous les critères, à une analyse partielle, dans laquelle il examine le "comportement" des solutions par rapport à certaines parties de l'ensemble de critères.

Notre but dans ce mémoire n'est pas d'étudier la performance d'une méthode de multicritères par rapport à une autre, ou d'essayer d'identifier la frontière du domaine, mais plutôt d'utiliser un logiciel pour résoudre notre problème linéaire multicritères afin de pouvoir comparer la sélection globale avec équité obtenue avec la sélection utilisée couramment. Pour cela, nous avons choisi une méthode simple qui est la méthode de pondération (Steuer 1989, Ferland 1997). Cette méthode nous permettra de convertir le problème linéaire multi-objectifs en un problème linéaire avec un seul objectif qu'on peut résoudre en utilisant un logiciel d'optimisation linéaire.

La méthode de pondération consiste à attribuer deux poids $\lambda_1 \geq 0$ et $\lambda_2 \geq 0$ aux fonctions objectifs, risque et coût respectivement, tel que $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$. λ_1 et λ_2 sont choisis selon l'importance

d'un objectif par rapport à l'autre. Ainsi, plus λ_1 est élevé, plus l'objectif du risque est important par rapport à l'objectif du coût, et vice-versa (plus loin dans la partie expérimentale, nous allons revenir sur le choix de λ_1 et λ_2).

Une fois les deux poids λ_1 et λ_2 spécifiés, nous obtiendrons un problème linéaire avec un seul objectif. Nous utiliserons le logiciel d'optimisation CPLEX (V6.6) pour la résolution des problèmes.

4.2 Génération des problèmes

Afin de pouvoir tester notre modèle, Nous avons pris des problèmes de multiproduits avec capacité qui étaient à la disposition de l'équipe de recherche du CRT (Centre de recherche sur les transports), puis nous les avons transformés de la façon suivante afin qu'ils répondent à nos besoins :

- Chaque réseau routier disponible est représenté par un graphe orienté $G(N, A)$, tel que N est l'ensemble des noeuds (origines O , destinations D , intermédiaires I), A est l'ensemble des arcs et M , l'ensemble de produits. Il y a deux types de réseaux : origines-destinations fixes et origines-destinations libres.
- Pour chaque produit m nous avons généré un facteur de pondération de matière dangereuse α_m , selon une loi uniforme dans l'intervalle $[2, 10]$ (2 produits peu dangereux, 10 produits extrêmement nuisibles).
- Nous avons généré un ensemble de centre de population P . Nous avons associé à chaque sommet du réseau un centre de population p afin d'obtenir un réseau interurbain. Chaque centre de population est caractérisé par : N_P , $IR_{(i,j)p}^m$, Y_p^m et Z_p .
- N_P , le nombre d'individus représentés par le centre de population p , est généré selon une loi uniforme dans l'intervalle $[200, 9717]$.

Notons que dans le but de se rapprocher le plus possible de la réalité, nous avons utilisé des données sur les populations et les risques à partir d'un des articles des membres de l'équipe

de recherche (Erkut et Verter 1995b)

- $IR_{(i,j)p}^m$, le risque individuel imposé sur chaque individu qui appartient au centre de population p lors du passage d'une cargaison transportant la matière m par l'arc (i, j) , est généré selon une loi uniforme dans l'intervalle $[1.42E - 06, 4.14E - 04]$.
- Y_p^m représente le risque maximum qu'il ne faut pas dépasser sur le centre de population p lors du transport de la matière dangereuse m . Ce paramètre influence le choix des routes sélectionnées pour le transport des matières dangereuses. En effet, si $Y_p^m = \infty$, on ne tient pas compte des contraintes (3.9) de notre modèle, ce qui fait qu'il n'y a pas de borne supérieure sur le risque auquel la population p est exposée lors du passage des cargaisons transportant la matière m . Par contre, une fois Y_p^m est fixé, nous tenons compte de cette limite lors de la résolution du problème. Pour chaque problème nous avons deux cas :

1. $Y_p^m = \infty$, (Notons que si $Y_p^m = \infty$ et $Z_p = \infty$, alors on obtient un problème sans contraintes d'équité; nous y reviendrons plus tard)
2. Y_p^m est fixé. Nous avons fixé Y_p^m de deux manières différentes, en fonction du lieu où se trouve la population p par rapport au site d'entreposage (origine ou destination) de la matière m .

(a) Si le centre de population p est associé à un noeud d'origine ou de destination de la matière m (se trouve à proximité du noeud), alors :

- Si p est associé à un noeud i qui est origine

$$Y_p^m = IR_{(i,j)p}^m O_i^m + F$$

- Si p est associé à un noeud j qui est destination

$$Y_p^m = IR_{(i,j)p}^m D_j^m + F$$

avec $IR_{(i,j)p}^m$, le risque individuel imposé sur chaque individu qui appartient à p lors du passage de la cargaison transportant la matière m par l'arc (i, j) ; O_i^m , l'offre du noeud d'origine i en nombre de cargaisons transportant la matière dangereuse m ; D_j^m , la demande du noeud de destination j en nombre de cargaisons transportant la matière dangereuse m .

Par ces deux formules nous permettons le passage de toutes les cargaisons transportant la matière m à côté du centre de population p , pour pouvoir la stocker ou la livrer. On ajoute à cela une valeur F , qui permettra le passage d'autres cargaisons transportant la même matière; plus F est petite, plus le nombre de cargaisons qui pourront passer sera réduit, ce qui obligera les transporteurs à emprunter d'autres routes. Nous avons pris les plus petites valeurs de F pour lesquelles le problème reste réalisable. Ce choix est dû au fait que nous voulons voir quel est le plus petit risque auquel nous pouvons exposer la population et quelle est la meilleure distribution équitable, en terme de risque, que nous pouvons obtenir (nous reviendrons sur cette discussion lors de l'analyse des résultats).

- (b) Si le centre de population p est associé à un noeud intermédiaire, c'est-à-dire qu'il ne se trouve pas à proximité d'origines ou de destinations du produit m , alors Y_p^m sera calculé comme suit :

$$Y_p^m = (IR_{(i,j)p}^m \sum_{i \in O} O_i^m) / RMAX$$

avec $\sum_{i \in O} O_i^m$, la somme des offres en nombre de cargaisons transportant la matière dangereuse m ; $RMAX$, une valeur par laquelle nous divisons le risque auquel peuvent être exposés les individus qui appartiennent au centre de population p . De cette façon, nous nous assurons qu'aucun centre de population ne sera exposé

seul à tout le risque dû au transport de la matière m . Nous avons pris les plus grandes valeurs de $RMAX$ pour lesquelles le problème reste réalisable.

– Z_p représente le risque total qu'il ne faut pas dépasser sur le centre de population p , lors du transport de l'ensemble des matières dangereuses. Nous avons deux cas :

1. $Z_p = \infty$ si en plus $Y_p^m = \infty$ pour tout m on obtient un problème sans contraintes d'équité.
2. Fixer Z_p afin d'obtenir les problèmes avec contraintes d'équité.

D'abord rappelons que notre modèle est destiné à la sélection globale des routes pour le transport des matières dangereuses. Notre objectif est donc de garantir l'équité lors du transport, c'est-à-dire de contrôler le risque auquel la population est exposée lors du transport et non pas lors de l'entreposage. Afin de distinguer les deux risques, nous avons séparé le risque total auquel est exposée la population en deux : risque dû à l'entreposage (la livraison ou le stockage des produits) et le risque dû au transport. Le risque dû à l'entreposage est le même qu'on obtient lors de la résolution, quel que soit le problème avec contraintes d'équité ou non. Pour un centre de population p qui se trouve à proximité d'un noeud i (origine ou destination d'une ou de plusieurs matières dangereuses) le risque dû à l'entreposage est défini comme suit : C'est l'offre ou la demande du noeud i pour le produit m , multipliée par le risque individuel imposé sur chaque individu qui appartient au centre de population p (qui est associé au noeud i) lors du passage d'une cargaison transportant la matière m .

Le risque dû à l'entreposage est calculé de la façon suivante :

– Lorsque le noeud i est un endroit de livraison (origine) pour une ou plusieurs matières :

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A | i \in O} IR_{(i,j)p}^m O_i^m$$

- Lorsque le noeud i est un endroit de stockage (destination) pour une ou plusieurs matières :

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(j,i) \in A | i \in D} IR_{(j,i)p}^m D_i^m$$

- Lorsque le noeud i est un endroit de livraison (origine) pour quelques matières et un endroit de stockage (destination) pour d'autres matières :

$$\sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A | i \in O} IR_{(i,j)p}^m O_i^m + \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(j,i) \in A | i \in D} IR_{(j,i)p}^m D_i^m$$

Afin d'établir une équité, en terme de risque, sur toute la population qui se trouve sur le réseau routier du transport des matières dangereuses, il faut fixer le même Z_p pour tous les centres de population ; ceci nous assure que la limite du risque ne sera pas dépassée. Comme nous avons quelques centres de population qui résident à proximité des sites d'entreposage (origines ou destinations) pour certaines matières, nous avons calculé Z_p comme suit :

- Lorsque le noeud i est un endroit de livraison (origine) pour une ou plusieurs matières :

$$Z_p = \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A | i \in O} IR_{(i,j)p}^m O_i^m + Z_f$$

- Lorsque le noeud i est un endroit de stockage (destination) pour une ou plusieurs matières :

$$Z_p = \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(j,i) \in A | i \in D} IR_{(j,i)p}^m D_i^m + Z_f$$

- Lorsque le noeud i est un endroit de livraison (origine) pour quelques matières et un

endroit de stockage (destination) pour d'autres matières :

$$Z_p = \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(i,j) \in A | i \in O} IR_{(i,j)p}^m O_i^m + \sum_{m \in M} \alpha_m \sum_{(j,i) \in A | i \in D} IR_{(j,i)p}^m D_i^m + Z_f$$

- Si le centre de population p est associé à un noeud intermédiaire, c'est-à-dire qu'il ne se trouve pas à proximité d'un endroit de livraison (origine) ou d'un endroit de stockage (destination) :

$$Z_p = Z_f$$

Ici, Z_f représente la même quantité pour tous les centres de population qui se trouvent sur le même réseau routier, afin d'avoir la meilleure équité possible. Nous avons pris les plus petites valeurs de Z_f pour lesquelles le problème reste réalisable.

Nous avons généré 11 problèmes qui sont représentés dans le tableau suivant (tableau 4.1).

Problème	Nb.de noeuds	Nb.d'arcs	Nb.de produits	Nb.de centres de population	Nb. d'origines par produit	Nb. de destinations par produit	Nb. de noeuds qui sont soit origine ou destination
1 ^a	20	228	20	20	1-2	1-2	10
2 ^a	20	230	20	20	1-2	1-2	13
3 ^a	20	230	40	20	1-5	1-5	13
4 ^a	20	229	25	20	1-8	1-8	10
5 ^a	30	519	20	30	1-5	1-5	11
6 ^a	30	517	20	30	1-5	1-5	9
7 ^a	30	683	40	30	1-10	1-10	15
8 ^a	30	686	20	30	1-5	1-5	10
9 ^a	30	687	20	30	1-5	1-5	10
10 ^a	30	687	20	30	1-5	1-5	10
11 ^b	20	228	200	20	1	1	20

^aorigines-destinations libres

^borigines-destinations fixes

TAB. 4.1 – Résumé des problèmes générés

4.3 Plan d'expérimentation

Afin de montrer l'efficacité de la nouvelle modélisation des effets réseaux dans le transport des matières dangereuses, que nous avons proposée dans ce mémoire, nous avons fait une comparaison entre une sélection individuelle des routes pour le transport des matières dangereuses et une sélection globale en tenant compte des contraintes d'équité.

Rappelons que la sélection individuelle consiste à sélectionner individuellement les routes d'un réseau routier en minimisant le risque imposé sur les individus en fonction de chaque route, mais sans tenir compte de l'accumulation du risques sur certaines populations.

Il y a quatre paramètres importants dans notre modèle qui influencent les résultats : le choix des poids λ_1 et λ_2 , Y_p^m et celui de Z_p .

En ce qui concerne le choix de λ_1 et λ_2 , nous avons mentionné précédemment qu'on attribue les poids (λ_1, λ_2) aux deux fonctions objectifs selon une certaine priorité. Ainsi, si la priorité est de diminuer le risque total sur le réseau nous fixons $\lambda_1 > \lambda_2$. Par contre, si la priorité est de minimiser le coût nous fixons $\lambda_1 < \lambda_2$. Nous avons testé trois cas :

1. $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$. Toute la priorité est accordée à la minimisation du risque
2. $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1$. Toute la priorité est accordée à la minimisation du coût.
3. $\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.5$. Les deux objectifs ont la même priorité. Nous avons testé également d'autres combinaisons de λ_1 et λ_2 , $(\lambda_1 = 0.3$, $\lambda_2 = 0.7)$, $(\lambda_1 = 0.7$, $\lambda_2 = 0.3)$, $(\lambda_1 = 0.4$, $\lambda_2 = 0.6)$, et nous avons observé un comportement extrêmement uniforme; plus λ_1 s'approche de 1 et λ_2 s'approche de 0, plus nous obtenons des résultats qui convergent vers ceux obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$, et vice-versa. Donc nous avons trouvé que les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.5)$ sont représentatifs.

Nous avons testé 11 problèmes générés (caractéristiques dans le tableau 4.1). Pour chaque problème nous présentons 6 tests :

1. Sélection individuelle avec ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$)
2. Sélection globale avec équité avec ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$)
3. Sélection individuelle avec ($\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1$)
4. Sélection globale avec équité avec ($\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1$)
5. Sélection individuelle avec ($\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.5$)
6. Sélection globale avec équité avec ($\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.5$)

4.4 Analyse des résultats

Afin de pouvoir analyser les résultats pour chaque test effectué nous présentons ce qui suit :

CPU : le temps de calcul lors de la résolution du problème qui est obtenu en secondes.

Coût total : la valeur de la fonction objectif du coût.

Risque total du réseau : la valeur de la fonction objectif du risque, qui est le risque total sur tout le réseau.

Pour chaque centre de population p nous présentons trois risques :

1. Risque individuel total ou RIT : c'est le risque total auquel est exposé chaque individu qui appartient au centre de population p à la fin de la résolution du problème (RIT = risque dû à l'entreposage + risque dû au transport).

En multipliant chaque RIT de p par le nombre d'individus N_p représenté par ce dernier, puis en faisant la somme du tout, nous obtiendrons la valeur du Risque total du réseau (dont nous avons parlé précédemment).

2. Risque d'entreposage ou RE : c'est le risque dû à l'entreposage (demande ou offre de la matière dangereuse) auquel est exposé chaque individu qui appartient au centre de population p . Le résultat obtenu concernant ce risque est pareil pour le même problème dans les 6 tests effectués. C'est un risque qu'on ne peut pas changer car il dépend de

l'installation des sites.

3. Risque dû au transport ou RT : c'est le risque dû au transport auquel est exposé chaque individu qui appartient au centre de population p . C'est ce risque qui nous intéresse et sur lequel nous voulons avoir la meilleure équité possible. Afin de mieux analyser les résultats, nous avons ajouté à la fin de chaque tableau le maximum et le minimum obtenus, pour voir l'écart, en terme de risque, entre les centres de population qui se trouvent sur le même réseau routier.

Pour chaque problème nous avons regroupé les résultats dans 3 tableaux :

Le premier tableau inclut la sélection individuelle et la sélection globale avec équité pour ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$).

Le deuxième tableau inclut la sélection individuelle et la sélection globale avec équité pour ($\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1$).

Le troisième tableau inclut la sélection individuelle et la sélection globale avec équité pour ($\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.5$).

Afin de visualiser les résultats, nous avons présenté le risque dû au transport dans des figures, chaque figure représentant un des tableaux obtenus :

La première figure représente le risque dû au transport (RT) obtenu lors de la sélection individuelle (SI) et la sélection globale avec équité (SG) pour ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$);

La deuxième figure représente le risque dû au transport (RT) obtenu lors de la sélection individuelle (SI) et la sélection globale avec équité (SG) pour ($\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1$);

La troisième figure représente le risque dû au transport (RT) obtenu lors de la sélection individuelle (SI) et la sélection globale avec équité (SG) pour ($\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 0.5$);

Dans deux autres figures additionnelles, nous avons représenté la variation du coût et du risque en fonction des poids attribués aux fonctions objectifs λ_1 et λ_2 .

La quatrième figure représente la variation du coût (CT) en fonction de λ_1 (poids de la fonction

objectif du risque).

La cinquième figure représente la variation du risque en fonction de λ_1 .

Donc pour chaque problèmes nous avons présenté trois tableaux plus cinq figures.

Dans ce qui suit nous allons analyser en détail trois problèmes : ces problèmes sont représentatifs des autres, le problème 1 est le plus petit, le problème 9 est le plus grand, le problème 10 est un cas particulier du problème 9. Par la suite, nous concluons avec une synthèse globale de tous les problèmes. Les figures des trois problèmes 1, 9 et 10 ainsi que les résultats détaillés des tests sur les autres problèmes se trouvent en annexe.

4.4.1 Problème 1

C'est un problème de 20 noeuds, 228 arcs, 20 centres de population et 20 produits (description dans le tableau 4.1). Il y a des centres de population qui sont à proximité des origines ou des destinations, d'une ou de plusieurs matières dangereuses. Dans les résultats obtenus (tableaux : 4.2, 4.3, 4.4), le risque dû à l'entreposage est le même dans les 3 tableaux. C'est un risque fixe qu'on ne peut pas changer dans notre modélisation et qui relève de la planification de sites. Par contre en examinant les risques dûs au transport obtenus dans les tableaux (4.2, 4.3, 4.4) on remarque qu'ils sont différents.

Dans le tableau 4.2, nous avons fixé ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$) (nous tenons compte uniquement de l'objectif de minimisation du risque). Nous avons effectué deux tests pour ce cas : sélection individuelle et sélection globale avec équité. La valeur de la fonction objectif du risque obtenue lors du premier test est le minimum que nous avons obtenu parmi les 6 tests effectués, car toute la priorité est accordée à la minimisation du risque et on ne s'est pas occupé de la minimisation du coût ni de l'établissement de l'équité sur le réseau. Par conséquent, la valeur de l'objectif du coût est très élevée; c'est la plus grande qu'on a obtenue.

Dans le premier test du tableau 4.2, les risques dus au transport sur chaque centre de population sont très variables, 12 centres de population ne sont exposés à aucun risque ($RT=0$), les autres partagent un risque entre 0.03 et 0.68. Par contre, dans le deuxième test du tableau 4.2, où nous avons tenu compte de l'équité, les risques dus au transport sont très semblables entre les centres de population ; 2 parmi les 20 centres de population ne sont exposés à aucun risque, 10 ont un risque de 0.30 et les 8 autres ont des risques qui varient entre 0.01 et 0.25. C'est une réduction de 56 % par rapport à la première sélection ; ce qui nous donne une distribution du risque plus équitable entre les individus dans ce deuxième test que celle obtenu lors du premier.

Dans le deuxième tableau (4.3) nous avons fixé $\lambda_1 = 0$ et $\lambda_2 = 1$ (nous tenons compte uniquement de l'objectif de minimisation du coût). Lors de la sélection individuelle, où nous ne considérons ni l'équité ni la minimisation du risque, nous avons obtenu les plus courts chemins sur le réseau en terme du coût. Ce qui nous donne la plus petite valeur de la fonction objectif du coût. Par contre, étant donné que le risque n'est pas considéré lors de la résolution, les centres de population sont exposés à un très grand risque ; le centre de population 9 a atteint un risque de 8.04, ce qui fait que la valeur de l'objectif du risque pour ce test est très élevé. Dans le deuxième test du tableau (4.3), qui est la sélection globale avec équité, les résultats sont différents, car ici nous tenons compte de l'équité dans les contraintes, ce qui génère une minimisation du risque total sur le réseau routier ; 18 centres de population ont un risque dû au transport de 0.30, les deux autres ont 0.05 et 0.19, un écart entre le maximum et le minimum de 0.25. C'est une réduction de 97 % par rapport à la première sélection ce qui nous donne une distribution très équitable.

Dans le troisième tableau (4.4), nous avons fixé $\lambda_1 = 0.5$ et $\lambda_2 = 0.5$. Nous avons également effectué les deux tests. Pour le cas de la sélection individuelle, nous avons obtenu de meilleures valeurs pour les deux fonctions objectifs : le coût obtenu est 429 366 alors que la moyenne est 484017, et la valeur du risque total sur le réseau est 241 077, alors que la moyenne est 267 331.

Mais en observant les valeurs obtenues pour le risque dû au transport sur les centres de population il n'y a aucune équité établie : 6 centres de population parmi les 20 récoltent tout le risque du réseau (entre 0.48 et 7.02). Par contre, dans le deuxième test, sélection globale avec équité, nous avons obtenu une augmentation de 27.8 % de la valeur de l'objectif du coût, mais le risque et l'équité sont meilleurs, le maximum du risque dû au transport sur les centres de population est 0.3, le minimum est 0.05 ce qui fait un écart de 0.25, une réduction de 96.4 % par rapport à la première sélection.

Lors des trois tests effectués pour la sélection globale avec équité, nous avons obtenu une réduction importante par rapport à la sélection individuelle du maximum du risque individuel : 56 % lorsque $(\lambda_1 = 1 \text{ et } \lambda_2 = 0)$, 96.2 % lorsque $(\lambda_1 = 0 \text{ et } \lambda_2 = 1)$ et 95.2 % lorsque $(\lambda_1 = 0.5 \text{ et } \lambda_2 = 0.5)$. La même chose pour l'écart : nous avons une réduction de 56 % lorsque $(\lambda_1 = 1 \text{ et } \lambda_2 = 0)$, 97 % lorsque $(\lambda_1 = 0 \text{ et } \lambda_2 = 1)$ et 96.4 % lorsque $(\lambda_1 = 0.5 \text{ et } \lambda_2 = 0.5)$. Par contre, nous avons eu des pénalités concernant le coût, une augmentation de 35.5 % lorsque $(\lambda_1 = 0 \text{ et } \lambda_2 = 1)$ et 27.8 % lorsque $(\lambda_1 = 0.5 \text{ et } \lambda_2 = 0.5)$. L'objectif lors de la génération des problèmes était de voir la réduction maximum qu'on peut avoir sur les risques individuels, ainsi que la distribution la plus équitable que nous pouvons obtenir sur le réseau. Maintenant, si les utilisateurs du modèle jugent qu'ils obtiennent une réduction du risque trop importante au détriment du coût, ils peuvent élargir les bornes sur les risques afin d'analyser les différentes solutions, puis choisir celles qui leur conviennent tout en respectant les conditions de risque et d'équité.

En annexe nous présentons les figures (A.1, A.2, A.3, A.4, A.5) qui nous permettent d'avoir un résumé. Sur chaque figure (A.1, A.2, A.3), pour chaque centre de population, nous avons présenté les deux valeurs obtenues du risque dû au transport (RT) lors des deux sélections (SI : sélection individuelle et SG : sélection globale avec équité). Ceci nous permet de visualiser l'écart

entre les deux valeurs et de conclure que la sélection globale avec équité nous donne une distribution plus uniforme entre les centres de population en ce qui concerne le risque dû au transport. Les deux figures du coût et du risque (A.4, A.5) montrent que le coût total (CT) augmente avec l'augmentation du poids λ_1 , car moins on donne d'importance à l'objectif du coût, plus la valeur obtenue est élevée vu qu'on accorde dans ce cas plus d'importance à l'objectif du risque qui, à son tour, diminue avec l'accroissement de λ_1 .

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(1,0)$			$(1,0)$		
CPU	4			4		
Coût total du réseau	631297			618000		
Risque total du réseau	202002			212000		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0	0	0
P2	3.17	3.17	0	3.47	3.17	0.30
P3	0.06	0	0.06	0.30	0	0.30
P4	4.74	4.25	0.49	4.49	4.25	0.24
P5	0	0	0	0.03	0	0.03
P6	2.82	2.82	0	2.83	2.82	0.01
P7	0.58	0	0.58	0.30	0	0.30
P8	4.02	4.02	0	4.32	4.02	0.30
P9	0	0	0	0.30	0	0.30
P10	7.24	7.17	0.07	7.22	7.17	0.05
P11	0	0	0	0.15	0	0.15
P12	4.10	3.69	0.41	3.99	3.69	0.30
P13	0	0	0	0.30	0	0.30
P14	2.07	2.07	0	2.17	2.07	0.10
P15	0.68	0	0.68	0.30	0	0.30
P16	5.33	5.05	0.28	5.35	5.05	0.30
P17	0	0	0	0.25	0	0.25
P18	7.07	7.07	0	7.07	7.07	0
P19	0	0	0	0.11	0	0.11
P20	0.82	0.79	0.03	1.09	0.79	0.3
minimum			0			0
maximum			0.68			0.3

TAB. 4.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 1

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(0,1)$			$(0,1)$		
CPU	4			4		
Coût total du réseau	404297			548000		
Risque total du réseau	332660			224000		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	5.93	0	5.93	0.30	0	0.30
P2	6.2	3.17	3.03	3.47	3.17	0.30
P3	2.81	0	2.81	0.30	0	0.30
P4	4.25	4.25	0	4.55	4.25	0.30
P5	0.70	0	0.70	0.30	0	0.30
P6	2.82	2.82	0	2.87	2.82	0.05
P7	2.51	0	2.51	0.30	0	0.30
P8	4.21	4.02	0.19	4.32	4.02	0.30
P9	8.04	0	8.04	0.30	0	0.30
P10	7.4	7.17	0.23	7.47	7.17	0.30
P11	0.06	0	0.06	0.30	0	0.30
P12	3.69	3.69	0	3.99	3.69	0.30
P13	3.31	0	3.31	0.30	0	0.30
P14	2.07	2.07	0	2.37	2.07	0.30
P15	0.04	0	0.04	0.30	0	0.30
P16	5.05	5.05	0	5.35	5.05	0.30
P17	0	0	0	0.30	0	0.30
P18	7.51	7.07	0.44	7.26	7.07	0.19
P19	0.99	0	0.99	0.30	0	0.30
P20	1.52	0.79	0.73	1.09	0.79	0.30
minimum			0			0.05
maximum			8.04			0.3

TAB. 4.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 1

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(0.5, 0.5)$			$(0.5, 0.5)$		
CPU	4			4		
Coût total du réseau	429366			549000		
Risque total du réseau	241077			223000		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.30	0	0.30
P2	3.17	3.17	0	3.47	3.17	0.30
P3	1.52	0	1.52	0.30	0	0.30
P4	4.25	4.25	0	4.55	4.25	0.30
P5	0	0	0	0.30	0	0.30
P6	2.82	2.82	0	2.87	2.82	0.05
P7	2.77	0	2.77	0.30	0	0.30
P8	4.50	4.02	0.48	4.32	4.02	0.30
P9	7.02	0	7.02	0.30	0	0.30
P10	7.17	7.17	0	7.47	7.17	0.30
P11	0	0	0	0.16	0	0.16
P12	3.69	3.69	0	3.99	3.69	0.30
P13	0.68	0	0.68	0.3	0	0.30
P14	2.07	2.07	0	2.37	2.07	0.30
P15	0	0	0	0.29	0	0.29
P16	5.05	5.05	0	5.35	5.05	0.30
P17	0	0	0	0.29	0	0.29
P18	7.07	7.07	0	7.26	7.07	0.19
P19	0	0	0	0.30	0	0.30
P20	1.53	0.79	0.74	1.09	0.79	0.30
minimum			0			0.05
maximum			7.02			0.3

TAB. 4.4 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 1

4.4.2 Problème 9

C'est un problème de 30 noeuds, 687 arcs, 30 centres de population et 20 produits (description dans le tableau 4.1). Il y a 10 centres de population qui sont à proximité d'origines ou de destinations, d'une ou de plusieurs matières dangereuses. Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux (4.5, 4.6, 4.7). Les résultats du risque dû à l'entreposage (RE) sont les mêmes dans les trois tableaux. C'est un risque fixe qu'on ne peut pas changer dans notre modélisation. Lors de la sélection individuelle du premier tableau 4.5, il y a 19 centres de population qui ne sont exposés à aucun risque dû au transport. Par contre, 11 centres de population récoltent tout le risque qui varie entre 0.00232 et 0.0779. Dans la sélection globale avec équité, il y a 9 centres de population qui ne sont pas exposés à un risque dû au transport. Les autres partagent un risque qui varie entre 0.000804 et 0.02, ce qui est beaucoup moins que ceux de la sélection précédente. Nous avons obtenu une réduction de 74.3 % du maximum du risque par rapport à la première sélection.

Dans le deuxième tableau 4.6, où nous avons fixé $\lambda_2 = 1$ dans le cas de la sélection individuelle, l'objectif du coût a atteint son minimum (tableau 4.6) mais au détriment du risque qui a trop augmenté, et le risque dû au transport est passé à 1.31. Par contre, dans le deuxième test où on contrôle l'équité par les contraintes et où le risque dû au transport est fixé à 0.02 sur tous les centres de population, nous avons obtenu une réduction de 98.4 % du maximum de RT par rapport à la première sélection.

Dans le troisième tableau 4.7 ($\lambda_1 = 0.5$ et $\lambda_2 = 0.5$), la situation s'est améliorée par rapport à la sélection individuelle, où le maximum du risque dû au transport est 0.254, mais il y a 15 centres de population parmi les 30 qui récoltent tout le risque. Par contre, lors de la sélection globale avec équité, le maximum est fixé à 0.02. C'est beaucoup moins que celui de la sélection individuelle et avec une réduction de 92.1 %. De plus, la valeur objectif du risque est 57934.1 par rapport à 58957.2 qui est obtenue lors de la sélection individuelle, soit une réduction de 1.7

%. Nous pouvons dire encore une fois que ce cas de sélection globale avec équité pour ($\lambda_1 = 0.5$ et $\lambda_2 = 0.5$) est encore meilleur en terme d'équité. Nous allons revenir sur ce problème pour le comparer avec le prochain (problème 10).

Les figures qui nous permettent d'avoir un résumé du problème sont en annexe (B.1, B.2, B.3, B.4, B.5).

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$			$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$		
CPU	20			21		
Coût total du réseau	43100			44425.5		
Risque total du réseau	55996.3			56556.5		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0	0	0
P2	1.55	1.55	0	1.56	1.55	0.00334
P3	0	0	0	0.0142	0	0.0142
P4	1.09	1.09	0	1.11	1.09	0.02
P5	0	0	0	0.00915	0	0.00915
P6	1.25	1.25	0	1.25	1.25	0
P7	0	0	0	0.02	0	0.02
P8	0.696	0.696	0	0.696	0.696	0
P9	0.0126	0	0.0126	0.02	0	0.02
P10	1.38	1.37	0.00864	1.38	1.37	0.00864
P11	0.00782	0	0.00782	0.00226	0	0.00226
P12	0.0779	0	0.0779	0.02	0	0.02
P13	0	0	0	0.02	0	0.02
P14	0	0	0	0.00646	0	0.00646
P15	0.0153	0	0.0153	0.0043	0	0.0043
P16	0.0036	0	0.0036	0.000804	0	0.000804
P17	0.00232	0	0.00232	0.0158	0	0.0158
P18	0	0	0	0.000897	0	0.000897
P19	0.0027	0	0.0027	0.0122	0	0.0122
P20	0.783	0.752	0.0304	0.772	0.752	0.02
P21	0	0	0	0	0	0
P22	0.993	0.993	0	0.993	0.993	0
P23	0	0	0	0.02	0	0.02
P24	0.913	0.91	0.00299	0.92	0.91	0.00937
P25	0	0	0	0	0	0
P26	0	0	0	0	0	0
P27	0	0	0	0	0	0
P28	1.21	1.2	0.0073	1.2	1.2	0.006
P29	0	0	0	0	0	0
P30	0.919	0.919	0	0.93	0.919	0.0112
minimum			0			0
maximum			0.0779			0.02

TAB. 4.5 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 9

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$			$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$		
CPU	20			23		
Coût total du réseau	21831			32587.9		
Risque total du réseau	109565			58865.4		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.489	0	0.489	0.02	0	0.02
P2	1.7	1.55	0.142	1.57	1.55	0.02
P3	0.344	0	0.344	0.02	0	0.02
P4	1.09	1.09	0	1.11	1.09	0.02
P5	1.2	0	1.2	0.02	0	0.02
P6	1.25	1.25	0	1.27	1.25	0.02
P7	0	0	0	0.02	0	0.02
P8	0.716	0.696	0.0198	0.716	0.696	0.02
P9	0	0	0	0.02	0	0.02
P10	1.37	1.37	0	1.39	1.37	0.02
P11	0.817	0	0.817	0.02	0	0.02
P12	0	0	0	0.02	0	0.02
P13	0.11	0	0.11	0.02	0	0.02
P14	0.324	0	0.324	0.02	0	0.02
P15	0.21	0	0.21	0.02	0	0.02
P16	0.256	0	0.256	0.02	0	0.02
P17	0.776	0	0.776	0.02	0	0.02
P18	0.0261	0	0.0261	0.02	0	0.02
P19	0	0	0	0.02	0	0.02
P20	0.799	0.752	0.0467	0.772	0.752	0.02
P21	0.0223	0	0.0223	0.02	0	0.02
P22	1.13	0.993	0.14	1.01	0.993	0.02
P23	0	0	0	0.02	0	0.02
P24	0.91	0.91	0	0.93	0.91	0.02
P25	1.31	0	1.31	0.02	0	0.02
P26	0.074	0	0.074	0.02	0	0.02
P27	0.295	0	0.295	0.02	0	0.02
P28	1.2	1.2	0	1.22	1.2	0.02
P29	0.549	0	0.549	0.02	0	0.02
P30	1.23	0.919	0.316	0.939	0.919	0.02
minimum			0			0.02
maximum			1.31			0.02

TAB. 4.6 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 9

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$			$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$		
CPU	20			23		
Coût total du réseau	29382			33165.6		
Risque total du réseau	58957.2			57934.1		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0	0	0
P2	1.57	1.55	0.0121	1.56	1.55	0.00469
P3	0.0856	0	0.0856	0.02	0	0.02
P4	1.09	1.09	0	1.11	1.09	0.02
P5	0.0294	0	0.0294	0.02	0	0.02
P6	1.25	1.25	0	1.27	1.25	0.017
P7	0	0	0	0.02	0	0.02
P8	0.696	0.696	0	0.716	0.696	0.02
P9	0	0	0	0.0157	0	0.0157
P10	1.37	1.37	0	1.39	1.37	0.02
P11	0.0719	0	0.0719	0.02	0	0.02
P12	0.254	0	0.254	0.02	0	0.02
P13	0.0316	0	0.0316	0.02	0	0.02
P14	0.103	0	0.103	0.02	0	0.02
P15	0.0293	0	0.0293	0.02	0	0.02
P16	0.00502	0	0.00502	0.02	0	0.02
P17	0.0174	0	0.0174	0.02	0	0.02
P18	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	0	0.0112	0	0.0112
P20	0.81	0.752	0.0574	0.772	0.752	0.02
P21	0.022	0	0.022	0.00854	0	0.00854
P22	1.03	0.993	0.0412	1.01	0.993	0.02
P23	0	0	0	0.02	0	0.02
P24	0.915	0.91	0.00473	0.919	0.91	0.00917
P25	0	0	0	0	0	0
P26	0	0	0	0	0	0
P27	0	0	0	0.0117	0	0.0117
P28	1.21	1.2	0.00788	1.22	1.2	0.02
P29	0	0	0	0.02	0	0.02
P30	0.919	0.919	0	0.939	0.919	0.02
minimum			0			0
maximum			0.254			0.02

TAB. 4.7 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 9

4.4.3 Problème 10

Ce problème est le même que le problème précédent (problème 9); c'est le même réseau routier, sauf que dans ce cas nous avons des capacités sur les arcs $K_{(i,j)}^m$ qui sont plus petites que celles du problème 9. Nous l'avons résolu et dans ce qui suit nous allons comparer les résultats obtenus avec ceux du problème 9. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants (4.8, 4.9, 4.10). Les risques dus à l'entreposage sont les mêmes obtenus dans les deux problèmes.

Quant aux risques dus au transport il y a eu un changement. Dans le premier tableau (4.8) avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$, lors de la sélection individuelle, le nombre de centres de population exposés au risque a augmenté à 18 au lieu de 11 (dans prob. 9), et le risque maximum est passé de 0.0779 (prob.9) à 0.511 (prob. 10), ce qui augmente les valeurs des objectifs du coût et du risque. Ceci est dû au fait que les capacités sont plus serrées dans ce problème que celles du problème 9, ce qui oblige les transporteurs à augmenter la charge sur certains itinéraires. Dans la sélection globale avec équité, le risque maximum est passé de 0.02 (prob.9) à 0.06 (prob.10), mais il reste toujours plus petit que celui de la sélection individuelle, une réduction de 88.2 %.

Dans le deuxième tableau (4.9) avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$, il y a un seul centre de population épargné du risque dû au transport lors de la sélection individuelle comparativement à 10 qui l'étaient dans le problème 9, le maximum du risque est plus petit mais la valeur de la fonction objectif est beaucoup plus grande : 29376.8 (prob.10) comparé à 21831 (prob.9) pour le coût et 112056 (prob.10) comparativement à 109565 (prob.9) pour le risque. Quant à la sélection globale avec équité, il y a un risque commun pour tous les centres de population qui est 0.06, plus élevé que 0.02 (du prob.9), mais il est plus petit de 94.6 % par rapport à celui obtenu lors de la sélection individuelle.

Dans le troisième tableau (4.10) avec $(\lambda_1 = 0.5$ et $\lambda_2 = 0.5)$, nous avons les mêmes remarques que précédemment : le risque dû au transport a augmenté et les valeurs des deux objectifs aussi. Lors de la résolution du problème 10, les capacités restreintes nous obligent à attribuer des valeurs

plus larges à Y_p^m et Z_p afin que le domaine soit réalisable. les valeurs obtenues pour les fonctions objectifs et les risques dus au transport sont plus grandes que celles du problème 9. Il apparaît néanmoins que la sélection globale avec équité donne toujours la meilleure distribution équitable, en terme de risque, entre les individus à travers le réseau.

Les figures qui nous permettent d'avoir un résumé du problème sont en annexe (C.1, C.2, C.3, C.4, C.5).

Lors de cette analyse détaillée des trois problèmes 1, 9, 10, nous avons pu constater que la sélection globale avec équité a toujours donné une distribution plus équitable du risque que la sélection individuelle. En plus, elle nous permet une diminution importante du maximum du risque individuel, une diminution qui se situe entre 56 % et 98.4 % par rapport à la sélection individuelle. Nous avons mentionné précédemment que lors de la génération des problèmes, nous avons pris les plus petites valeurs de Y_p^m et Z_p pour lesquelles le problème restait réalisable. Il est clair que dans des applications réelles, les utilisateurs du modèle pourront attribuer différentes valeurs à Y_p^m et Z_p et analyser les solutions obtenues, afin de pouvoir choisir celles qui leur conviennent le mieux.

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$			$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$		
CPU	20			23		
Coût total du réseau	56293.4			56781.9		
Risque total du réseau	58681.3			63079.2		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.0435	0	0.0435
P2	1.55	1.55	0	1.58	1.55	0.0287
P3	0.0155	0	0.0155	0.06	0	0.06
P4	1.18	1.09	0.0862	1.15	1.09	0.06
P5	0.023	0	0.023	0.06	0	0.06
P6	1.25	1.25	0	1.27	1.25	0.0144
P7	0.14	0	0.14	0.06	0	0.06
P8	0.696	0.696	0	0.756	0.696	0.06
P9	0.052	0	0.052	0.06	0	0.06
P10	1.37	1.37	0	1.43	1.37	0.06
P11	0.00392	0	0.00392	0.06	0	0.06
P12	0.511	0	0.511	0.06	0	0.06
P13	0.33	0	0.33	0.06	0	0.06
P14	0.0252	0	0.0252	0.0569	0	0.0569
P15	0.0902	0	0.0902	0.06	0	0.06
P16	0.00474	0	0.00474	0.027	0	0.027
P17	0.00599	0	0.00599	0.06	0	0.06
P18	0	0	0	0.06	0	0.06
P19	0.0109	0	0.0109	0.0357	0	0.0357
P20	0.766	0.752	0.0138	0.812	0.752	0.06
P21	0.019	0	0.019	0.06	0	0.06
P22	0.993	0.993	0	1.01	0.993	0.0126
P23	0.297	0	0.297	0.06	0	0.06
P24	0.935	0.91	0.0245	0.945	0.91	0.0353
P25	0	0	0	0.03	0	0.03
P26	0	0	0	0.0362	0	0.0362
P27	0	0	0	0.06	0	0.06
P28	1.2	1.2	0.00183	1.26	1.2	0.06
P29	0	0	0	0.06	0	0.06
P30	0.919	0.919	0	0.93	0.919	0.0112
minimum			0			0.0112
maximum			0.511			0.06

TAB. 4.8 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 10

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$			$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$		
CPU	20			25		
Coût total du réseau	29376.8			44952.7		
Risque total du réseau	112056			65444		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.397	0	0.397	0.06	0	0.06
P2	1.68	1.55	0.127	1.61	1.55	0.06
P3	0.37	0	0.37	0.06	0	0.06
P4	1.11	1.09	0.0227	1.15	1.09	0.06
P5	0.738	0	0.738	0.06	0	0.06
P6	1.35	1.25	0.0947	1.31	1.25	0.06
P7	0.0389	0	0.0389	0.06	0	0.06
P8	0.699	0.696	0.00304	0.756	0.696	0.06
P9	0	0	0	0.06	0	0.06
P10	1.53	1.37	0.161	1.43	1.37	0.06
P11	0.554	0	0.554	0.06	0	0.06
P12	0.24	0	0.24	0.06	0	0.06
P13	0.418	0	0.418	0.06	0	0.06
P14	0.242	0	0.242	0.06	0	0.06
P15	0.365	0	0.365	0.06	0	0.06
P16	0.576	0	0.576	0.06	0	0.06
P17	0.562	0	0.562	0.06	0	0.06
P18	0.0756	0	0.0756	0.06	0	0.06
P19	0.361	0	0.361	0.06	0	0.06
P20	0.81	0.752	0.0574	0.812	0.752	0.06
P21	0.0896	0	0.0896	0.06	0	0.06
P22	1.18	0.993	0.19	1.05	0.993	0.06
P23	0.0633	0	0.0633	0.06	0	0.06
P24	0.929	0.91	0.019	0.97	0.91	0.06
P25	0.984	0	0.984	0.06	0	0.06
P26	0.184	0	0.184	0.06	0	0.06
P27	0.272	0	0.272	0.06	0	0.06
P28	1.32	1.2	0.124	1.26	1.2	0.06
P29	1.12	0	1.12	0.06	0	0.06
P30	1.21	0.919	0.287	0.979	0.919	0.06
minimum			0.019			0.06
maximum			1.12			0.06

TAB. 4.9 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 10

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$			$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$		
CPU	20			24		
Coût total du réseau	39647.4			45510.1		
Risque total du réseau	61838.3			64682.5		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.06	0	0.06
P2	1.57	1.55	0.017	1.58	1.55	0.0298
P3	0.112	0	0.112	0.06	0	0.06
P4	1.17	1.09	0.0812	1.15	1.09	0.06
P5	0.105	0	0.105	0.06	0	0.06
P6	1.25	1.25	0.00243	1.3	1.25	0.0525
P7	0.208	0	0.208	0.06	0	0.06
P8	0.696	0.696	0	0.756	0.696	0.06
P9	0	0	0	0.06	0	0.06
P10	1.42	1.37	0.0569	1.43	1.37	0.06
P11	0.0459	0	0.0459	0.06	0	0.06
P12	0.68	0	0.68	0.06	0	0.06
P13	0.0916	0	0.0916	0.06	0	0.06
P14	0.0504	0	0.0504	0.06	0	0.06
P15	0.316	0	0.316	0.06	0	0.06
P16	0.0313	0	0.0313	0.06	0	0.06
P17	0.0669	0	0.0669	0.06	0	0.06
P18	0	0	0	0.06	0	0.06
P19	0.00932	0	0.00932	0.06	0	0.06
P20	0.782	0.752	0.0299	0.812	0.752	0.06
P21	0.0386	0	0.0386	0.06	0	0.06
P22	0.993	0.993	0	1.05	0.993	0.0536
P23	0.181	0	0.181	0.06	0	0.06
P24	0.944	0.91	0.034	0.943	0.91	0.0332
P25	0.0187	0	0.0187	0.06	0	0.06
P26	0	0	0	0.0517	0	0.0517
P27	0.0383	0	0.0383	0.038	0	0.038
P28	1.2	1.2	0.00225	1.26	1.2	0.06
P29	0.00161	0	0.00161	0.06	0	0.06
P30	0.919	0.919	0	0.958	0.919	0.0395
minimum			0			0.0298
maximum			0.68			0.06

TAB. 4.10 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 10

4.4.4 Résumé des résultats

Afin de pouvoir tirer des conclusions générales sur la performance du modèle, nous avons résumé les résultats dans trois tableaux :

- Le tableau 4.11 est le résumé des 11 problèmes pour les tests effectués avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$.
- Le tableau 4.12 est le résumé des 11 problèmes pour les tests effectués avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$.
- Le tableau 4.13 est le résumé des 11 problèmes pour les tests effectués avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$.

Dans chaque tableau, et pour chaque problème, nous présentons les éléments suivants :

1. En ce qui concerne le risque individuel dû au transport nous présentons :
 - (a) i. La différence entre l'écart obtenu lors des deux sélections.
Tel que l'écart est la différence entre le maximum et le minimum du risque individuel dû au transport obtenu lors de la résolution du problème.
 - ii. Le pourcentage de réduction de l'écart lors de la sélection globale avec équité, par rapport à celui obtenu lors de la sélection individuelle.
 - (b) i. La différence entre le maximum du risque dû au transport obtenu lors des deux sélections.
 - ii. Le pourcentage de réduction du maximum lors de la sélection globale avec équité par rapport à celui obtenu lors de la sélection individuelle.
2. (a) La différence entre la valeur de la fonction objectif du coût obtenue lors des deux sélections.
- (b) Le pourcentage de réduction (ou d'augmentation) du coût lors de la sélection globale avec équité par rapport à celui obtenu lors de la sélection individuelle.
3. (a) La différence entre la valeur de la fonction objectif du risque obtenue lors des deux sélections.

- (b) Le pourcentage de réduction (ou d'augmentation) du risque lors de la sélection globale avec équité par rapport à celui obtenu lors de la sélection individuelle.
4. (a) La différence entre le temps de calcul lors de la résolution du problème avec les deux sélections.
- (b) Le pourcentage de réduction (ou d'augmentation) du temps de calcul lors de la sélection globale avec équité par rapport à celui obtenu lors de la sélection individuelle.

Problème	risque individuel dû au transport		Coût total du réseau		Risque total du réseau		CPU	
	écartI - écartG (%) ^a	maxI - maxG (%) ^a	coûtI - coûtG (%) ^a	risqueI - risqueG (%) ^a	risqueI - risqueG (%) ^a	CPUI - CPUG (%) ^a	CPUI - CPUG (%) ^a	
1	0.38	56.0	13297	2.1	-9998	-4.9	0	
2	4.93	88.0	1254	0.2	-36386	-19.4	-1	
3	1.07	84.2	280	0.5	-3770	-4.0	-2	
4	1.01	83.5	675	1.2	-7414	-6.3	0	
5	0.42	94.6	1392	2.3	-7104	-14.0	-3	
6	0.37	94.8	-1631	-3.1	-581	-0.8	-2	
7	0.55	96.5	-3350	-3.7	-1036	-0.5	-7	
8	0.25	90.6	1579	3.0	-3519	-5.7	-2	
9	0.06	74.3	-1325	-3.0	-560	-1.0	-1	
10	0.46	90.4	-488	-0.8	-4397	-7.4	-3	
11	2.40	92.8	-2760	-4.4	-3100	-2.4	-8	

^aPourcentage de gain ou de perte

TAB. 4.11 – Résumé des résultats sur tous les problèmes pour $(\lambda_1=1, \lambda_2=0)$

Problème	risque individuel dû au transport		Coût total du réseau		Risque total du réseau		CPU			
	écartI - écartG	(%) ^a	maxI - maxG	(%) ^a	coûtI - coûtG	(%) ^a	risqueI - risqueG	(%) ^a	CPUI - CPUG	(%) ^a
1	7.79	97.0	7.74	96.2	-143703	-35.5	108660	32.6	0	0.0
2	5.43	90.8	5.28	88.3	-178052	-54.0	67920	22.0	-1	-25.0
3	3.74	97.0	3.65	94.8	-13609	-45.0	67461	38.5	-3	-25.0
4	2.01	95.8	1.90	90.4	-10510	-29.2	50124	27.0	-2	-40.0
5	1.53	100.0	1.47	96.0	-25495	-86.6	62235	51.8	-3	-23.1
6	1.74	98.9	1.74	98.8	-10315	-31.0	26899	27.6	-3	-23.0
7	5.33	100.0	5.31	99.6	-25251	-60.3	137064	41.5	-7	-10.0
8	2.65	100.0	2.62	98.8	-15502	-62.8	26680	28.6	-2	-10.0
9	1.31	100.0	1.29	98.4	-10756	-49.3	50699	46.2	-3	-15.0
10	1.10	94.0	1.06	94.6	-15575	-53.0	46612	41.6	-5	-25.0
11	3.96	100.0	3.77	95.2	-20382	-62.4	114616	45.0	-7	-3.7

^aPourcentage de gain ou de perte

TAB. 4.12 – Résumé des résultats sur tous les problèmes pour ($\lambda_1=0, \lambda_2=1$)

Problème	risque individuel dû au transport		Coût total du réseau		Risque total du réseau		CPU			
	écartI - écartG	(%) ^a	maxI - maxG	(%) ^a	coûtI - coûtG	(%) ^a	risqueI - risqueG	(%) ^a	CPUI - CPUG	(%) ^a
1	6.77	96.4	6.72	95.2	-119634	-27.8	18077	7.5	0	0.0
2	4.14	88.2	3.99	85.0	-144237	-39.3	-6309	-2.7	-1	-25.0
3	1.10	84.6	1.10	84.6	-5137	-12.3	-2322	-2.3	-2	-16.6
4	0.79	80.4	0.78	79.6	-4313	-9.5	-5342	-4.4	-1	-16.6
5	0.41	97.1	0.36	85.8	-15495	-39.3	-1828	-3.2	-3	-23.0
6	0.78	97.5	0.78	97.5	-5452	-14.1	848	1.2	-2	-15.0
7	1.65	98.8	1.65	98.8	-9118	-15.6	3042	1.5	-9	-13.8
8	1.62	98.9	1.61	98.2	-8957	-28.6	-1605	-2.4	-2	-10.0
9	0.23	92.1	0.23	92.1	-3783	-12.8	1023	1.7	-3	-15.0
10	0.65	95.5	0.62	91.1	-5862	-14.8	-2844	-4.5	-4	-20.0
11	2.06	91.8	2.05	91.5	-6447	-12.9	-1932	-1.4	-7	-3.8

^aPourcentage de gain ou de perte

TAB. 4.13 – Résumé des résultats sur tous les problèmes pour ($\lambda_1=0.5, \lambda_2=0.5$)

Ces trois tableaux (4.11, 4.12, 4.13) nous permettent de conclure ce qui suit :

- Dans tous les tests effectués, en passant du modèle avec sélection individuelle au modèle avec sélection globale, nous avons un gain en ce qui concerne l'écart et le maximum du risque individuel dû au transport. La sélection globale avec équité nous a permis une réduction importante du maximum du risque auquel est exposé chaque individu lors du transport des matières dangereuses. La réduction du maximum se situe entre 56 % et 96.5 % lors des tests effectués avec $(\lambda_1=1, \lambda_2=0)$, entre 88.3 % et 99.6 % pour $(\lambda_1=0, \lambda_2=1)$ et, entre 79.6 % et 98.8 % pour $(\lambda_1=0.5, \lambda_2=0.5)$. Ainsi, l'écart que nous avons obtenu lors de la sélection globale avec équité est beaucoup plus petit que l'écart avec la sélection individuelle, une réduction entre 56 % et 96.5 % pour les tests effectués avec $(\lambda_1=1, \lambda_2=0)$, entre 90.8 % et 100 % pour $(\lambda_1=0, \lambda_2=1)$ et entre 80.4 % et 98.9 % pour $(\lambda_1=0.5, \lambda_2=0.5)$. Ceci montre que la nouvelle modélisation des effets réseaux dans le transport des matières dangereuses a donné de très bons résultats en terme de distribution équitable du risque entre les individus qui se trouvent à travers le réseau.
- En ce qui concerne la valeur de l'objectif du coût, en général, le coût total obtenu lors de la sélection individuelle est plus petit que celui obtenu lors de la sélection globale avec équité, car les chemins choisis lors de la première sélection sont en général les moins coûteux. Il n'y a que les capacités sur les arcs et les poids attribués aux fonctions objectifs qui les obligent à choisir d'autres itinéraires. Par contre, lors de la deuxième sélection, les contraintes d'équité ont une influence très importante sur le choix des chemins. Lors des tests effectués avec $(\lambda_1=0, \lambda_2=1)$ nous avons une augmentation du coût lors de la sélection globale de 29.2 % et jusqu'à 86.6 % (ceci est un cas extrême car la seule fonction objectif considérée est la minimisation du coût). Par contre, lors des tests effectués avec $(\lambda_1=0.5, \lambda_2=0.5)$, l'augmentation du coût se situe entre 9.5 % et 39.3 %.
- En ce qui concerne la valeur de l'objectif du risque, lors des tests effectués avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$, toutes les valeurs obtenues du risque total du réseau lors de la sélection individuelle sont plus

petites que celles obtenues lors de la sélection globale avec équité (augmentation du risque entre 0.5 % et 19.4 %); car toute l'importance est accordée à la minimisation de l'objectif du risque lors de la première sélection. Aucune considération n'est attribuée au coût ou à l'équité et les chemins choisis sont en général ceux qui passent par de petites concentrations de population afin d'obtenir le minimum de risque sur le réseau. Par contre, dans la deuxième sélection, les contraintes d'équité ont forcé le choix d'autres itinéraires pour réduire le risque sur la population, et lorsque ce choix conduit à choisir des itinéraires qui passent par de grandes concentrations d'individus, ceci augmente la valeur de la fonction objectif.

Lors des tests effectués avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$, nous avons un gain entre 22 % et 51.8 % en ce qui concerne le risque total du réseau avec la sélection globale. Dans ce cas, contrairement au premier, toute l'importance est accordée à la minimisation du coût, ce qui fait que la sélection individuelle donne de plus grandes valeurs de l'objectif du risque. Dans le cas où nous considérons les deux objectifs $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$, l'augmentation du risque n'a pas dépassé 4.5 %.

- Le temps de calcul lors de la résolution du problème avec la sélection individuelle est plus petit ou égal à celui de la sélection globale avec équité, car nous avons moins de contraintes lors de la première résolution. En moyenne, nous avons une augmentation du temps de calcul de 16 % lors de la sélection globale.

Nous concluons donc que la sélection globale avec équité donne de meilleurs résultats, en terme de risque, que la sélection individuelle. Cette nouvelle modélisation du problème tient compte de l'importance du risque auquel est exposé chaque individu sur le réseau, ce qui a donné une diminution importante quant au maximum du risque individuel dû au transport, ainsi qu'à l'écart du même risque entre les individus, sans que l'augmentation du risque total sur le réseau ne dépasse 4.5 % pour $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$, ce qui est un cas représentatif. Afin d'expliquer l'augmentation du coût, rappelons de nouveau que lorsque nous avons généré les problèmes nous

avons pris les plus petites valeurs de Y_p^m et Z_f pour lesquelles le problème reste réalisable. Maintenant, si les utilisateurs du modèle jugent que l'augmentation du coût lors de la sélection globale est trop grande par rapport aux critères de décision, ils peuvent relâcher les bornes sur les risques individuels, sans oublier toutefois que si celles-ci deviennent trop grandes, on se rapprochera du cas de la sélection individuelle. Notre modèle offre donc la possibilité à ses utilisateurs de définir leurs besoins tant au niveau des poids à attribuer aux termes de l'objectif qu'à celui des risques auxquels on se permettra d'exposer la population.

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons introduit une nouvelle modélisation de la sélection globale des routes pour le transport des matières dangereuses. C'est une modélisation du problème de la planification globale des routes, pour lequel nous avons considéré plusieurs origines et plusieurs destinations ainsi que plusieurs matières dangereuses. En plus des trois critères qui sont le coût, le risque et l'équité, nous avons tenu compte de l'accumulation des différents risques et de leur distribution spatiale dans le réseau. La difficulté de cette modélisation est due au caractère conflictuel des trois critères, à la modélisation de l'équité, ainsi qu'à la représentation de la population distribuée à travers le réseau. Pour cela, nous avons regroupé les individus qui se trouvent dans la même région et qui sont exposés au même risque dû au mouvement d'une cargaison transportant une matière dangereuse, puis nous les avons représentés par des centres de population. Nous avons choisi de satisfaire l'équité par l'imposition de contraintes permettant de borner les risques individuels de chaque individu.

Afin de prouver l'efficacité du modèle, nous avons généré 11 problèmes de multiproduits avec capacités, que nous avons testés en utilisant le logiciel d'optimisation linéaire CPLEX. L'analyse des résultats obtenus nous a permis de conclure que notre modélisation d'équité a donné de très bons résultats en terme de distribution équitable du risque entre les individus qui se trouvent à travers le réseau. De plus, nous avons obtenu une diminution importante comparativement à une sélection individuelle du risque individuel auquel est exposé chaque individu sur le réseau.

Nous avons quatre paramètres dans notre modèle qui procurent une grande flexibilité lors de la

résolution, qui sont les poids attribués aux fonctions objectifs du coût et du risque, le paramètre du risque maximum qu'il ne faut pas dépasser sur chaque individu dû à une seule matière dangereuse, ainsi que le paramètre du risque maximum à ne pas dépasser dû à l'ensemble des matières dangereuses. Ces paramètres permettront aux responsables de la planification stratégique du transport routier, après qu'ils auront défini leurs besoins et priorités, de déterminer les poids à attribuer aux fonctions objectifs, ainsi que les risques auxquels ils peuvent exposer les gens. Nous leur offrons ainsi la possibilité d'effectuer des simulations sur le réseau afin de choisir les solutions qui leur conviennent le mieux.

Nous proposons comme éventuels travaux, la méthode de relaxation lagrangienne afin de traiter des problèmes de très grande taille, ainsi qu'une modélisation du problème de design, qui aide les décideurs à choisir la construction du réseau pour le transport des matières dangereuses.

Bibliographie

- [1] Abkowitz, M., et Cheng, P.(1988), *Developing a risk/cost framework for routing truck movements of hazardous materials*, Accident Analysis Prevention Record,20(1),39-51.
- [2] Abkowitz, M., Lepofsky, M., et Cheng, P. (1992), *Selecting Criteria for Designating Hazardous Materials Highway Routes*, Transportation Research Record, 1333, 30-35.
- [3] Ahuja, R.K., Magnanti, T.L. , et Orlin, J.B.(1993), *Network Flows : Theory, Algorithms and Applications*. Prentice Hall.
- [4] Alp, E. (1994), *Risk-based Transportation Planning Practice : Overall Methodology and A Case Example*, INFOR.,33(1),4-19.
- [5] Batta, R., et Chiu, Samuel S. (1988), *Optimal Obnoxious Paths on a Network :Transportation of Hazardous Materials*, Operations Research, 36(1), 84-92.
- [6] Batta, R. , karwan, Mark H. , Gopalan, R., et Kolluri, Krishna S. (1990), *Modeling equity Of Risk In The Transportation Of Hazardous Materials*, Operations Research, 38(6), 961-973.
- [7] Batta, R., Lindner-Dutton, L., et Karwan, Mark H. (1991), *Equitable Sequencing of a given set of Hazardous materials shipments*, Transportation Science, 25(2), 124-137.
- [8] Benayoun, R.,Montgolfier, J., Tergny, j. et Laritchev, O. (1971), *Linear programming with multiple objectives fuctions : step method : (STEM)*, Mathematical Programming, 1, 366-375.

- [9] Bradley, P., Hax, Arnolde C. et Magnanti, Thomas L. (1977), *Applied Mathematical Programming*, Addison-Wesley Pub. Co.
- [10] Dinia, Mohammed K. (1999), *Étude sur le problème des effets croissés dans le transport des matières dangereuses*, mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise administration des affaires, Université du Québec à Montréal.
- [11] Drezner, Z. et Wesolowsky, G.O. (1989), *Location of an Obnoxious Route*, Journal of Operational Research Society, 40(11), 1011-1018.
- [12] Erkut, E., et Verter, V. (1994), *Hazardous Materials Logistics : A Review*, Working Paper 94-3, Eco-Research Chair in Environmental Risk Management, University of Alberta.
- [13] Erkut, E., et Verter, V. (1994a), *Hazardous Materials Logistics : An annotated bibliography*, Working Paper 94-1, Eco-Research Chair in Environmental Risk Management, University of Alberta.
- [14] Erkut, E., et Verter, V. (1995a), *Hazardous Materials Logistics*, Ch. 20 in Facility Location : A Survey of Applications and Methods, Z.Drezner, Springer-Verlag, N.Y.
- [15] Erkut, E., et Verter, V.(1995b), *A Framework for Hazardous Materials Transport Risk Assessment*, Working Paper 95-5, Eco-Research Chair in Environmental Risk Management, University of Alberta.
- [16] Erkut,E. et Verter, V. (1995c), *Modeling Of Transport Risk For Hazardous Materials*, Working Paper 95-1, Eco-Research Chair in Environmental Risk Management, University of Alberta.
- [17] Ferland, Jacques A., (1997), *Notes de Cours : Optimisation III*, Université de Montréal.
- [18] Gendreau, M., et Duclos, Louis-Philippe (1989), *Un système d'aide à la décision pour la planification stratégique des interventions d'entretien et de réhabilitation des chaussées*, Publication du CRT # 621.

- [19] Geoffrion, A.M., Dyer, J.S. et Feinberg, A., (1972), *An interactive approach for multi-criterion optimization, with an application to the operation of an academic departement*, Management Science, 19(4), 357-368.
- [20] Ghali, Olfa N.(1990), *Construction d'un modèle pour le transport des marchandises dangereuses par camion*, Publication du CRT # 726, Université de Montréal.
- [21] ILOG CPLEX 6.5 (1999), *Reference Manuel* .
- [22] McCord, M.R. et Leu, A.Y. (1995), *Sensitivity of Optimal Hazmat Routes to Limited Preference Specification*, INFOR, 33(2), 68-83.
- [23] Miaou, S.P. et Chin,S.M (1991), *Computing K-shortest path for nuclear spent fuel highway transportation*, European Journal of Operational Research 53, 64-80.
- [24] Morell, D. (1984), *Sizing and Politics of Equity*, Hazardous Waste, 1, 555-571.
- [25] Othmani, Imed (1998), *Optimisation Multicritère : fondements et concepts*, Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- [26] Revelle,c., Cohon, J., et Shobry, D.(1991), *Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes*, Transportation Science, 25(2),138-145.
- [27] Robbins, J.C. (1981), *Routing Hazardous Materials Shipments*, Ph.D. dissertation, Indiana University, Bloomington, Indiana.
- [28] Saccomanno,F.F., et chan, A.(1985), *Economic Evaluation of Routing Strategic of Hazardous Road Shipments*, Transportation Research Record, 1020, 12-18.
- [29] Sivakumar,R.A., Batta,R., et Karwan, M.H. (1995), *A Multiple Route Conditional Risk Model for Transportation Hazardous Materials*, INFOR, 33(1), 20-33.
- [30] Steuer, R.E. (1989), *Multiple criteria optimization : theory, computation and application*, Robert E.Krieger publishing company, Malbar, Florida.

- [31] Wright, J. (1993), *Transport Canada Dangerous Goods Accident Costing Study and Model*, in *Transport Dangerous Goods : Assessing the Risks*, 601-616, F. Saccomanno and K. Casidy (eds.), Institut Research, Univ. of Waterloo.
- [32] Yu, Jason C., et Judd, Charles A. (1985), *Cost-Effectiveness Analysis Of Transportation Strategies For Nuclear Waste Repository Sites*, *Transportation Research Record*, 1020, 23-28.
- [33] Zografos, K.G. et Davis, C.F. (1989), *Multi-Objective Programming Approach For Routing Hazardous Materials*, *Journal of Transportation Engineering*, 115(6), 661-673.
- [34] Zionts, S. et Wallenius, J. (1983), *An interactive multiple objective linear programming method for class of underlying non-linear utility functions*, *Management Science*, 29(5), 519-529.

Annexe A

Graphes du problème 1

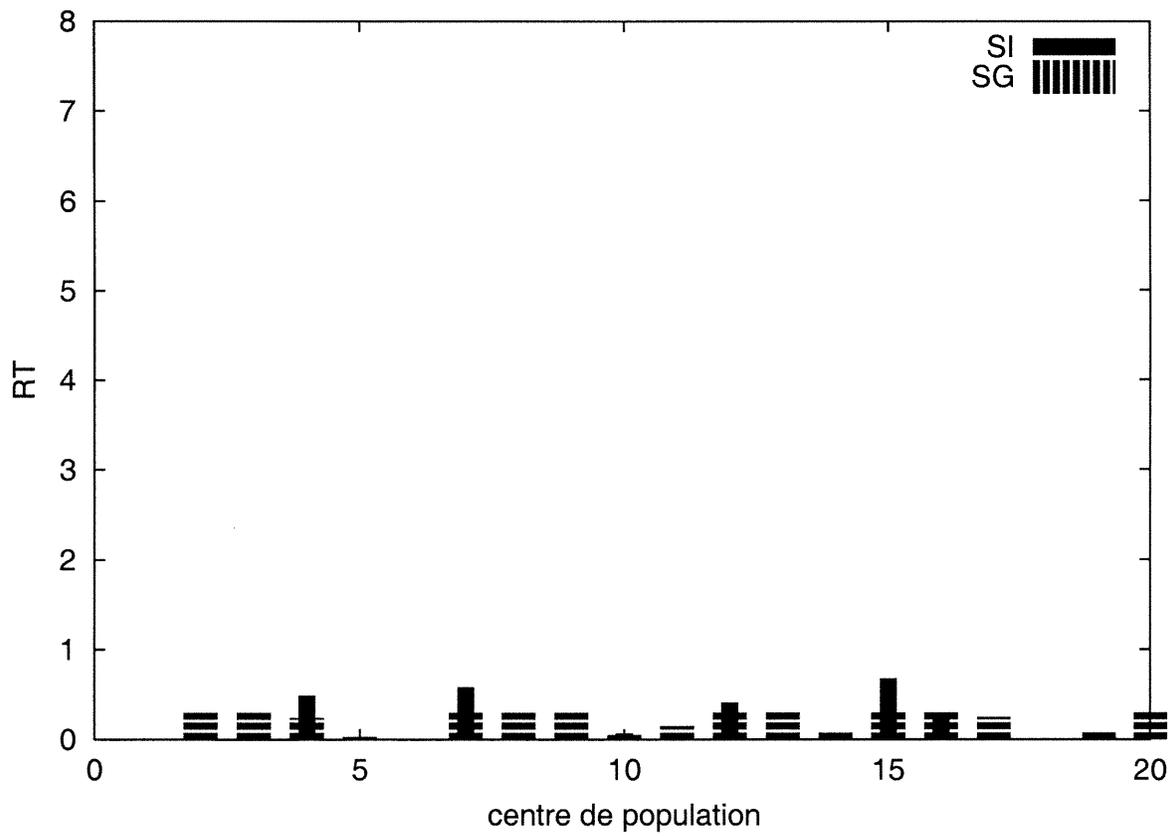


FIG. A.1 - Distribution du risque dû au transport du problème 1 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2=0$)

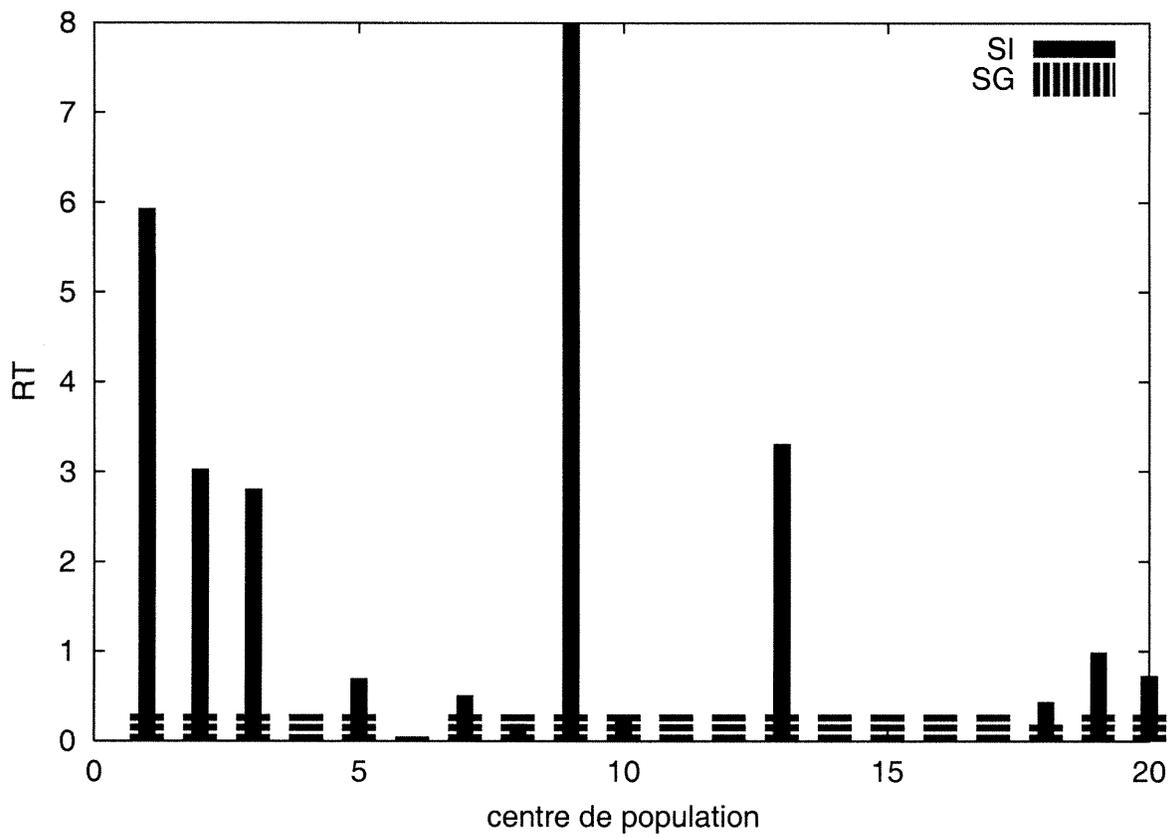


FIG. A.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 1 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2=1$)

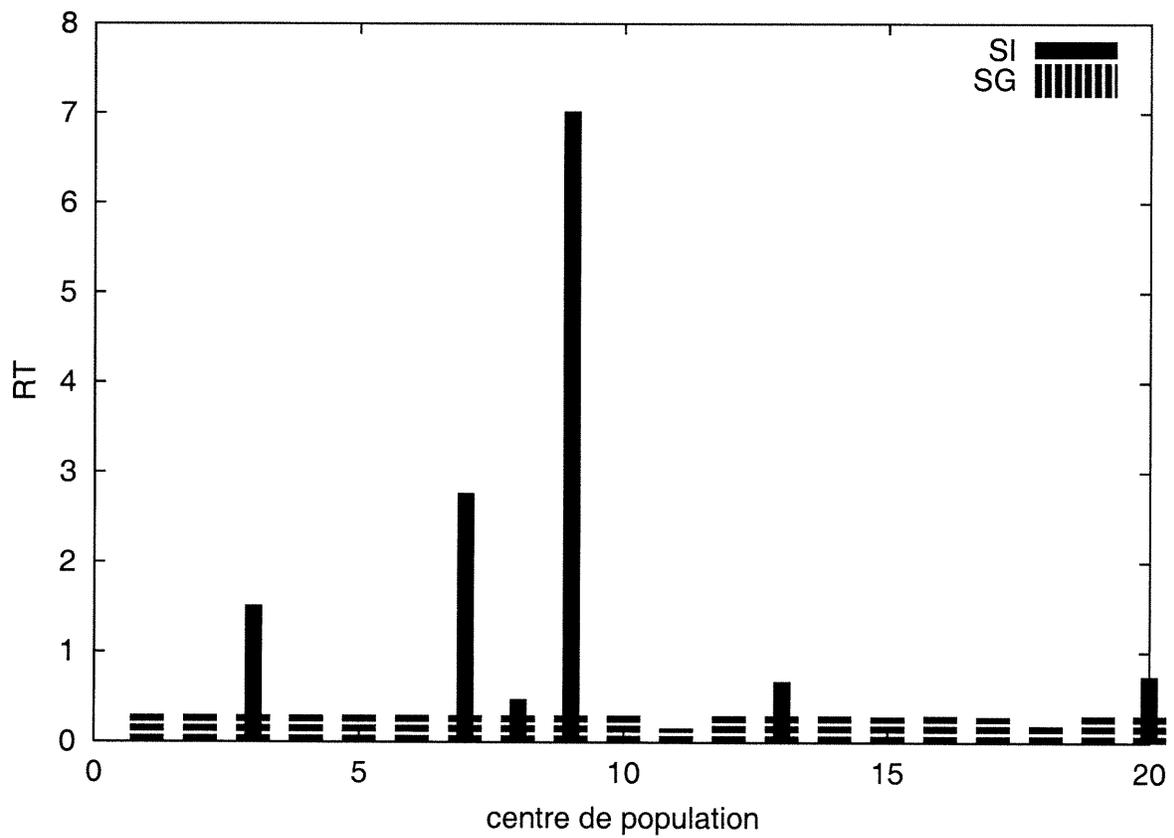


FIG. A.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 1 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

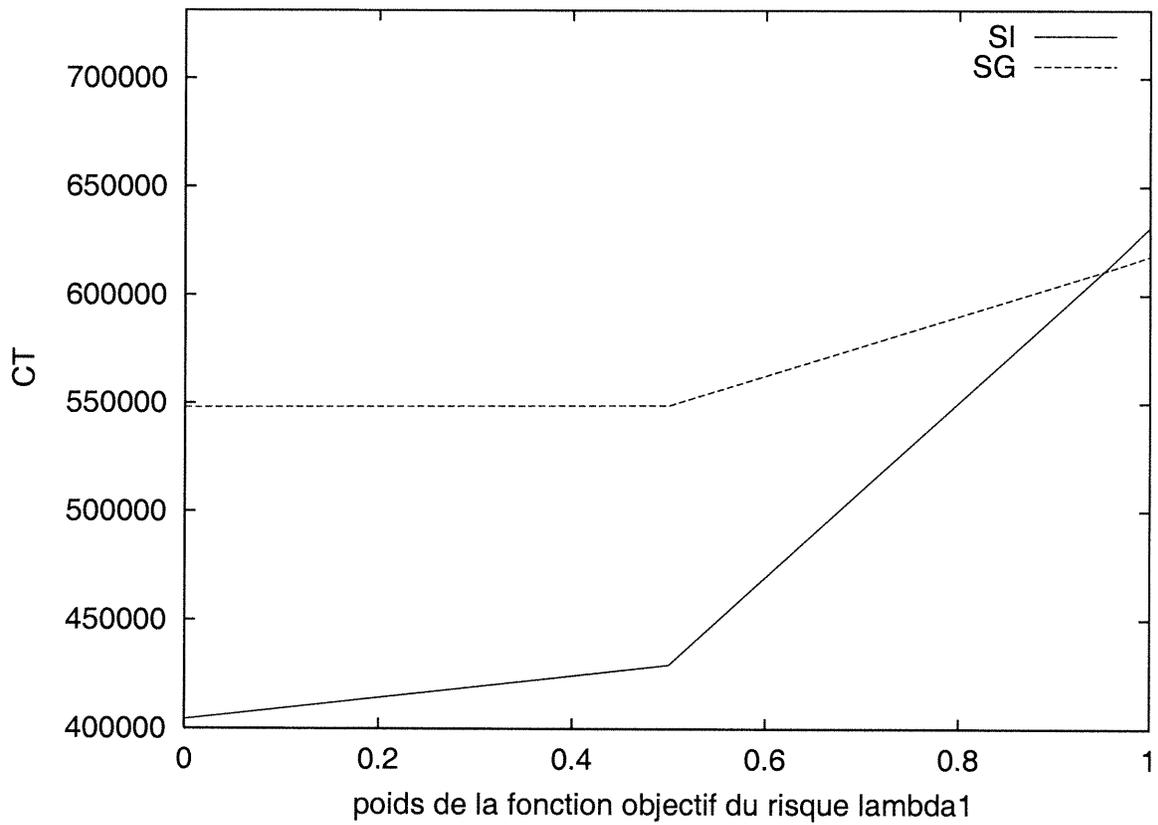


FIG. A.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 1

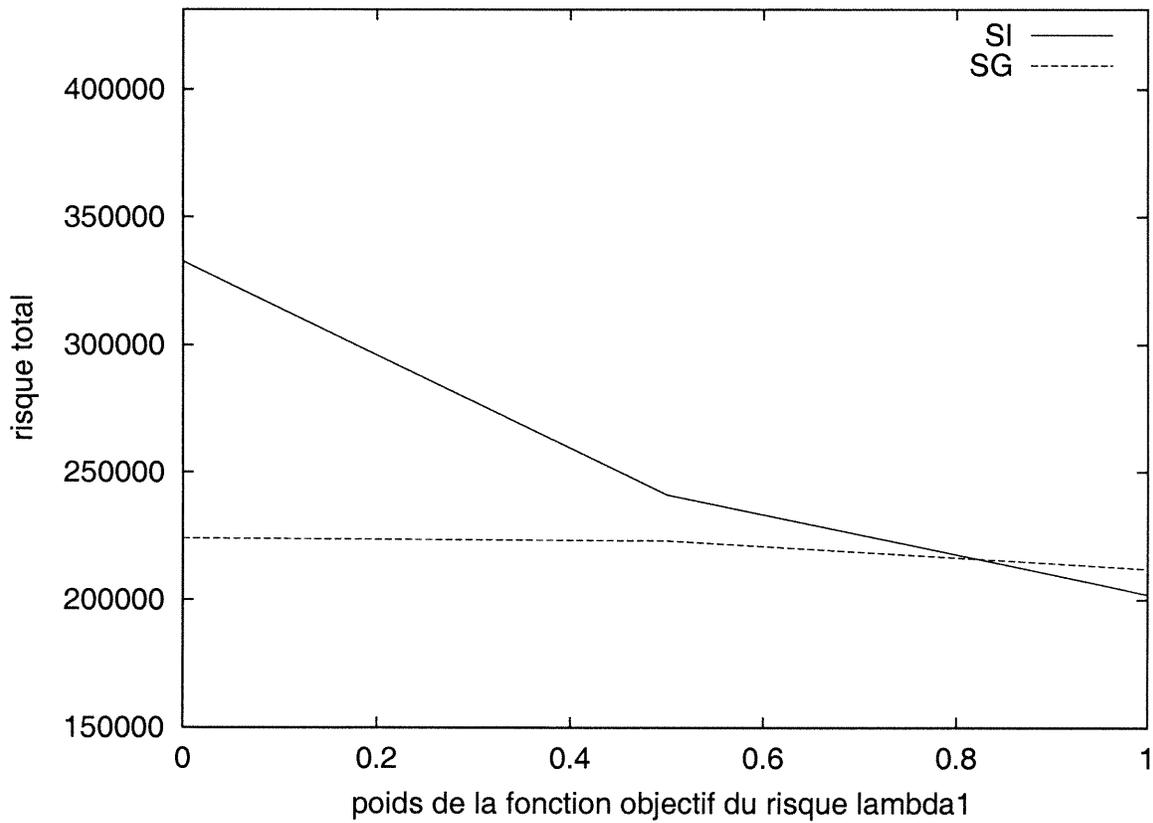


FIG. A.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 1

Annexe B

Graphes du problème 9

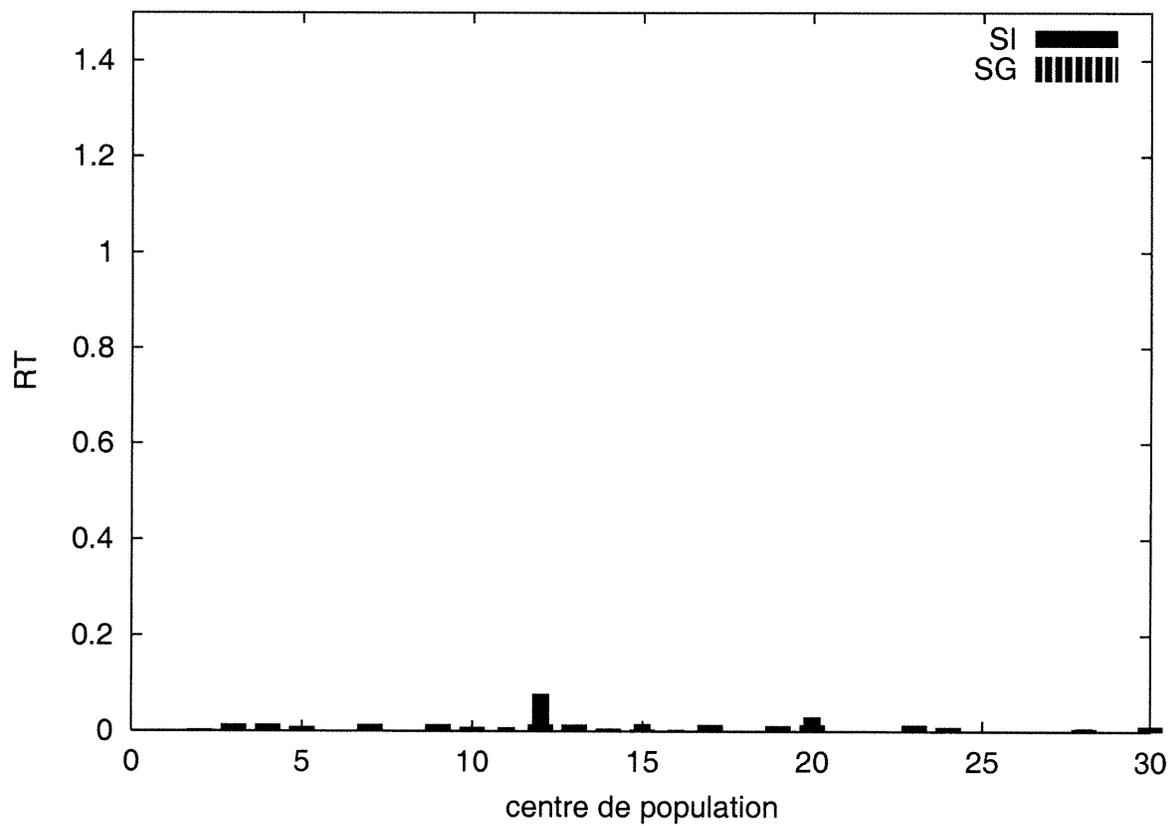


FIG. B.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 9 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)

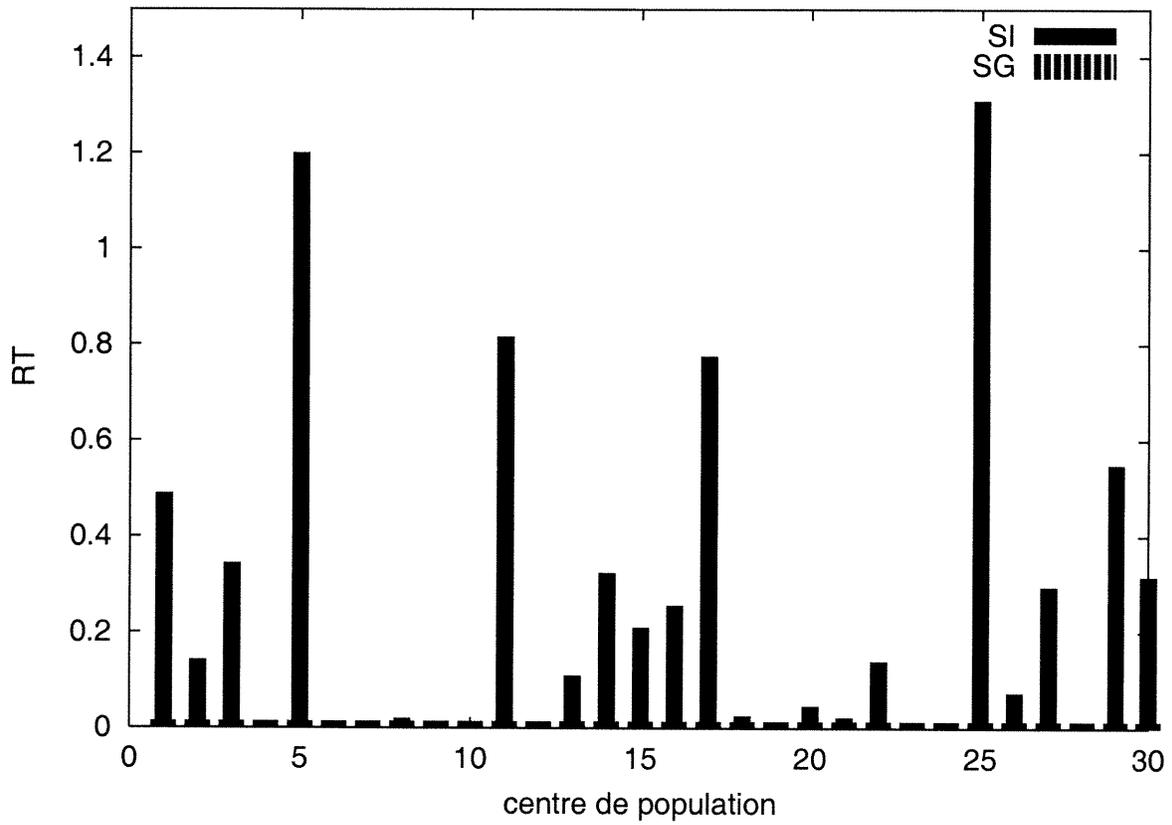


FIG. B.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 9 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)

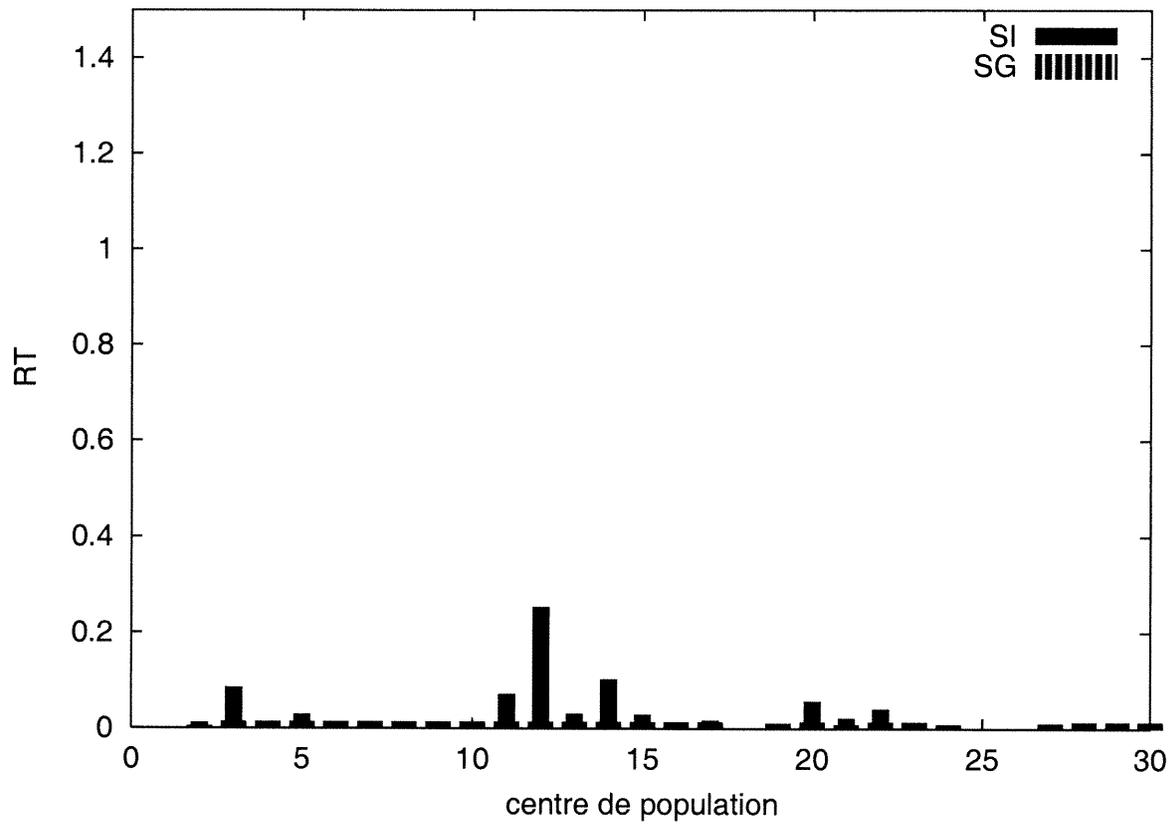


FIG. B.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 9 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

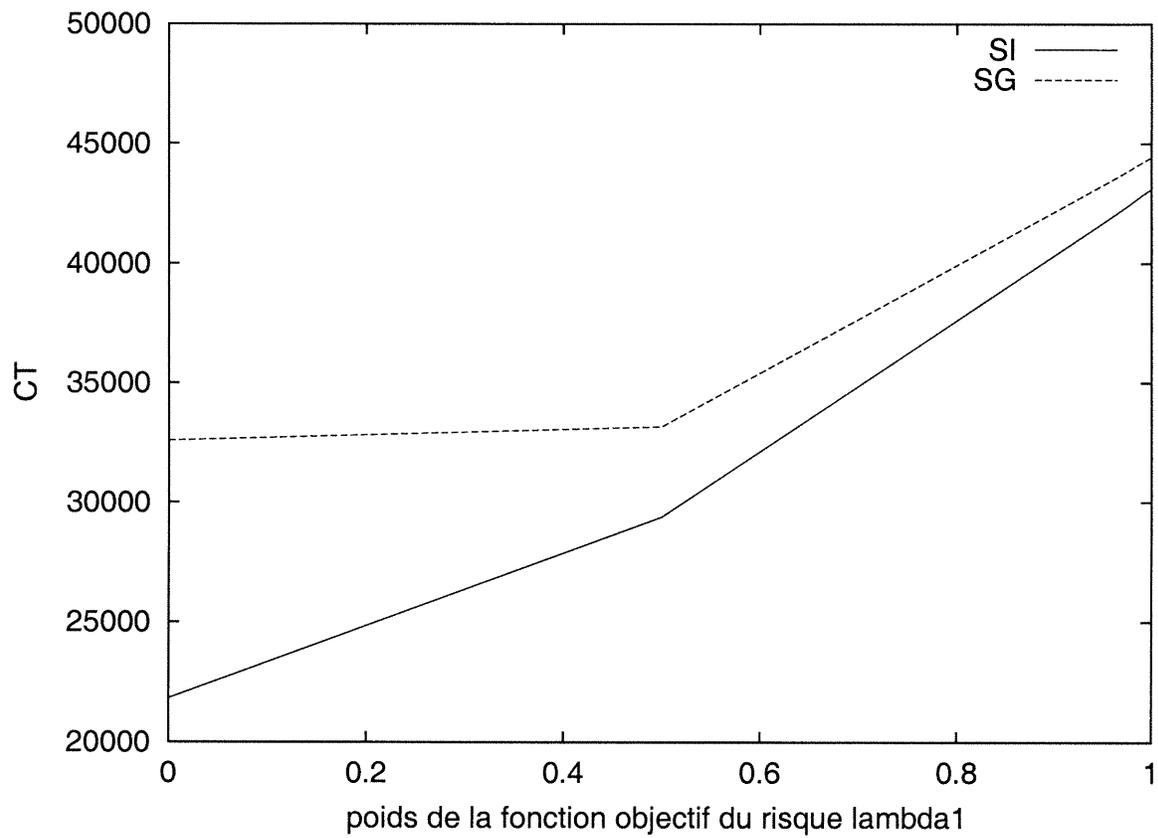


FIG. B.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 9

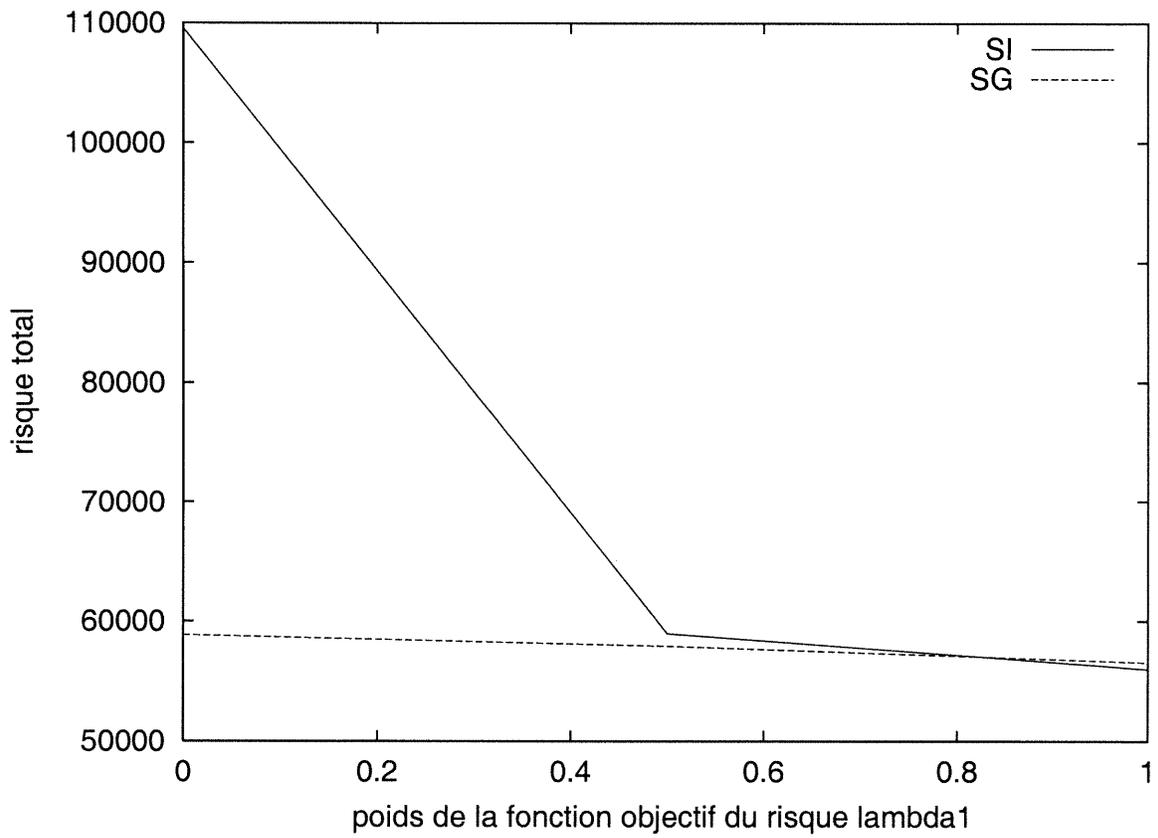


FIG. B.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 9

Annexe C

Graphes du problème 10

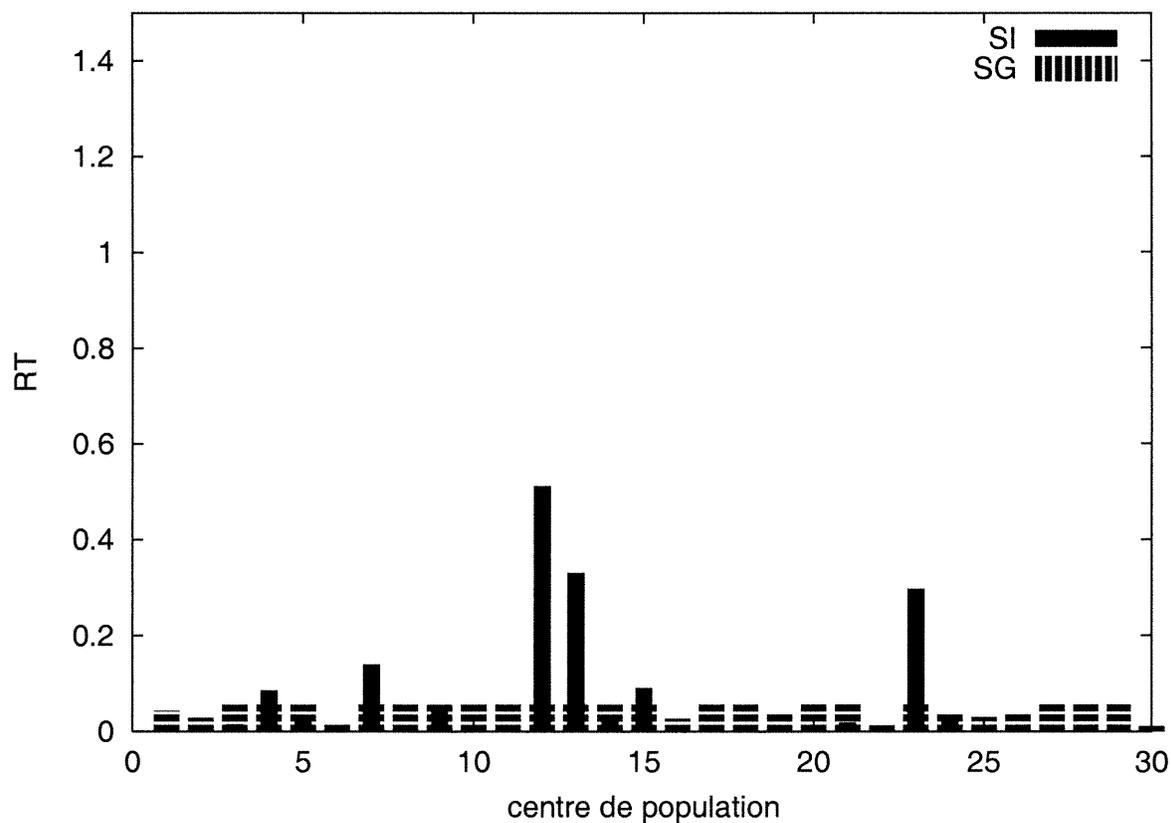


FIG. C.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 10 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)

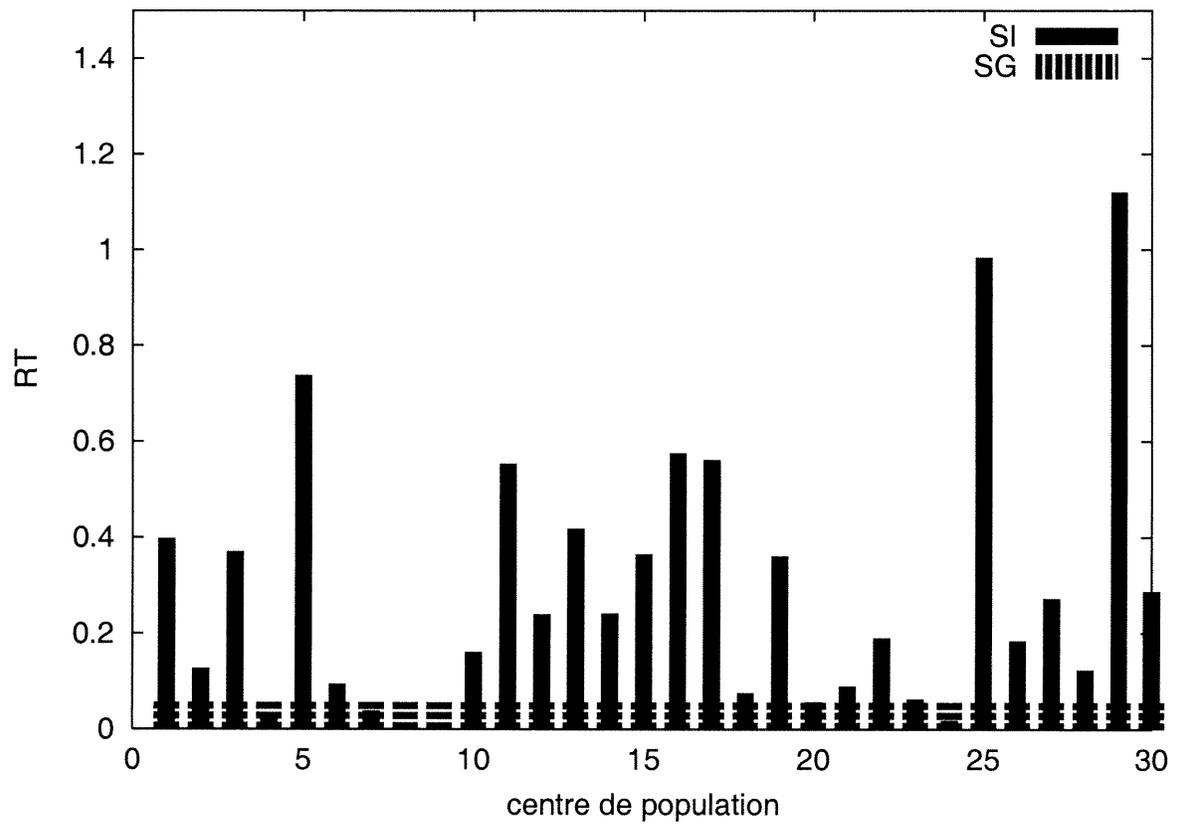


FIG. C.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 10 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2=1$)

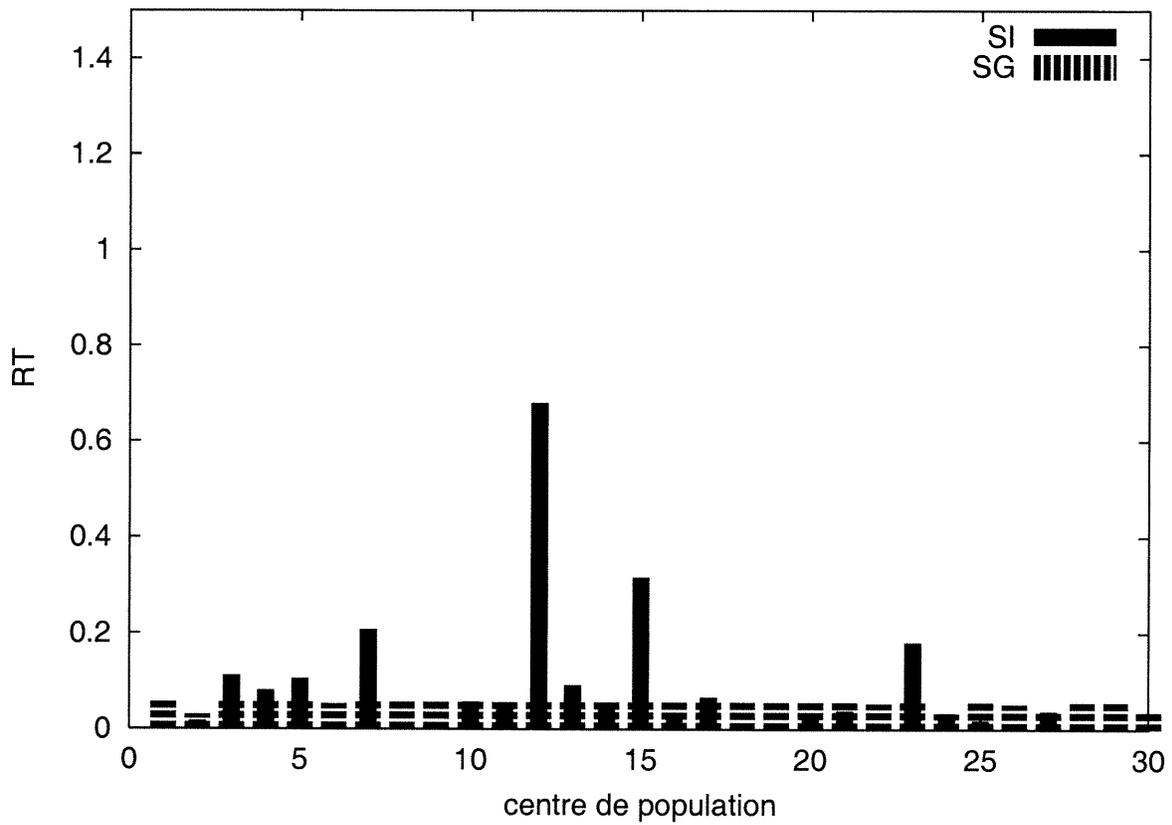


FIG. C.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 10 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

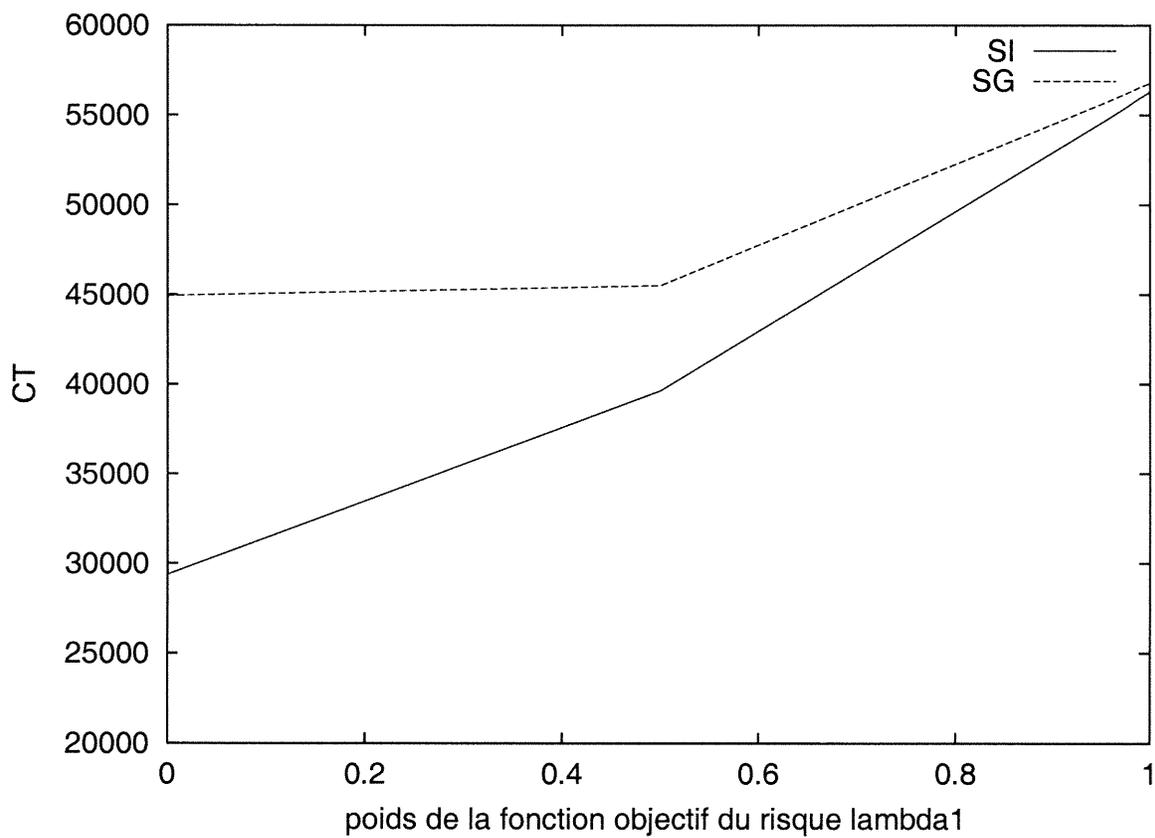


FIG. C.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 10

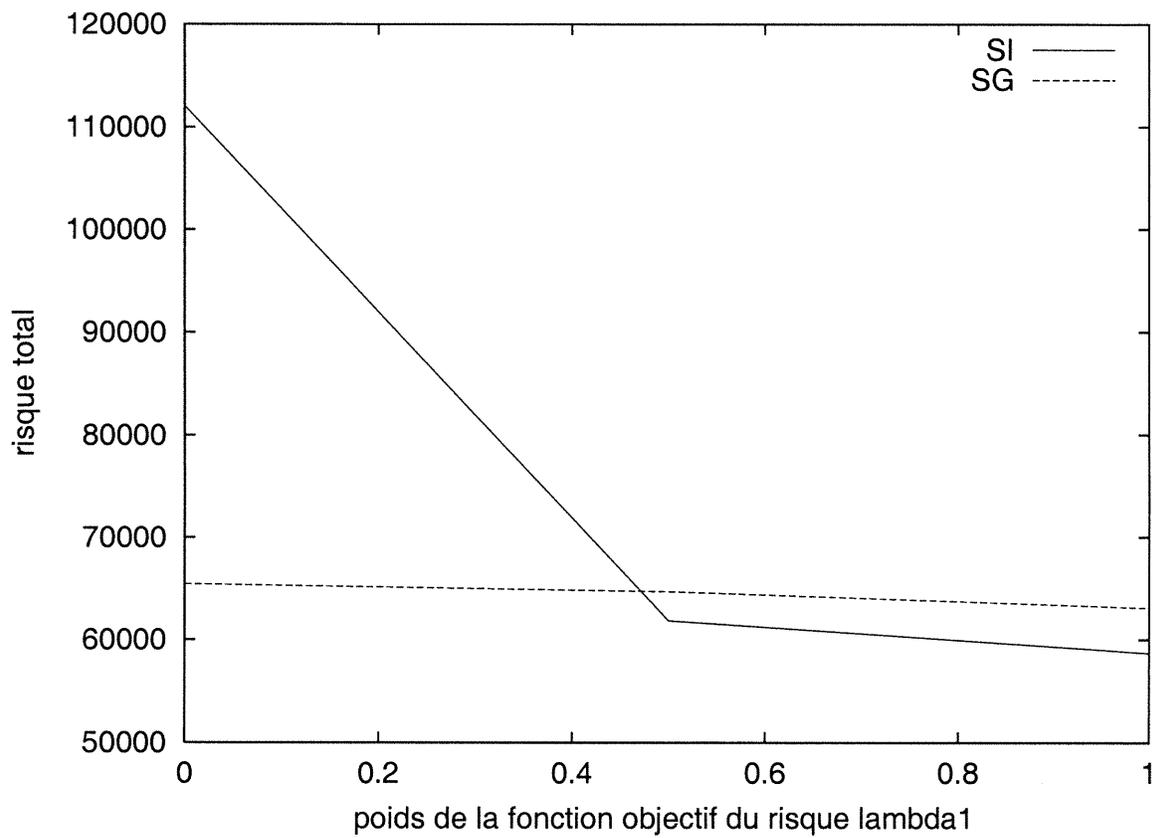


FIG. C.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 10

Annexe D

Résultats du problème 2

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(1,0)$			$(1,0)$		
CPU	4			5		
Coût total du réseau	563737			562483		
Risque total du réseau	186872			223258		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.7	0	0.7
P2	1.18	1.18	0	1.88	1.18	0.7
P3	0.08	0	0.08	0.7	0	0.7
P4	5.55	4.81	0.74	5.51	4.81	0.7
P5	0.42	0.42	0	1.12	0.42	0.7
P6	6.39	6.38	0.01	6.58	6.38	0.2
P7	1.31	0.55	0.76	0.7	0.55	0.15
P8	4.73	4.47	0.26	5.17	4.47	0.7
P9	0.19	0	0.19	0.7	0	0.7
P10	3.9	3.82	0.08	4.52	3.82	0.7
P11	0.08	0	0.08	0.26	0	0.26
P12	7.57	1.96	5.6	2.66	1.96	0.7
P13	0.61	0.12	0.49	0.7	0.12	0.58
P14	1.33	1.24	0.09	1.46	1.24	0.22
P15	1.42	0	1.42	0.7	0	0.7
P16	1.72	1.72	0	1.75	1.72	0.03
P17	0.01	0	0.01	0.7	0	0.7
P18	4.44	4.37	0.07	5.07	4.37	0.7
P19	0	0	0	0.61	0	0.61
P20	1.19	0.45	0.74	1.16	0.45	0.7
minimum			0			0.03
maximum			5.6			0.7

TAB. D.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 2

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(0,1)$			$(0,1)$		
CPU	4			5		
Cout total du réseau	329202			507254		
Risque total du réseau	308655			240735		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	1.19	0	1.19	0.7	0	0.7
P2	1.18	1.18	0	1.88	1.18	0.7
P3	0.31	0	0.31	0.7	0	0.7
P4	5.19	4.81	0.38	5.51	4.81	0.7
P5	6.4	0.42	5.98	1.12	0.42	0.7
P6	7.43	6.38	1.05	7.08	6.38	0.7
P7	0.55	0.55	0	0.7	0.55	0.15
P8	6.26	4.47	1.8	5.17	4.47	0.7
P9	0	0	0	0.7	0	0.7
P10	4.98	3.82	1.16	4.52	3.82	0.7
P11	0	0	0	0.7	0	0.7
P12	4.96	1.96	3	2.66	1.96	0.7
P13	0.12	0.12	0	0.7	0.12	0.58
P14	1.24	1.24	0	1.94	1.24	0.7
P15	1.48	0	1.48	0.7	0	0.7
P16	2.13	1.72	0.41	2.35	1.72	0.63
P17	3	0	3	0.7	0	0.7
P18	5.97	4.37	1.59	5.07	4.37	0.7
P19	0.36	0	0.36	0.7	0	0.7
P20	5.39	0.46	4.93	1.16	0.46	0.7
minimum			0			0.15
maximum			5.98			0.7

TAB. D.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 2

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(0.5, 0.5)$			$(0.5, 0.5)$		
CPU	4			5		
Coût total du réseau	366295			510532		
Risque total du réseau	227826			234135		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.06	0	0.06	0.7	0	0.7
P2	1.39	1.18	0.21	1.88	1.18	0.7
P3	0	0	0	0.7	0	0.7
P4	5.19	4.81	0.38	5.51	4.81	0.7
P5	1.91	0.42	1.49	1.12	0.42	0.7
P6	6.55	6.38	0.17	7.05	6.38	0.67
P7	0.55	0.55	0	0.7	0.55	0.15
P8	5.12	4.47	0.65	5.17	4.47	0.7
P9	0	0	0	0.7	0	0.7
P10	3.89	3.82	0.07	4.52	3.82	0.7
P11	0	0	0	0.3	0	0.3
P12	6.66	1.96	4.69	2.66	1.96	0.7
P13	0.88	0.12	0.76	0.7	0.12	0.58
P14	1.29	1.24	0.05	1.92	1.24	0.68
P15	1.4	0	1.4	0.7	0	0.7
P16	1.72	1.72	0	1.92	1.72	0.2
P17	1.92	0	1.92	0.7	0	0.7
P18	5.51	4.37	1.14	5.07	4.37	0.7
P19	0.36	0	0.36	0.7	0	0.7
P20	3.1	0.46	2.64	1.16	0.46	0.7
minimum			0			0.15
maximum			4.69			0.7

TAB. D.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 2

Annexe E

Graphes du problème 2

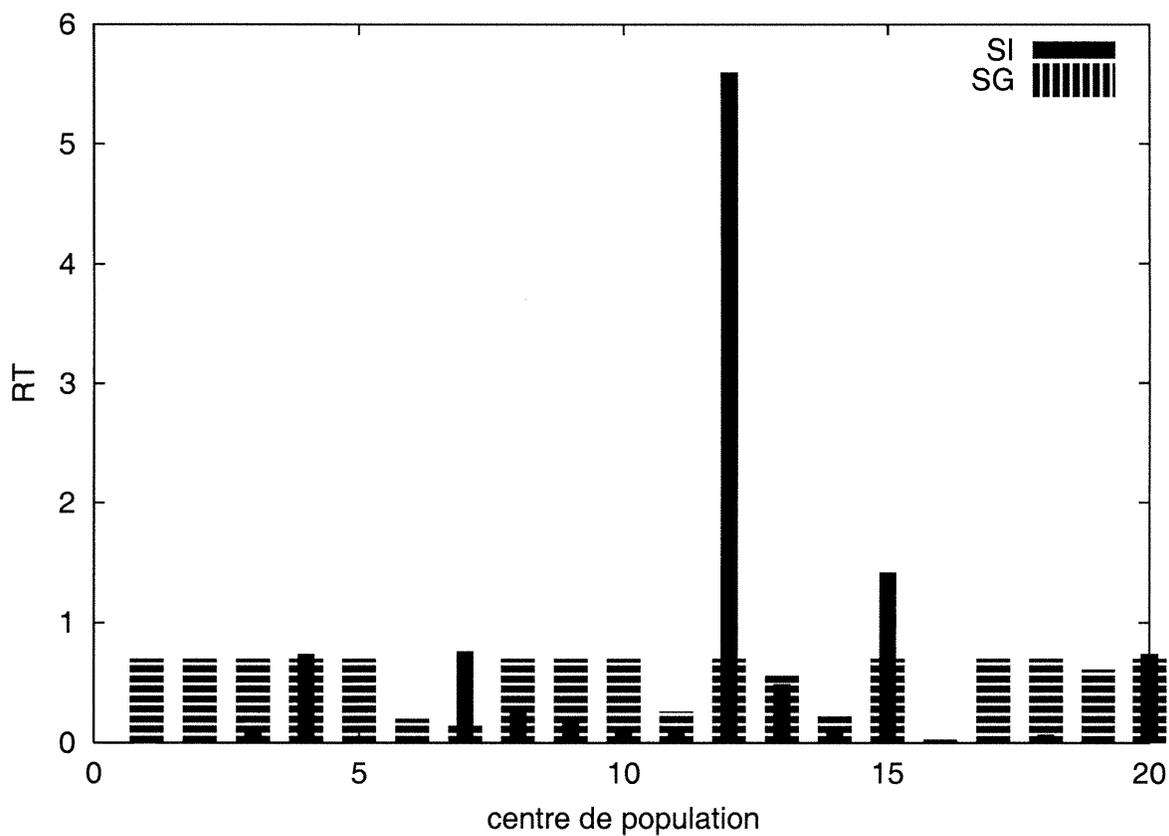


FIG. E.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 2 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2=0$)

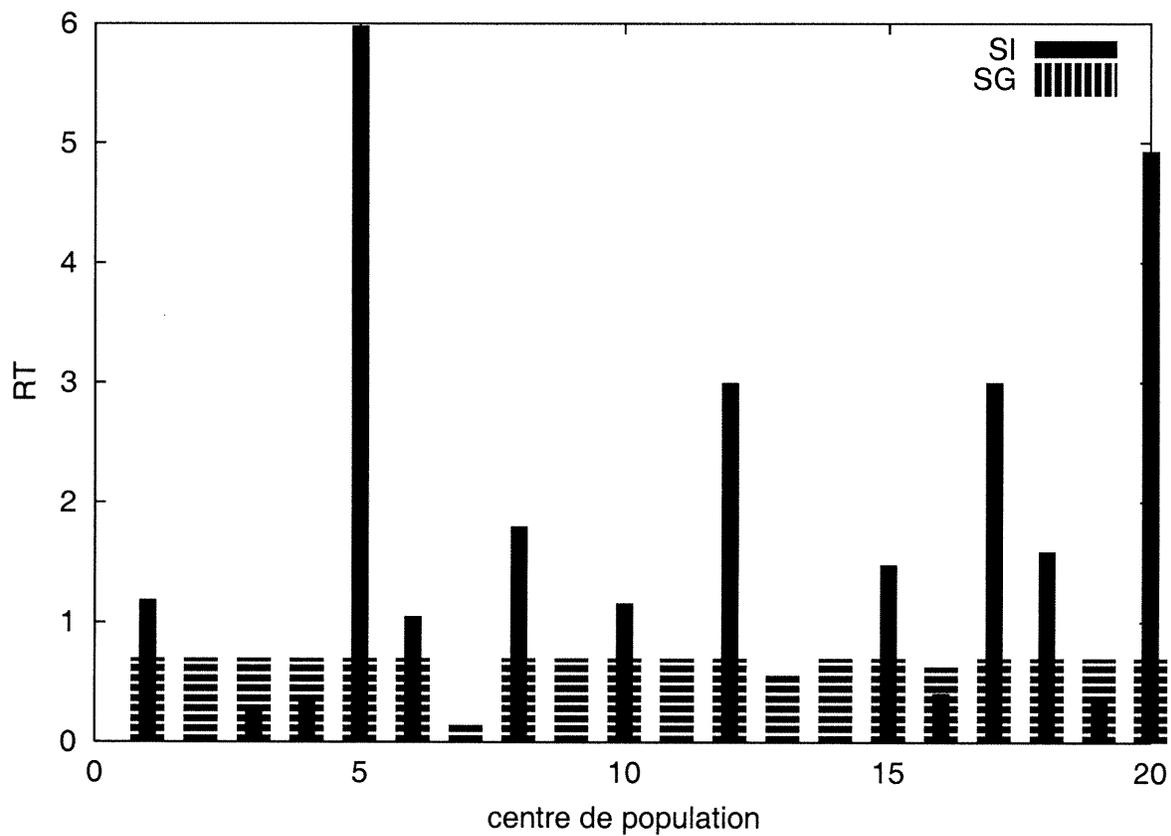


FIG. E.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 2 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2=1$)

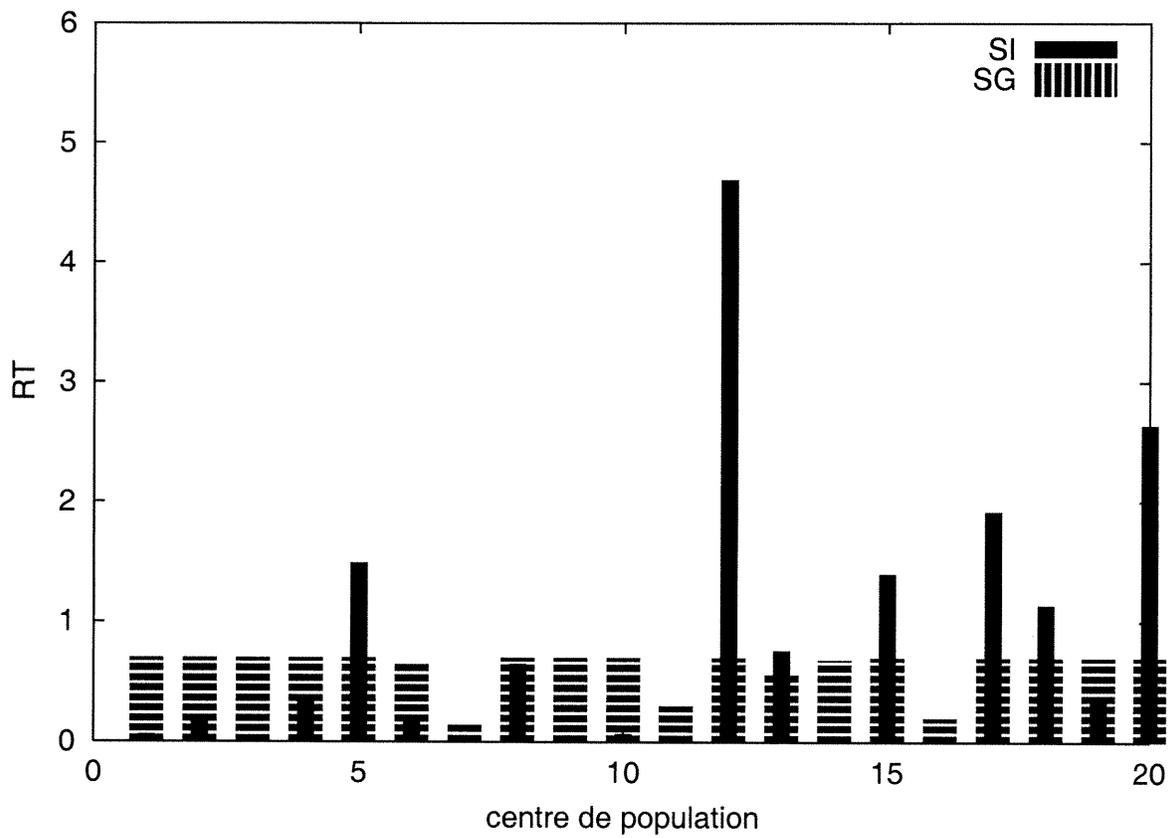


FIG. E.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 2 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

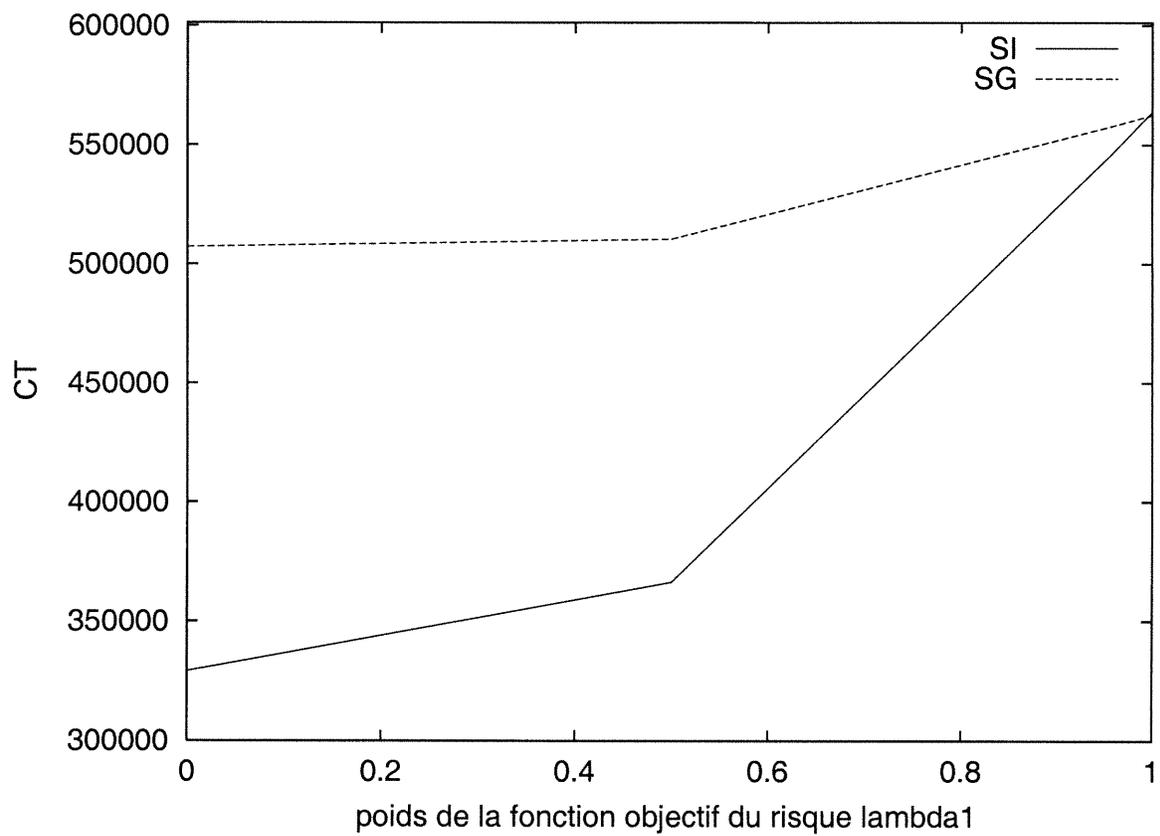


FIG. E.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 2

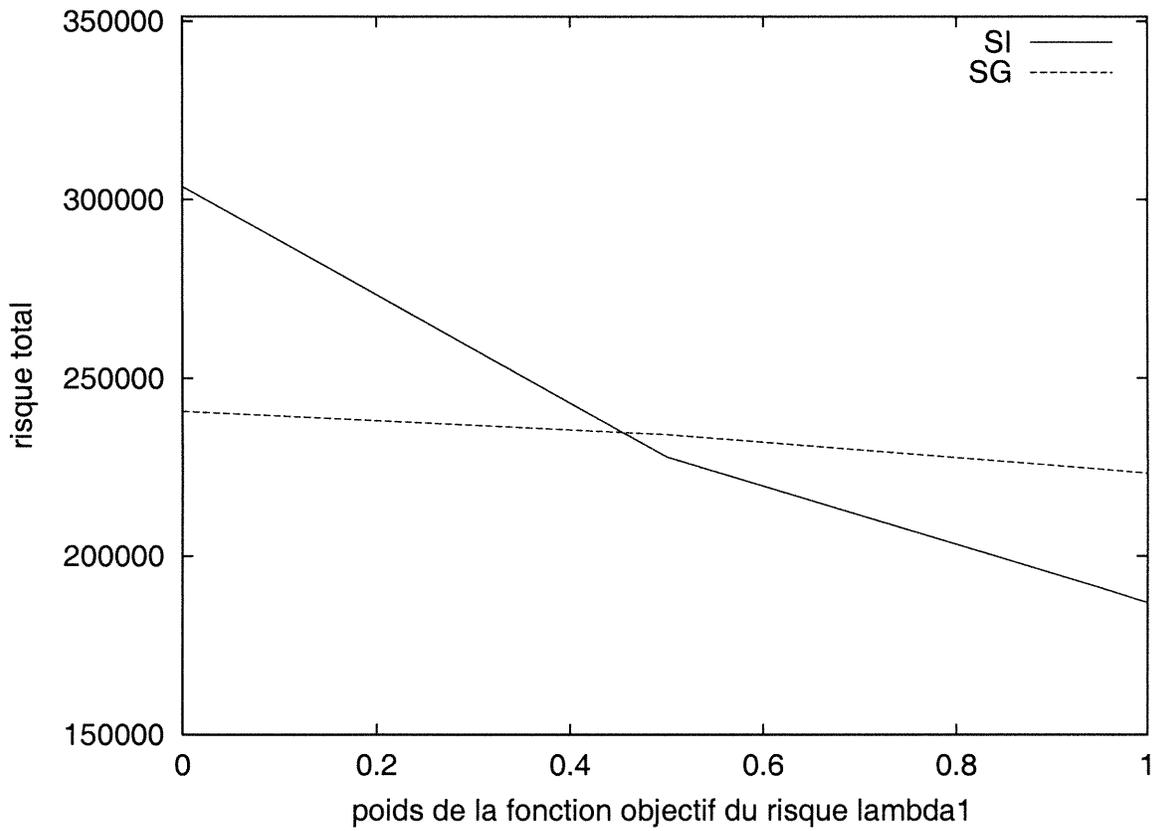


FIG. E.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 2

Annexe F

Résultats du problème 3

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(1,0)$			$(1,0)$		
CPU	12			14		
Coût total du réseau	54530			54249.8		
Risque total du réseau	95116.5			98886.7		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.0457	0	0.0457
P2	2.01	1.8	0.209	2	1.8	0.2
P3	1.29	0.0157	1.27	0.216	0.0157	0.2
P4	2.24	2.22	0.0205	2.42	2.22	0.2
P5	0	0	0	0.0725	0	0.0725
P6	1.64	1.33	0.312	1.53	1.33	0.2
P7	0	0	0	0.00934	0	0.00934
P8	2.2	2.19	0.00252	2.39	2.19	0.2
P9	0	0	0	0.189	0	0.189
P10	3.22	2.68	0.54	2.88	2.68	0.2
P11	0.0287	0.0287	0	0.0503	0.0287	0.0217
P12	2.72	2.66	0.064	2.86	2.66	0.2
P13	0	0	0	0.00514	0	0.00514
P14	3.03	3.03	0	3.18	3.03	0.143
P15	0	0	0	0	0	0
P16	2.24	2.24	0	2.27	2.24	0.032
P17	0	0	0	0.0517	0	0.0517
P18	3.13	3.13	0	3.13	3.13	0
P19	0.00544	0.00544	0	0.0193	0.00544	0.0138
P20	1.6	1.58	0.0163	1.78	1.58	0.2
minimum			0			0
maximum			1.27			0.2

TAB. F.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 3

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(0,1)$			$(0,1)$		
CPU	12			15		
Coût total du réseau	30190			43799.4		
Risque total du réseau	174795			107334		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.00874	0	0.00874	0.2	0	0.2
P2	2	1.8	0.199	2	1.8	0.2
P3	1.43	0.0157	1.42	0.216	0.0157	0.2
P4	2.22	2.22	0	2.42	2.22	0.2
P5	3.85	0	3.85	0.2	0	0.2
P6	3.8	1.33	2.47	1.53	1.33	0.2
P7	0.751	0	0.751	0.101	0	0.101
P8	2.19	2.19	0	2.34	2.19	0.151
P9	0	0	0	0.2	0	0.2
P10	3.82	2.68	1.15	2.88	2.68	0.2
P11	0.153	0.0287	0.124	0.229	0.0287	0.2
P12	3.03	2.66	0.374	2.86	2.66	0.2
P13	0	0	0	0.2	0	0.2
P14	6.54	3.03	3.5	3.23	3.03	0.2
P15	0.643	0	0.643	0.2	0	0.2
P16	3.31	2.24	1.07	2.44	2.24	0.2
P17	0	0	0	0.2	0	0.2
P18	3.13	3.13	0	3.22	3.13	0.0878
P19	1.42	0.00544	1.41	0.205	0.00544	0.2
P20	2.74	1.58	1.16	1.78	1.58	0.2
minimum			0			0.0878
maximum			3.85			0.2

TAB. F.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 3

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(0.5, 0.5)$			$(0.5, 0.5)$		
CPU	12			14		
Coût total du réseau	41527			46664		
Risque total du réseau	98537.3			100860		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.0355	0	0.0355	0.154	0	0.154
P2	2.33	1.8	0.528	2	1.8	0.2
P3	1.32	0.0157	1.3	0.216	0.0157	0.2
P4	2.24	2.22	0.0205	2.42	2.22	0.2
P5	0.0168	0	0.0168	0.2	0	0.2
P6	2.28	1.33	0.946	1.53	1.33	0.2
P7	0.0206	0	0.0206	0.0623	0	0.0623
P8	2.23	2.19	0.0361	2.39	2.19	0.2
P9	0.00897	0	0.00897	0.192	0	0.192
P10	3.42	2.68	0.744	2.88	2.68	0.2
P11	0.0287	0.0287	0	0.0503	0.0287	0.0217
P12	2.66	2.66	0.004	2.86	2.66	0.2
P13	0.0204	0	0.0204	0.0576	0	0.0576
P14	3.3	3.03	0.266	3.23	3.03	0.2
P15	0.0412	0	0.0412	0.0193	0	0.0193
P16	2.25	2.24	0.01	2.28	2.24	0.04
P17	0.000425	0	0.000425	0.0804	0	0.0804
P18	3.13	3.13	0	3.13	3.13	0
P19	0.00544	0.00544	0	0.0636	0.00544	0.0582
P20	1.58	1.58	0.00142	1.66	1.58	0.0779
minimum			0			0
maximum			1.3			0.2

TAB. F.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 3

Annexe G

Graphes du problème 3

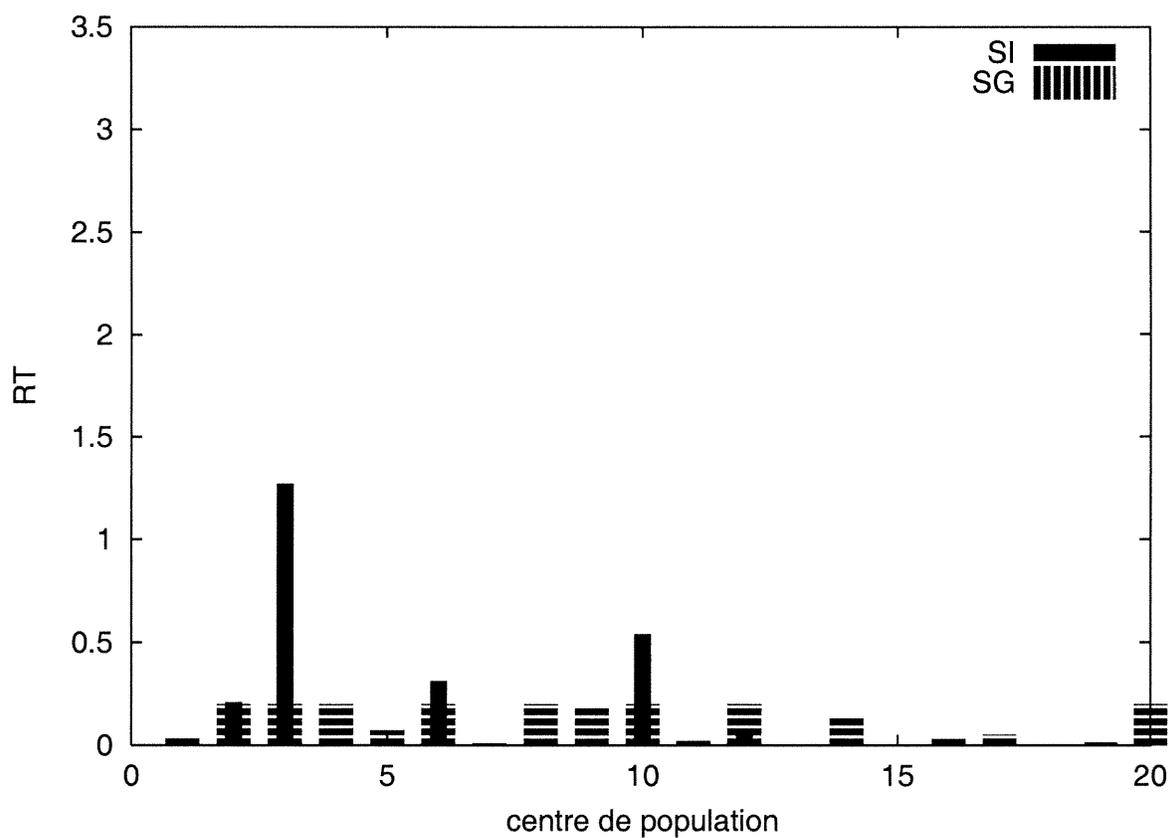


FIG. G.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 3 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2=0$)

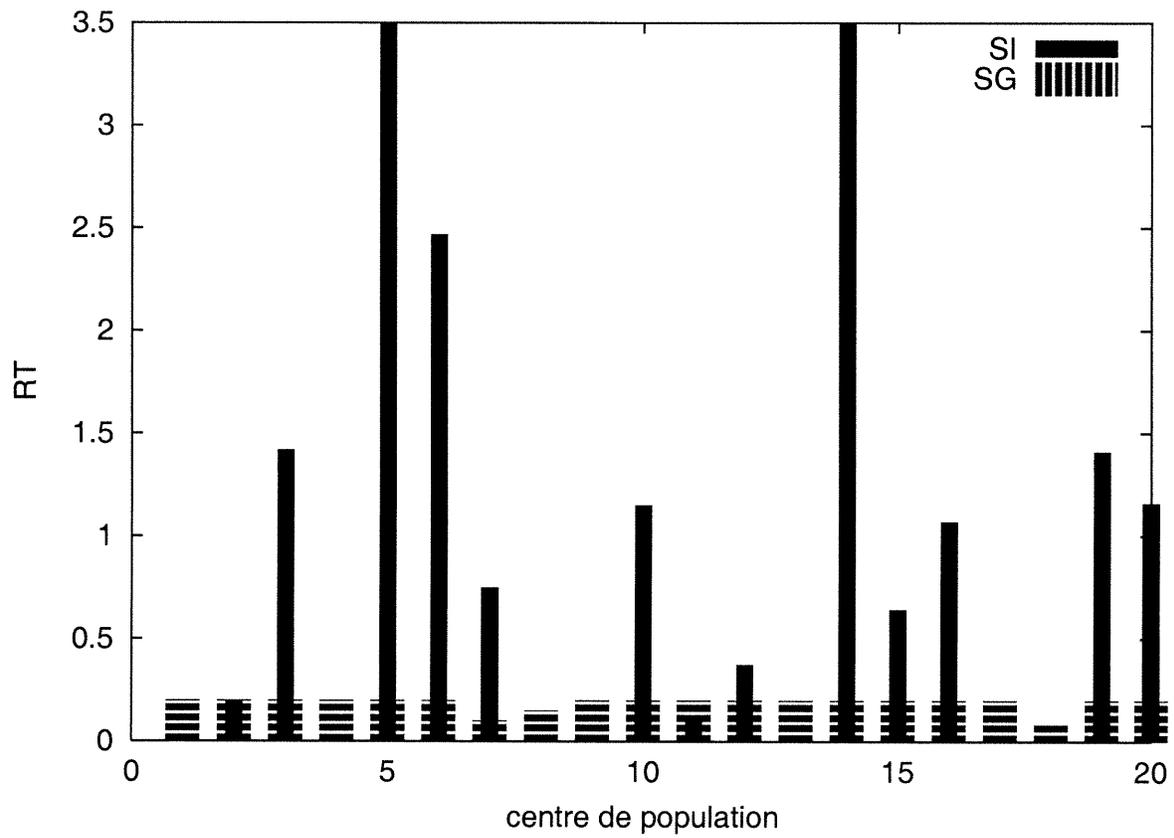


FIG. G.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 3 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)

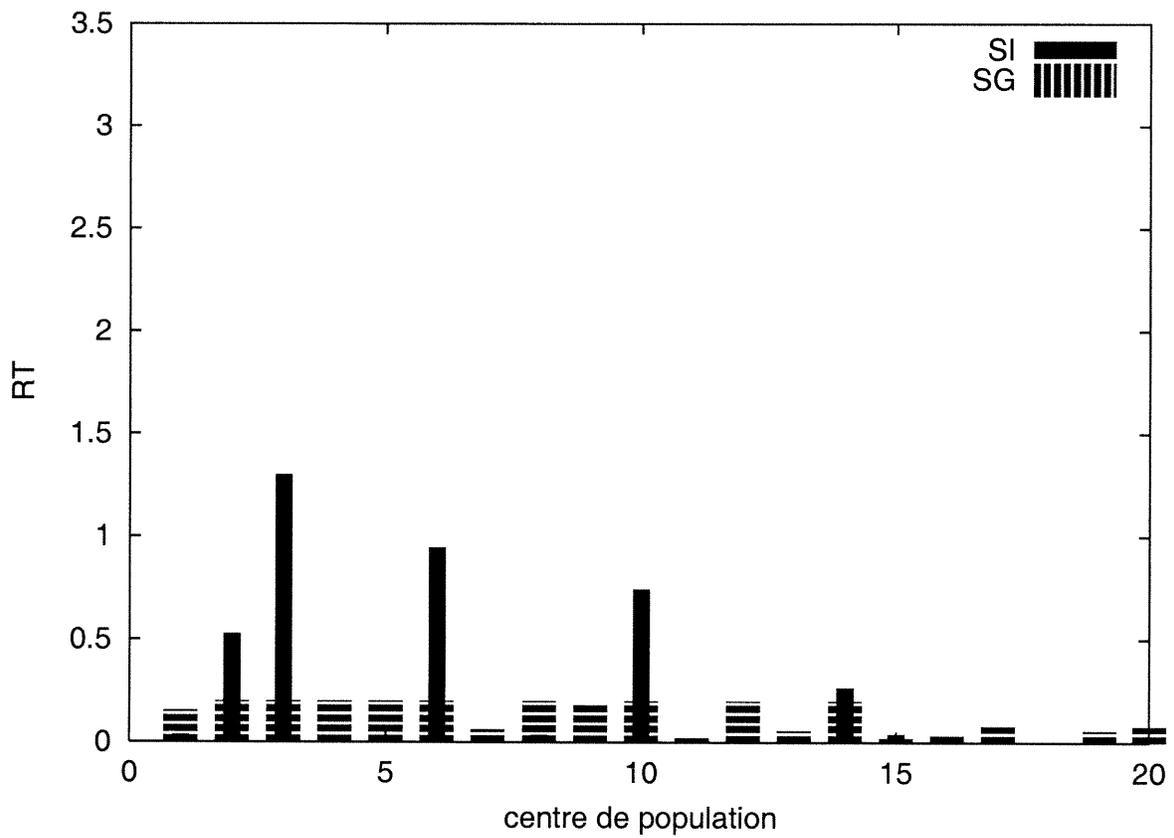


FIG. G.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 3 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

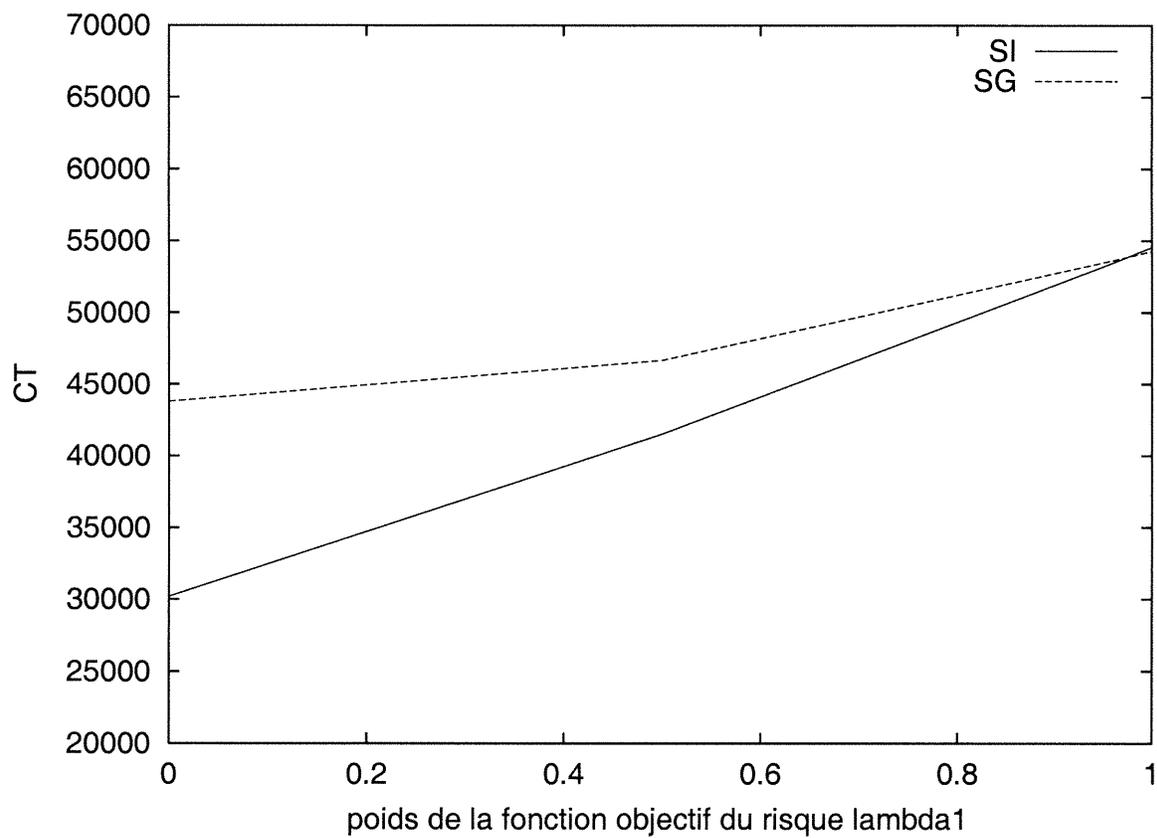


FIG. G.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 3

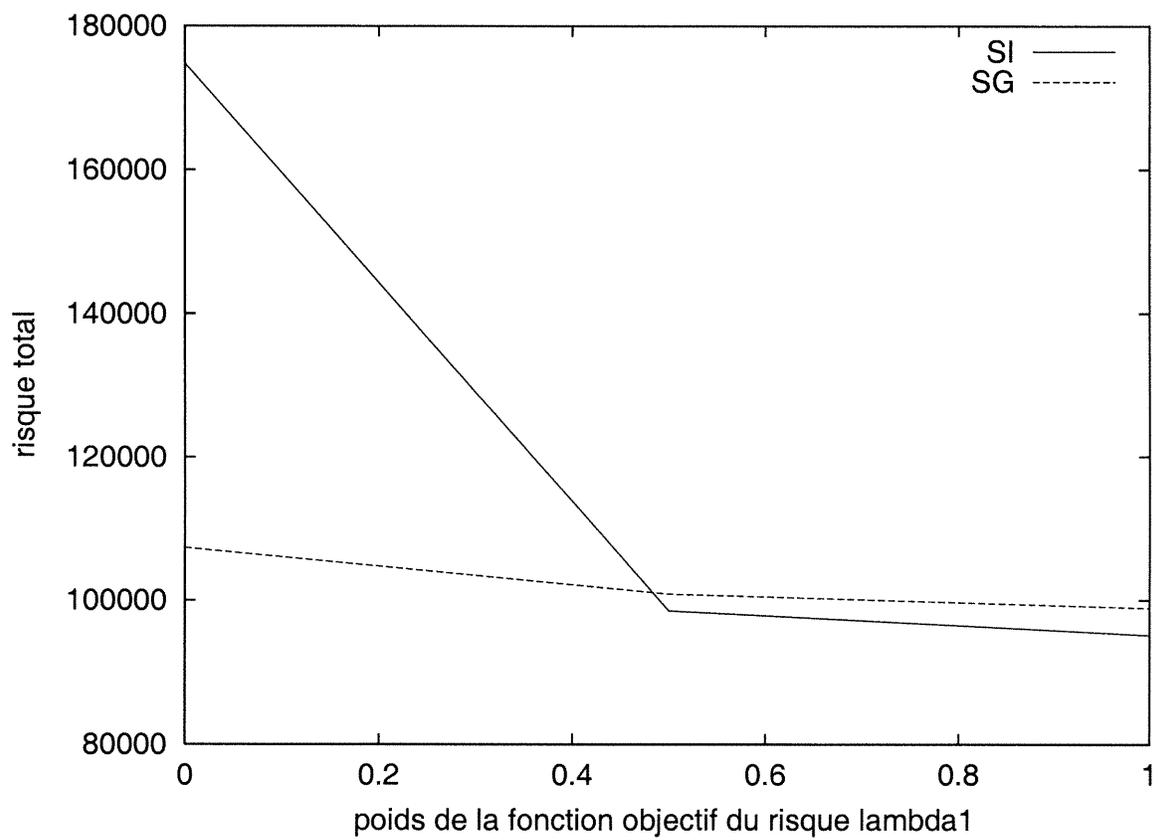


FIG. G.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 3

Annexe H

Résultats du problème 4

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(1,0)$			$(1,0)$		
CPU	6			6		
Coût total du réseau	56367			55691.5		
Risque total du réseau	118348			125762		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0	0	0
P2	2.8	1.59	1.21	1.79	1.59	0.2
P3	0.0194	0	0.0194	0.2	0	0.2
P4	3.86	3.86	0	3.94	3.86	0.0816
P5	0.0473	0	0.0473	0.145	0	0.145
P6	1.84	1.84	0	1.93	1.84	0.0843
P7	0.139	0	0.139	0.2	0	0.2
P8	2.9	2.31	0.59	2.51	2.31	0.2
P9	0.0203	0	0.0203	0.0148	0	0.0148
P10	1.88	1.8	0.0872	2	1.8	0.2
P11	0.015	0	0.015	0.2	0	0.2
P12	2.17	2.17	0	2.37	2.17	0.2
P13	0.0247	0	0.0247	0.168	0	0.168
P14	2.21	2.21	0	2.37	2.21	0.157
P15	0.0184	0	0.0184	0.0832	0	0.0832
P16	1.19	1.19	0.00162	1.39	1.19	0.2
P17	0.00889	0	0.00889	0.2	0	0.2
P18	2.33	2.27	0.0633	2.37	2.27	0.102
P19	0.00409	0	0.00409	0.024	0	0.024
P20	2.06	2.06	0	2.06	2.06	0.00744
minimum			0			0
maximum			1.21			0.2

TAB. H.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 4

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1$ du risque, λ_2 du coût)	(0,1)			(0,1)		
CPU	5			7		
Coût total du réseau	35873			46383.3		
Risque total du réseau	184987			134863		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	2.1	0	2.1	0.2	0	0.2
P2	1.59	1.59	0	1.79	1.59	0.2
P3	0.293	0	0.293	0.2	0	0.2
P4	4.74	3.86	0.882	4.06	3.86	0.2
P5	0.04	0	0.04	0.2	0	0.2
P6	2.36	1.84	0.517	2.04	1.84	0.2
P7	0.965	0	0.965	0.2	0	0.2
P8	2.31	2.31	0	2.51	2.31	0.2
P9	0.0716	0	0.0716	0.113	0	0.113
P10	3.16	1.8	1.36	2	1.8	0.2
P11	0.0929	0	0.0929	0.2	0	0.2
P12	2.17	2.17	4.77e-07	2.37	2.17	0.2
P13	0.175	0	0.175	0.2	0	0.2
P14	2.21	2.21	4.77e-07	2.41	2.21	0.2
P15	1.09	0	1.09	0.2	0	0.2
P16	1.44	1.19	0.248	1.39	1.19	0.2
P17	1.48	0	1.48	0.2	0	0.2
P18	2.27	2.27	4.77e-07	2.47	2.27	0.2
P19	0.274	0	0.274	0.2	0	0.2
P20	3.95	2.06	1.89	2.26	2.06	0.2
minimum			0			0.113
maximum			2.1			0.2

TAB. H.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 4

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(0.5, 0.5)$			$(0.5, 0.5)$		
CPU	6			7		
Coût total du réseau	45364			49677.4		
Risque total du réseau	121416			126758		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.0952	0	0.0952
P2	2.57	1.59	0.984	1.79	1.59	0.2
P3	0.0215	0	0.0215	0.2	0	0.2
P4	3.9	3.86	0.0351	3.98	3.86	0.119
P5	0.0747	0	0.0747	0.2	0	0.2
P6	1.84	1.84	0	1.96	1.84	0.122
P7	0.383	0	0.383	0.2	0	0.2
P8	2.61	2.31	0.299	2.51	2.31	0.2
P9	0.0783	0	0.0783	0.0148	0	0.0148
P10	1.8	1.8	0.000878	2	1.8	0.2
P11	0.0248	0	0.0248	0.2	0	0.2
P12	2.17	2.17	0	2.37	2.17	0.2
P13	0.151	0	0.151	0.189	0	0.189
P14	2.21	2.21	0	2.26	2.21	0.052
P15	0.0608	0	0.0608	0.2	0	0.2
P16	1.28	1.19	0.0834	1.39	1.19	0.2
P17	0.338	0	0.338	0.2	0	0.2
P18	2.27	2.27	0	2.28	2.27	0.00839
P19	0.0227	0	0.0227	0.0541	0	0.0541
P20	2.06	2.06	0	2.06	2.06	0.00744
minimum			0			0.00744
maximum			0.984			0.2

TAB. H.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 4

Annexe I

Graphes du problème 4

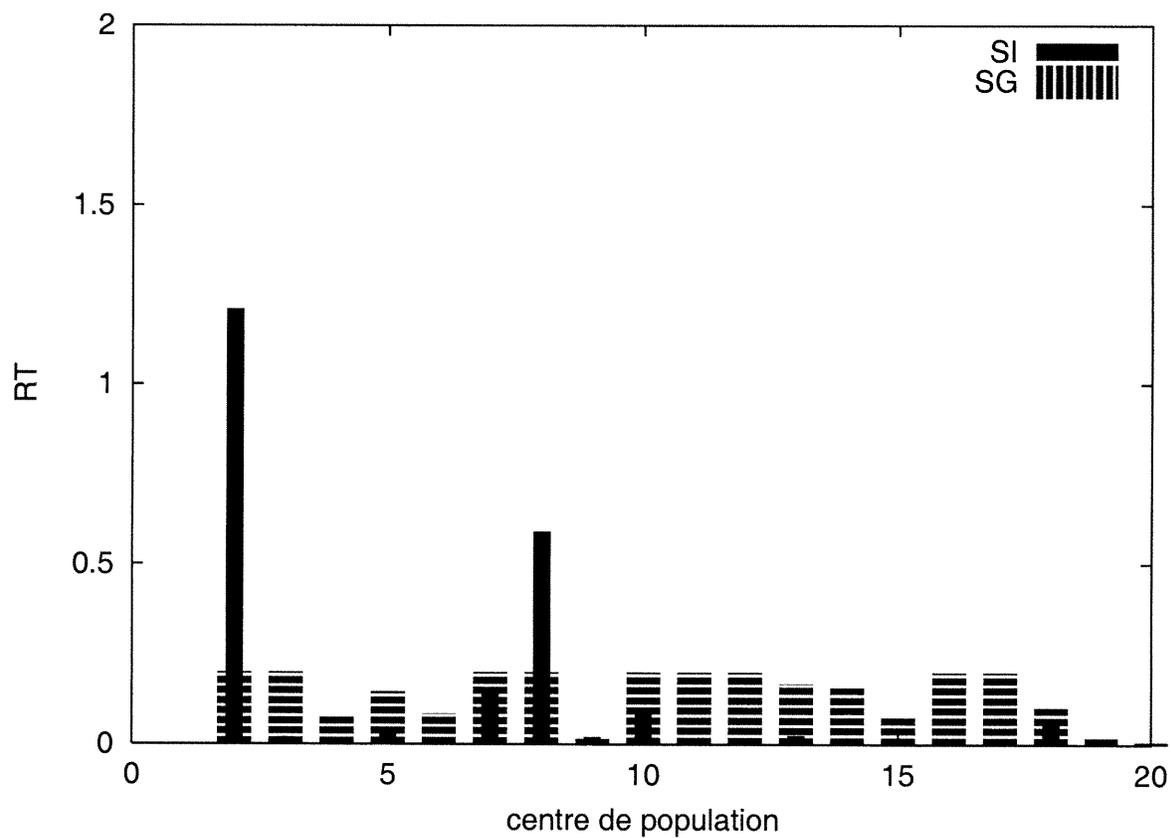


FIG. I.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 4 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)

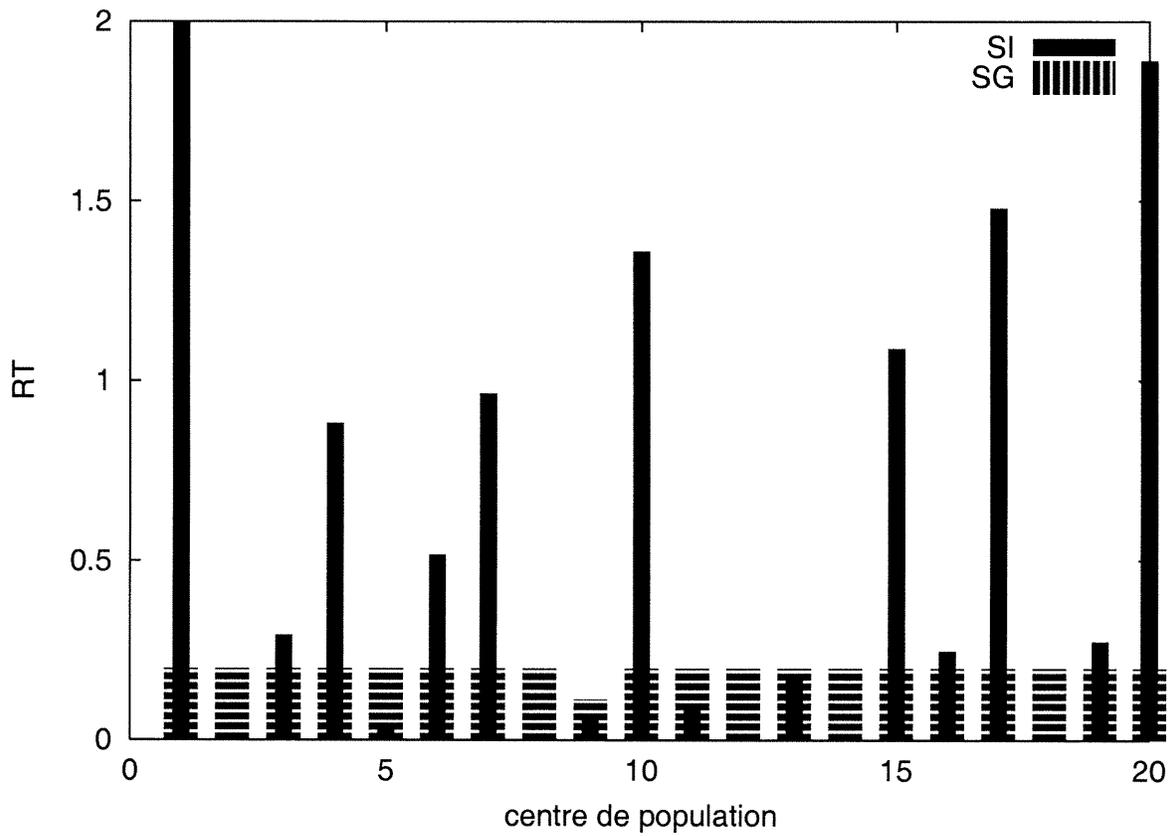


FIG. I.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 4 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)

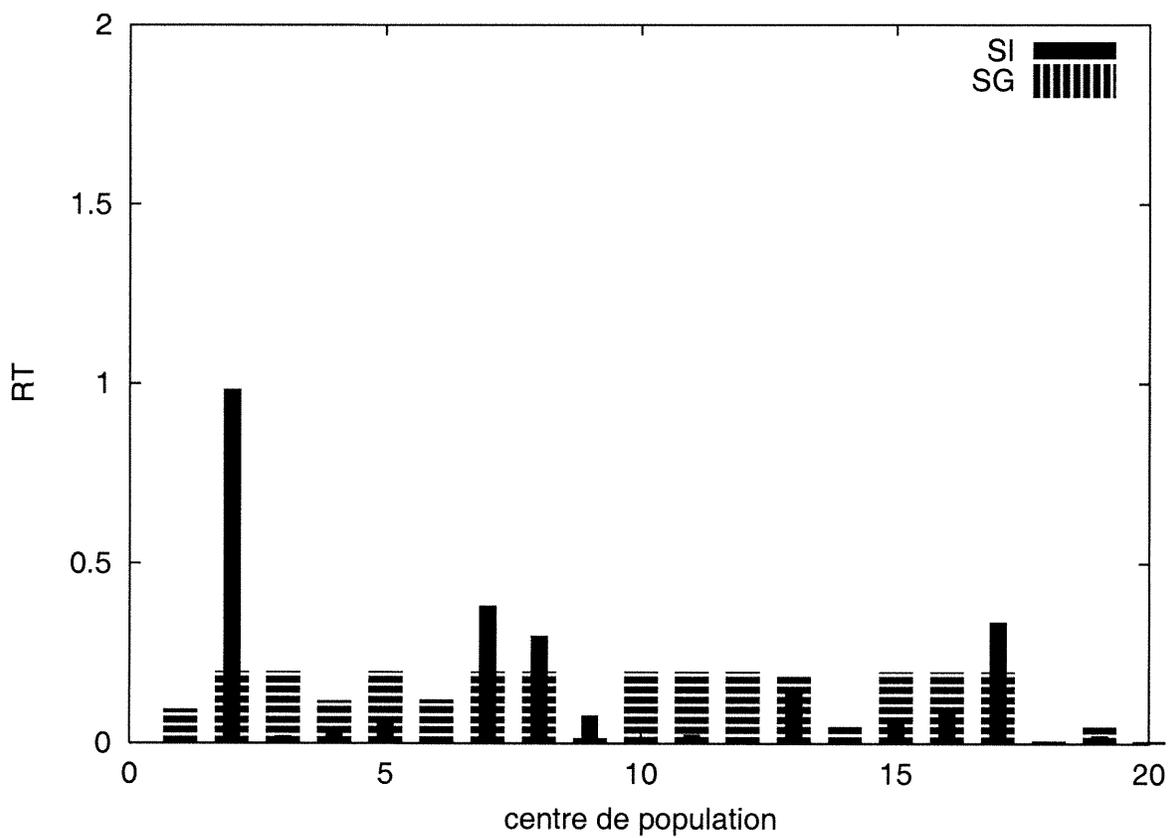


FIG. I.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 4 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

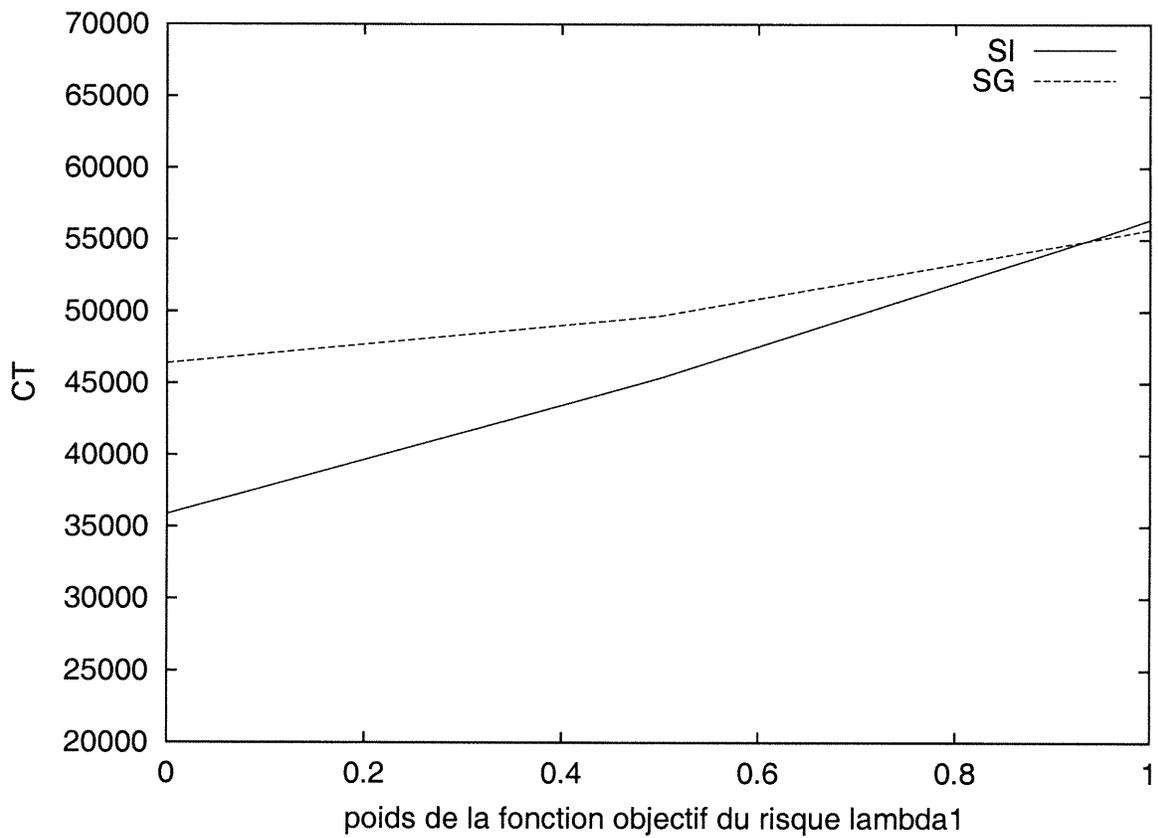


FIG. I.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 4

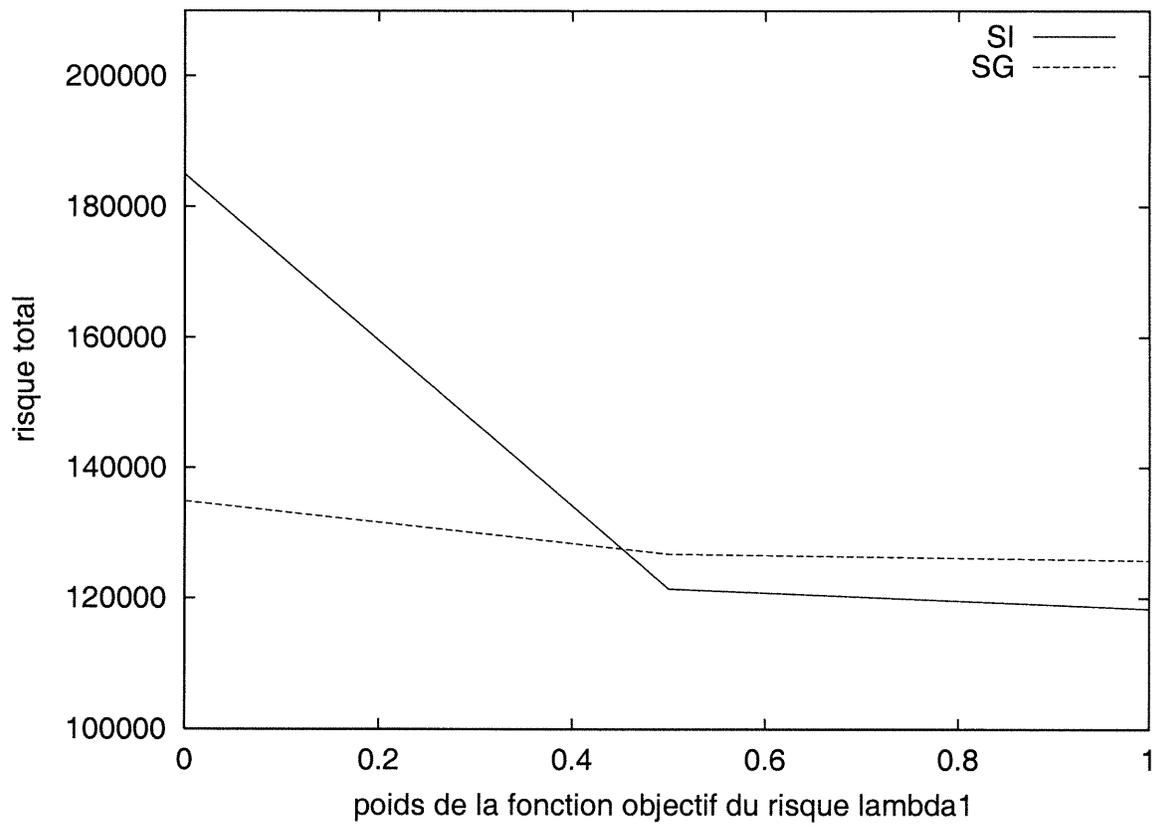


FIG. I.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 4

Annexe J

Résultats du problème 5

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$			$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$		
CPU	13			16		
Coût total du réseau	61579			60186.8		
Risque total du réseau	50466.7			57571.2		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.0362	0	0.0362
P2	0.0714	0	0.0714	0.06	0	0.06
P3	0	0	0	0.06	0	0.06
P4	0	0	0	0.06	0	0.06
P5	0	0	0	0.06	0	0.06
P6	0.922	0.922	0	0.981	0.922	0.059
P7	0.00742	0	0.00742	0.06	0	0.06
P8	0.444	0.444	0	0.504	0.444	0.06
P9	0.00661	0	0.00661	0.06	0	0.06
P10	1.2	1.18	0.0192	1.24	1.18	0.06
P11	0.0141	0	0.0141	0.06	0	0.06
P12	1.09	1.02	0.0741	1.07	1.02	0.0485
P13	0.0927	0	0.0927	0.06	0	0.06
P14	0.85	0.82	0.0302	0.88	0.82	0.06
P15	0.443	0	0.443	0.06	0	0.06
P16	0.171	0.171	0.000709	0.231	0.171	0.06
P17	0.00521	0	0.00521	0.06	0	0.06
P18	0	0	0	0.0508	0	0.0508
P19	0	0	0	0.06	0	0.06
P20	0.615	0.614	0.000722	0.674	0.614	0.06
P21	0.0431	0	0.0431	0.06	0	0.06
P22	1.28	1.27	0.014	1.33	1.27	0.06
P23	0.223	0	0.223	0.06	0	0.06
P24	0.738	0.738	0	0.798	0.738	0.06
P25	0	0	0	0.055	0	0.055
P26	0.797	0.797	0	0.857	0.797	0.06
P27	0	0	0	0.06	0	0.06
P28	0.883	0.883	0.000227	0.943	0.883	0.06
P29	0	0	0	0.06	0	0.06
P30	0.0193	0	0.0193	0.06	0	0.06
minimum			0			0.0362
maximum			0.443			0.06

TAB. J.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 5

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$			$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$		
CPU	13			16		
Coût total du réseau	29416			54911.1		
Risque total du réseau	120108			57872.8		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	1.25	0	1.25	0.06	0	0.06
P2	0	0	0	0.06	0	0.06
P3	0.522	0	0.522	0.06	0	0.06
P4	0.00503	0	0.00503	0.06	0	0.06
P5	0	0	0	0.06	0	0.06
P6	2.46	0.922	1.53	0.982	0.922	0.06
P7	0.137	0	0.137	0.06	0	0.06
P8	0.788	0.444	0.344	0.504	0.444	0.06
P9	0	0	0	0.06	0	0.06
P10	1.67	1.18	0.493	1.24	1.18	0.06
P11	0.53	0	0.53	0.06	0	0.06
P12	1.25	1.02	0.23	1.08	1.02	0.06
P13	0.0685	0	0.0685	0.06	0	0.06
P14	1.57	0.82	0.748	0.88	0.82	0.06
P15	0.013	0	0.013	0.06	0	0.06
P16	0.469	0.171	0.299	0.231	0.171	0.06
P17	0.693	0	0.693	0.06	0	0.06
P18	0.239	0	0.239	0.06	0	0.06
P19	0.223	0	0.223	0.06	0	0.06
P20	1.09	0.614	0.474	0.674	0.614	0.06
P21	0.788	0	0.788	0.06	0	0.06
P22	1.27	1.27	-1.19e-07	1.33	1.27	0.06
P23	0	0	0	0.06	0	0.06
P24	1.39	0.738	0.654	0.798	0.738	0.06
P25	0.368	0	0.368	0.06	0	0.06
P26	0.849	0.797	0.0518	0.857	0.797	0.06
P27	0.906	0	0.906	0.06	0	0.06
P28	0.947	0.883	0.0647	0.943	0.883	0.06
P29	0.0034	0	0.0034	0.06	0	0.06
P30	0	0	0	0.06	0	0.06
minimum			0			0.06
maximum			1.53			0.06

TAB. J.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 5

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$			$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$		
CPU	13			16		
Coût total du réseau	39419			54914.3		
Risque total du réseau	56040.1			57868.		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.12	0	0.12	0.06	0	0.06
P2	0	0	0	0.06	0	0.06
P3	0.0226	0	0.0226	0.06	0	0.06
P4	0.0369	0	0.0369	0.06	0	0.06
P5	0	0	0	0.06	0	0.06
P6	0.942	0.922	0.0199	0.982	0.922	0.06
P7	0	0	0	0.06	0	0.06
P8	0.594	0.444	0.15	0.504	0.444	0.06
P9	0	0	0	0.06	0	0.06
P10	1.26	1.18	0.0855	1.24	1.18	0.06
P11	0.00473	0	0.00473	0.06	0	0.06
P12	1.15	1.02	0.133	1.07	1.02	0.0479
P13	0	0	0	0.06	0	0.06
P14	0.866	0.82	0.0467	0.88	0.82	0.06
P15	0.301	0	0.301	0.06	0	0.06
P16	0.329	0.171	0.158	0.231	0.171	0.06
P17	0.0705	0	0.0705	0.06	0	0.06
P18	0	0	0	0.06	0	0.06
P19	0.000485	0	0.000485	0.06	0	0.06
P20	0.619	0.614	0.0047	0.674	0.614	0.06
P21	0.425	0	0.425	0.06	0	0.06
P22	1.27	1.27	0	1.33	1.27	0.06
P23	0.271	0	0.271	0.06	0	0.06
P24	0.828	0.738	0.0904	0.798	0.738	0.06
P25	0.0344	0	0.0344	0.06	0	0.06
P26	0.797	0.797	0	0.857	0.797	0.06
P27	0	0	0	0.06	0	0.06
P28	0.883	0.883	0	0.943	0.883	0.06
P29	0.0268	0	0.0268	0.06	0	0.06
P30	0.0193	0	0.0193	0.06	0	0.06
minimum			0			0.0479
maximum			0.425			0.06

TAB. J.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 5

Annexe K

Graphes du problème 5

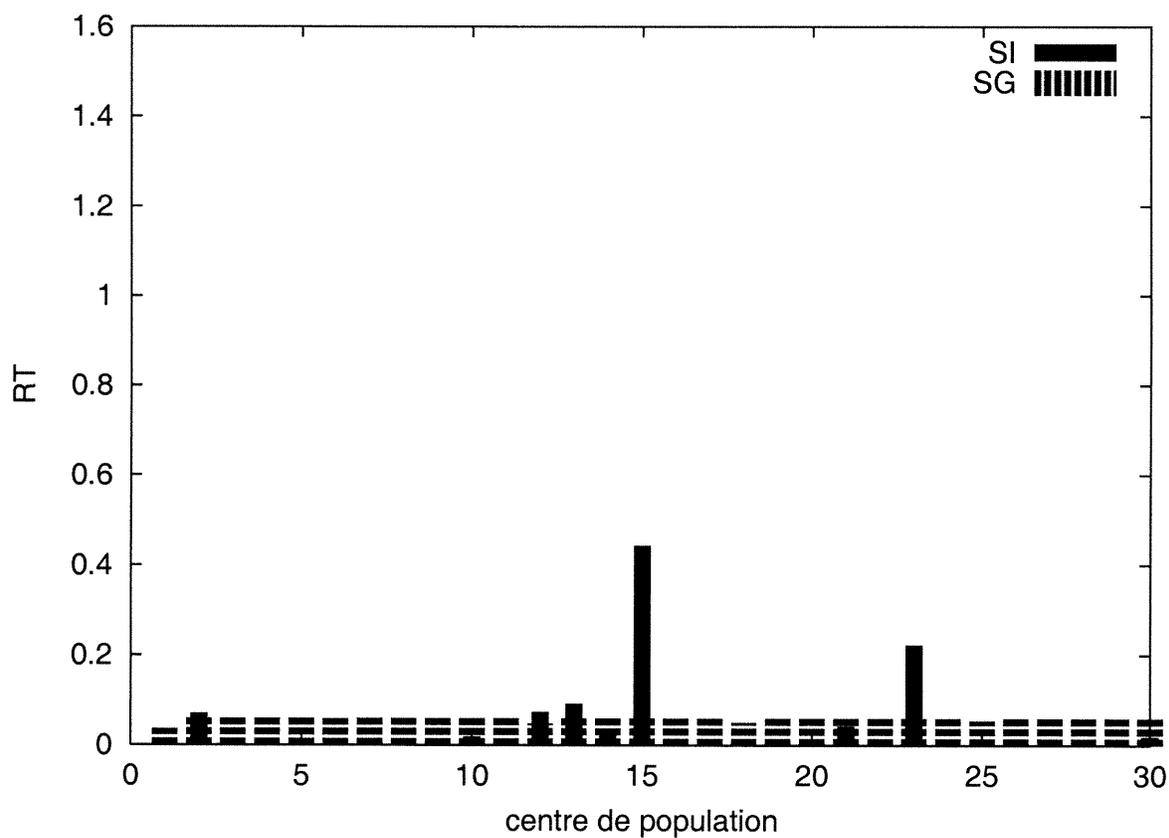


FIG. K.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 5 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2=0$)

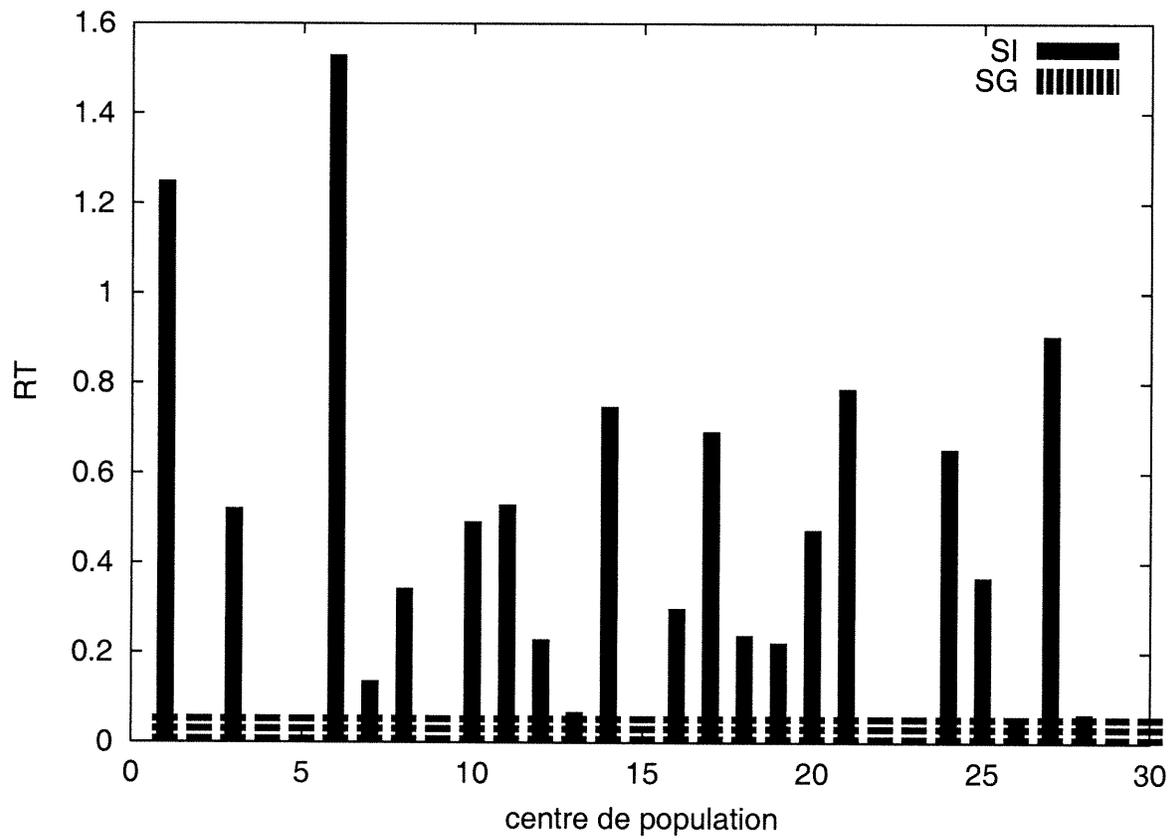


FIG. K.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 5 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)

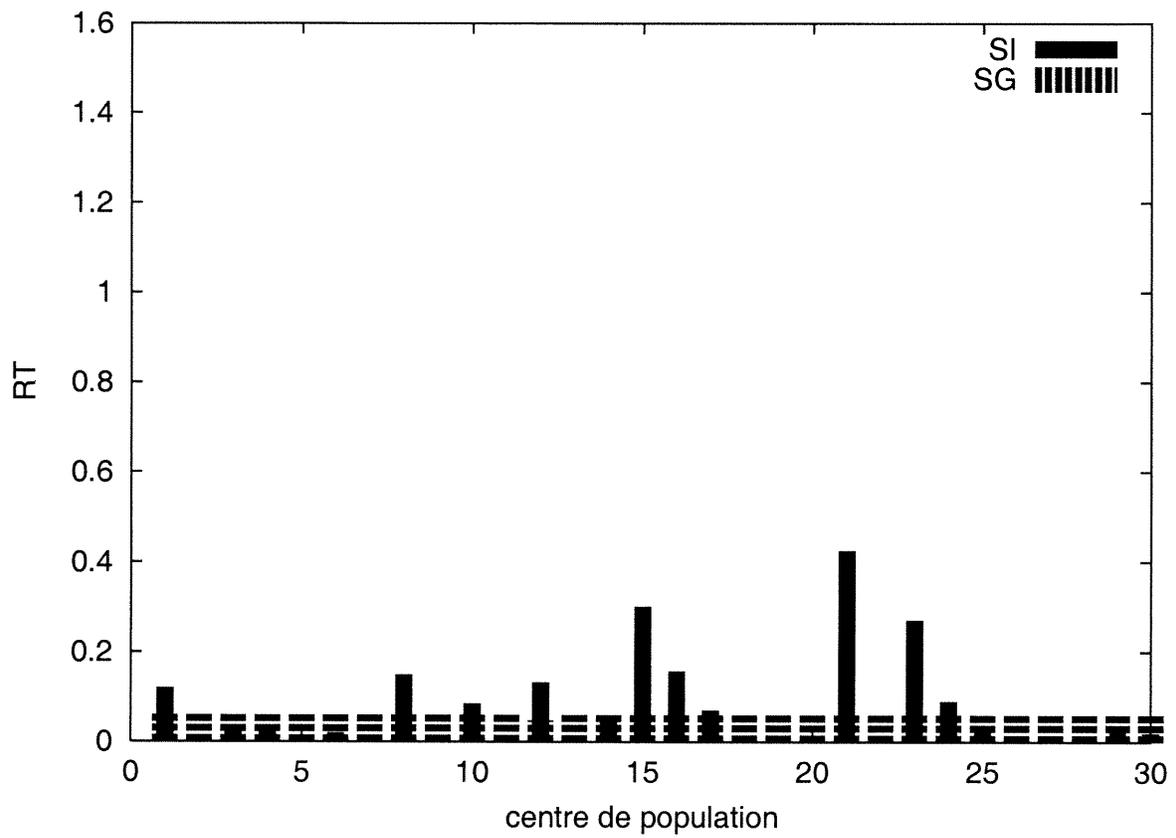


FIG. K.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 5 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

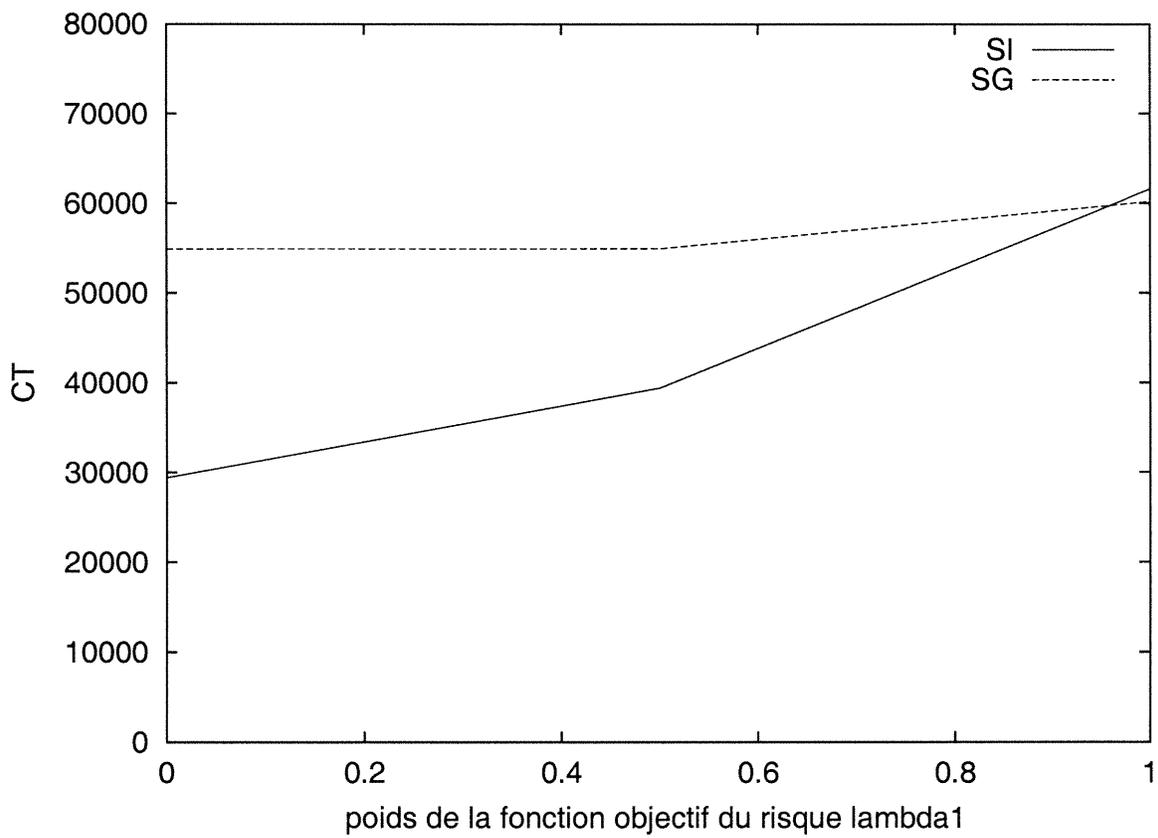


FIG. K.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 5

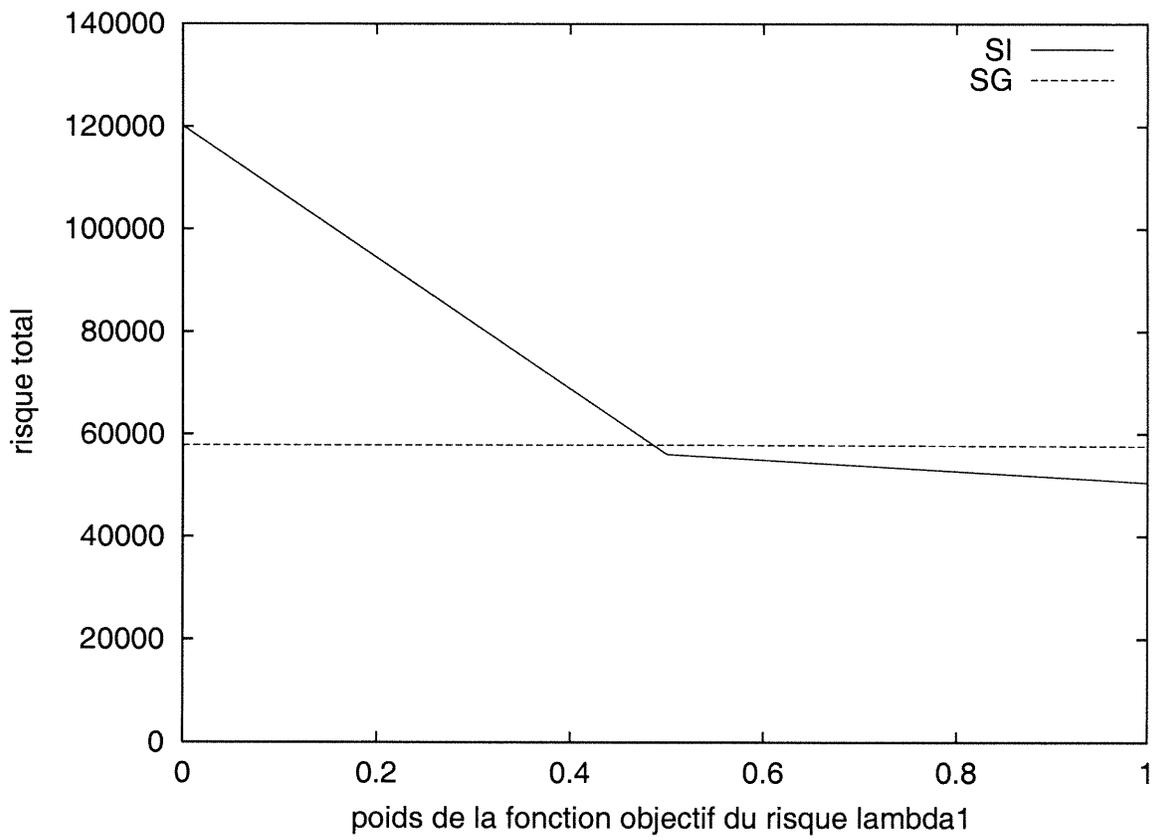


FIG. K.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 5

Annexe L

Résultats du problème 6

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$			$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$		
CPU	13			15		
Coût total du réseau	51927			53558.1		
Risque total du réseau	67705.9			68287.7		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0	0	0
P2	0.0112	0	0.0112	0.00516	0	0.00516
P3	0	0	0	0.00534	0	0.00534
P4	0	0	0	0.0161	0	0.0161
P5	0	0	0	0	0	0
P6	1.03	1.03	0	1.03	1.03	0
P7	0	0	0	0	0	0
P8	1.92	1.92	0	1.94	1.92	0.02
P9	0	0	0	0.0106	0	0.0106
P10	1.54	1.54	0	1.56	1.54	0.02
P11	0	0	0	0.00574	0	0.00574
P12	1.48	1.09	0.39	1.11	1.09	0.02
P13	0.00842	0	0.00842	0.02	0	0.02
P14	1.18	1.18	0	1.2	1.18	0.02
P15	0	0	0	0.0115	0	0.0115
P16	0.00164	0	0.00164	0.00164	0	0.00164
P17	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	0.00933	0	0.00933
P19	0	0	0	0	0	0
P20	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	0	0	0	0
P22	0.0122	0.0122	0	0.0122	0.0122	0
P23	0.0462	0	0.0462	0.0158	0	0.0158
P24	1.72	1.72	0.00373	1.74	1.72	0.02
P25	0	0	0	0.00726	0	0.00726
P26	1.45	1.45	0	1.46	1.45	0.0114
P27	0	0	0	0	0	0
P28	0	0	0	0	0	0
P29	0	0	0	0	0	0
P30	1.77	1.77	0	1.77	1.77	0
minimum			0			0
maximum			0.39			0.02

TAB. L.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 6

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$			$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$		
CPU	13			16		
Coût total du réseau	33211			43526		
Risque total du réseau	97430			70530.1		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.0975	0	0.0975	0.02	0	0.02
P2	0	0	0	0.02	0	0.02
P3	0.584	0	0.584	0.02	0	0.02
P4	0.722	0	0.722	0.02	0	0.02
P5	0.0504	0	0.0504	0.02	0	0.02
P6	1.03	1.03	0	1.05	1.03	0.02
P7	0.0536	0	0.0536	0.02	0	0.02
P8	2.06	1.92	0.136	1.94	1.92	0.02
P9	0.658	0	0.658	0.02	0	0.02
P10	1.87	1.54	0.325	1.56	1.54	0.02
P11	0	0	0	0.02	0	0.02
P12	1.09	1.09	0	1.11	1.09	0.02
P13	0	0	0	0.02	0	0.02
P14	1.79	1.18	0.61	1.2	1.18	0.02
P15	0	0	0	0.02	0	0.02
P16	0	0	0	0.02	0	0.02
P17	0.397	0	0.397	0.02	0	0.02
P18	0	0	0	0.02	0	0.02
P19	0.192	0	0.192	0.02	0	0.02
P20	0	0	0	0.02	0	0.02
P21	0.415	0	0.415	0.02	0	0.02
P22	0.609	0.0122	0.597	0.0322	0.0122	0.02
P23	1.76	0	1.76	0.02	0	0.02
P24	1.72	1.72	0.00373	1.74	1.72	0.02
P25	0	0	0	0.02	0	0.02
P26	1.45	1.45	0	1.47	1.45	0.02
P27	0	0	0	0.02	0	0.02
P28	0	0	0	0.02	0	0.02
P29	0.168	0	0.168	0.02	0	0.02
P30	1.77	1.77	0	1.77	1.77	0.000848
minimum			0			0.000848
maximum			1.76			0.02

TAB. L.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 6

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$			$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$		
CPU	13			15		
Coût total du réseau	38606			44058.7		
Risque total du réseau	70297.2			69449		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.02	0	0.02
P2	0.0112	0	0.0112	0.00516	0	0.00516
P3	0.0282	0	0.0282	0.02	0	0.02
P4	0	0	0	0.02	0	0.02
P5	0.0439	0	0.0439	0.02	0	0.02
P6	1.04	1.03	0.0101	1.04	1.03	0.0101
P7	0	0	0	0.02	0	0.02
P8	1.92	1.92	0	1.94	1.92	0.02
P9	0.0626	0	0.0626	0.02	0	0.02
P10	1.6	1.54	0.0606	1.56	1.54	0.02
P11	0	0	0	0.00197	0	0.00197
P12	1.9	1.09	0.804	1.11	1.09	0.02
P13	0	0	0	0.02	0	0.02
P14	1.2	1.18	0.0214	1.2	1.18	0.02
P15	0	0	0	0.02	0	0.02
P16	0	0	0	7.02e-05	0	7.02e-05
P17	0.00077	0	0.00077	0.00503	0	0.00503
P18	0	0	0	0.00933	0	0.00933
P19	0	0	0	0.0187	0	0.0187
P20	0	0	0	0.0189	0	0.0189
P21	0.0338	0	0.0338	0.02	0	0.02
P22	0.0122	0.0122	0	0.0122	0.0122	0
P23	0.707	0	0.707	0.02	0	0.02
P24	1.73	1.72	0.0114	1.74	1.72	0.02
P25	0	0	0	0	0	0
P26	1.45	1.45	0	1.47	1.45	0.02
P27	0	0	0	0	0	0
P28	0	0	0	0.02	0	0.02
P29	0.0128	0	0.0128	0.02	0	0.02
P30	1.77	1.77	0.000848	1.77	1.77	0.000848
minimum			0			0
maximum			0.804			0.02

TAB. L.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 6

Annexe M

Graphes du problème 6

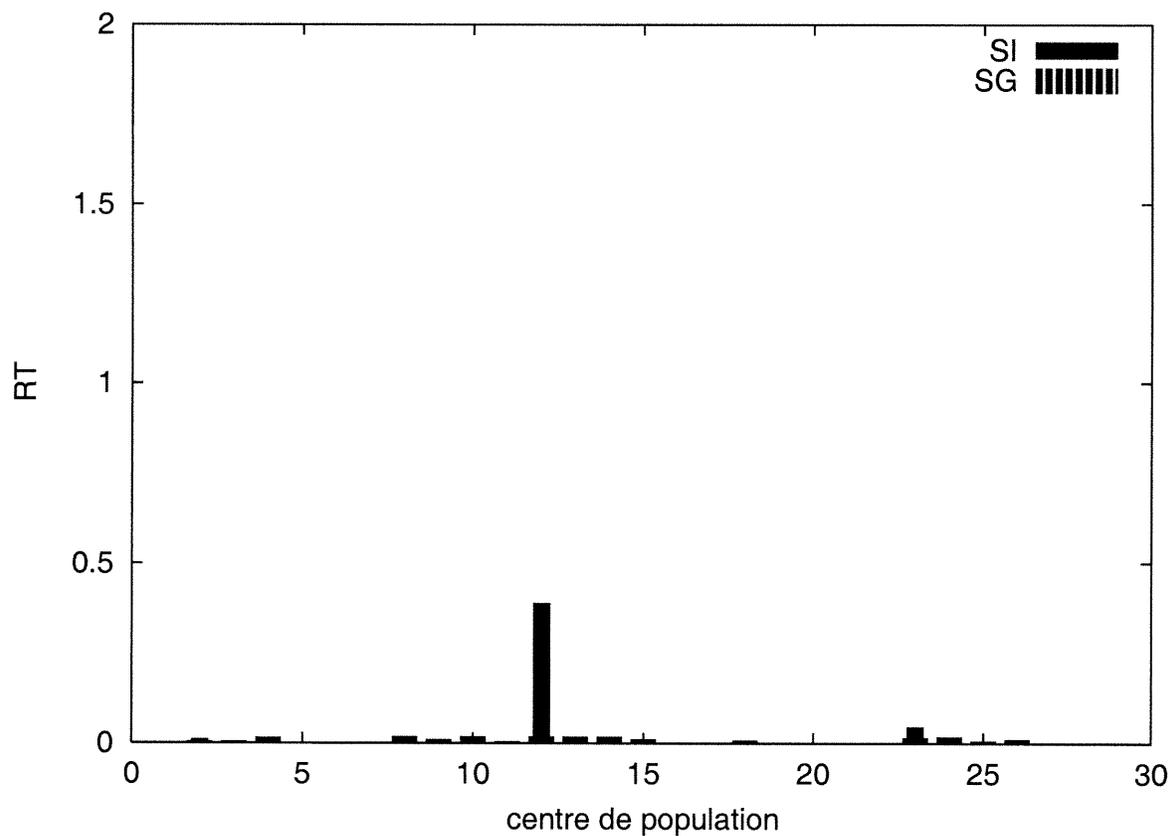


FIG. M.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 6 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)

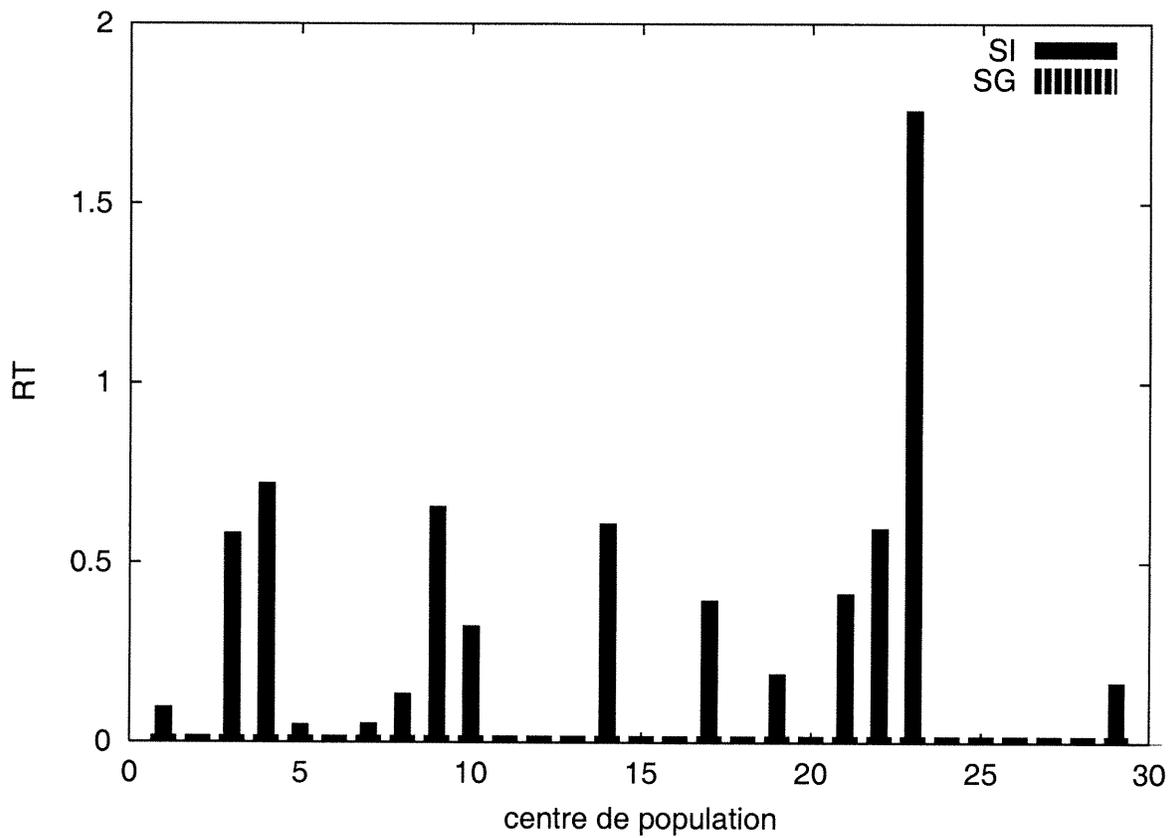


FIG. M.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 6 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)

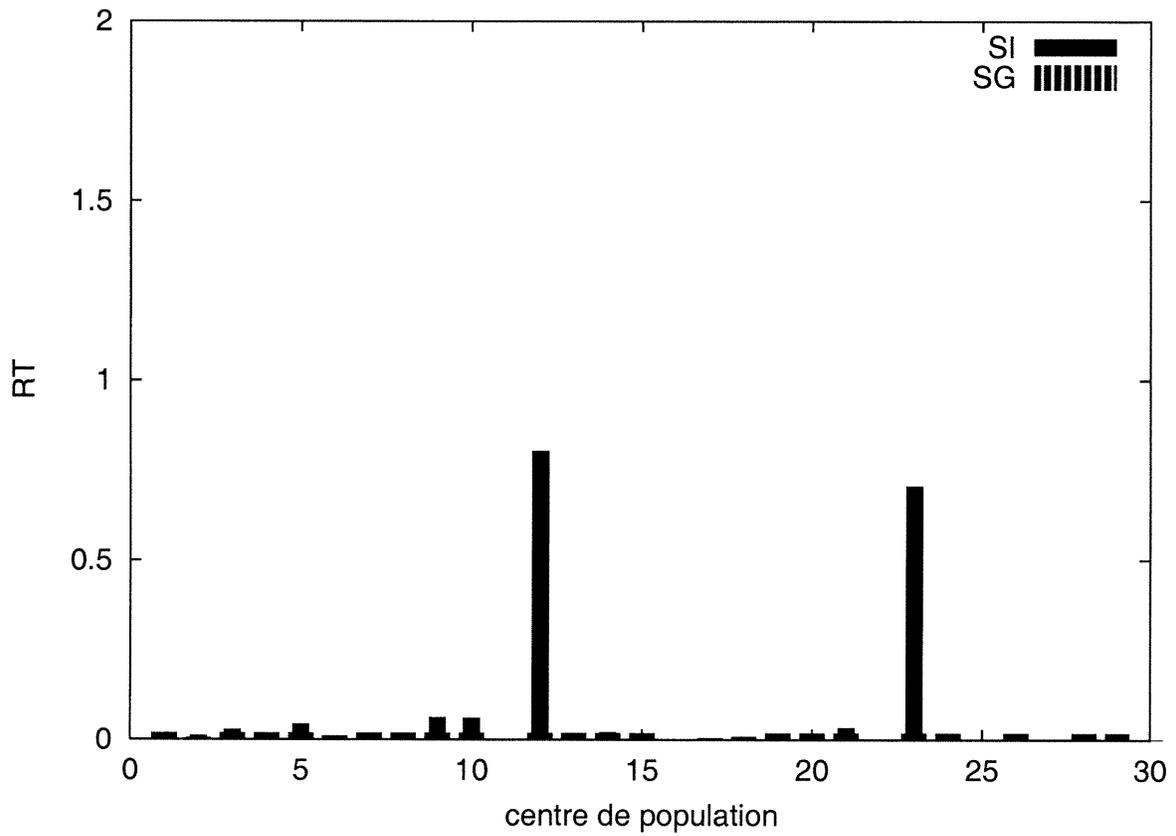


FIG. M.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 6 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

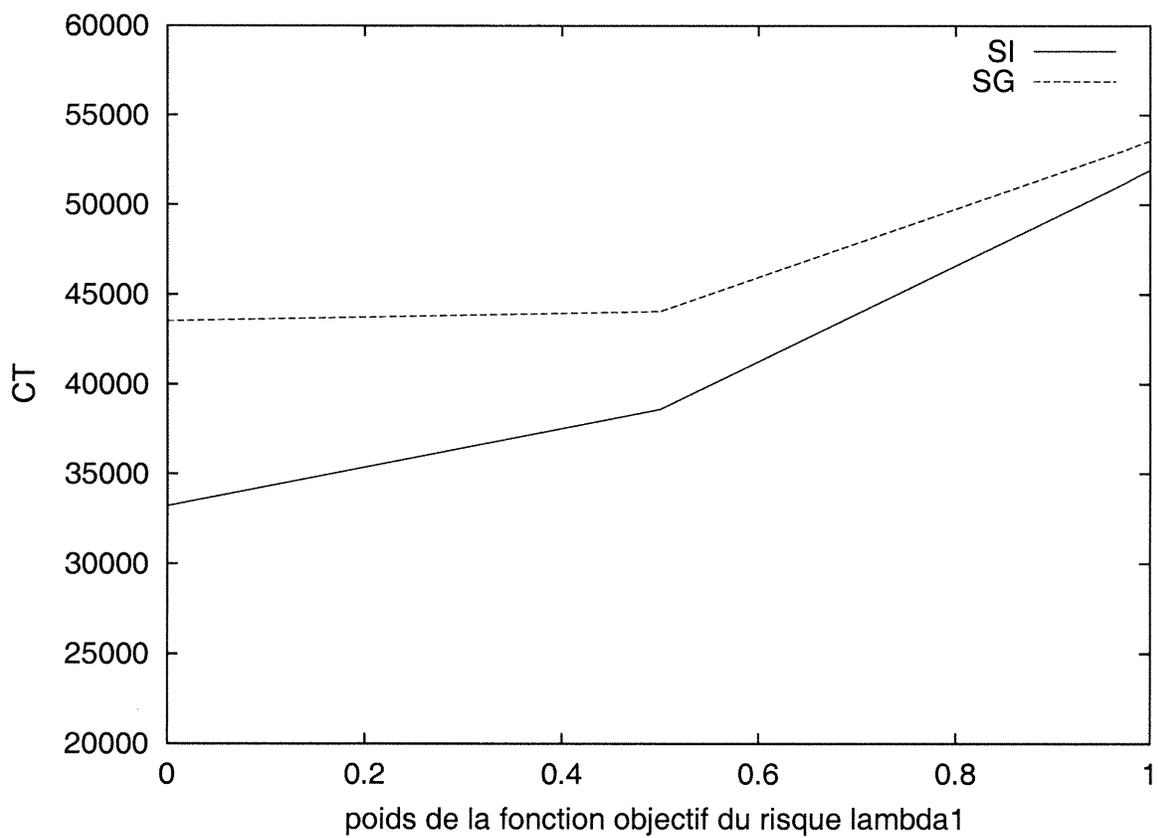


FIG. M.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 6

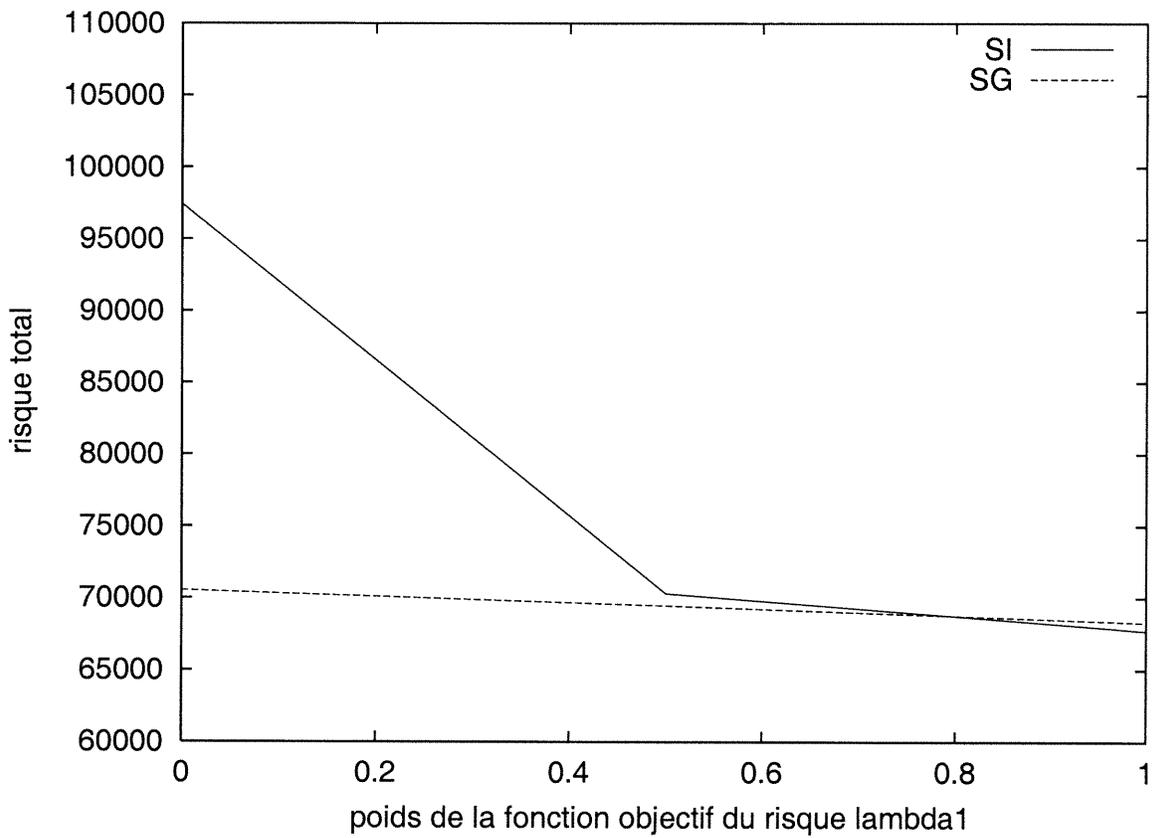


FIG. M.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 6

Annexe N

Résultats du problème 7

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$			$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$		
CPU	65			72		
Coût total du réseau	88599			91949.7		
Risque total du réseau	191254			192290		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.0119	0	0.0119	0.02	0	0.02
P2	5.27	5.27	0	5.29	5.27	0.02
P3	0	0	0	0.02	0	0.02
P4	3.84	3.84	0	3.86	3.84	0.02
P5	0	0	0	0.00716	0	0.00716
P6	1.3	1.29	0.0155	1.31	1.29	0.02
P7	0	0	0	0.000604	0	0.000604
P8	2.22	2.22	0.0052	2.24	2.22	0.02
P9	0	0	0	0.02	0	0.02
P10	2.66	2.08	0.575	2.1	2.08	0.02
P11	0	0	0	0.0104	0	0.0104
P12	3.4	3.4	0	3.4	3.4	0
P13	0	0	0	0.00937	0	0.00937
P14	3.87	3.87	0	3.87	3.87	0
P15	0	0	0	0.0174	0	0.0174
P16	3	2.99	0.0113	3.01	2.99	0.02
P17	0	0	0	0	0	0
P18	4.19	4.19	0	4.21	4.19	0.02
P19	0	0	0	0.00522	0	0.00522
P20	2.71	2.71	0	2.73	2.71	0.02
P21	0	0	0	0.02	0	0.02
P22	4.97	4.97	0	4.97	4.97	0
P23	0	0	0	0.0107	0	0.0107
P24	3.42	3.42	0	3.42	3.42	0
P25	0.00798	0	0.00798	0.00798	0	0.00798
P26	2.52	2.52	0	2.54	2.52	0.02
P27	0	0	0	0.02	0	0.02
P28	4.26	4.26	0	4.28	4.26	0.02
P29	0	0	0	0.02	0	0.02
P30	2.66	2.27	0.386	2.29	2.27	0.02
minimum			0			0
maximum			0.575			0.02

TAB. N.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 7

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$			$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$		
CPU	66			73		
Coût total du réseau	41868			67119.3		
Risque total du réseau	330342			193278		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.02	0	0.02
P2	5.89	5.27	0.616	5.29	5.27	0.02
P3	3.03	0	3.03	0.02	0	0.02
P4	6.32	3.84	2.49	3.86	3.84	0.02
P5	4.2	0	4.2	0.02	0	0.02
P6	2.25	1.29	0.963	1.31	1.29	0.02
P7	0.63	0	0.63	0.02	0	0.02
P8	2.22	2.22	0	2.24	2.22	0.02
P9	0.243	0	0.243	0.02	0	0.02
P10	3.2	2.08	1.12	2.1	2.08	0.02
P11	0.622	0	0.622	0.02	0	0.02
P12	3.45	3.4	0.0469	3.42	3.4	0.02
P13	0.0315	0	0.0315	0.02	0	0.02
P14	7.07	3.87	3.2	3.89	3.87	0.02
P15	5.33	0	5.33	0.02	0	0.02
P16	3.08	2.99	0.0883	3.01	2.99	0.02
P17	0.713	0	0.713	0.02	0	0.02
P18	5.4	4.19	1.22	4.21	4.19	0.02
P19	1.11	0	1.11	0.02	0	0.02
P20	6.52	2.71	3.81	2.73	2.71	0.02
P21	0	0	0	0.02	0	0.02
P22	5.42	4.97	0.449	4.99	4.97	0.02
P23	0	0	0	0.02	0	0.02
P24	3.63	3.42	0.2	3.44	3.42	0.02
P25	0.325	0	0.325	0.02	0	0.02
P26	2.73	2.52	0.215	2.54	2.52	0.02
P27	0.035	0	0.035	0.02	0	0.02
P28	4.26	4.26	0	4.28	4.26	0.02
P29	0.0469	0	0.0469	0.02	0	0.02
P30	3.07	2.27	0.8	2.29	2.27	0.02
minimum			0			0.02
maximum			5.33			0.02

TAB. N.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 7

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$			$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$		
CPU	65			74		
Coût total du réseau	58123			67241.8		
Risque total du réseau	196148			193106		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.02	0	0.02
P2	5.36	5.27	0.0871	5.29	5.27	0.02
P3	0.162	0	0.162	0.02	0	0.02
P4	3.91	3.84	0.0727	3.86	3.84	0.02
P5	0.00486	0	0.00486	0.02	0	0.02
P6	1.41	1.29	0.127	1.31	1.29	0.02
P7	0.0264	0	0.0264	0.00756	0	0.00756
P8	2.24	2.22	0.0187	2.24	2.22	0.02
P9	0.0818	0	0.0818	0.02	0	0.02
P10	2.96	2.08	0.877	2.1	2.08	0.02
P11	0.0598	0	0.0598	0.02	0	0.02
P12	3.41	3.4	0.00447	3.42	3.4	0.02
P13	0.00582	0	0.00582	0.02	0	0.02
P14	3.87	3.87	0	3.89	3.87	0.02
P15	0.207	0	0.207	0.02	0	0.02
P16	3.01	2.99	0.0252	3.01	2.99	0.02
P17	0.00137	0	0.00137	0.02	0	0.02
P18	4.21	4.19	0.0198	4.21	4.19	0.02
P19	0.0454	0	0.0454	0.02	0	0.02
P20	2.87	2.71	0.154	2.73	2.71	0.02
P21	0.0607	0	0.0607	0.02	0	0.02
P22	4.97	4.97	0	4.98	4.97	0.00515
P23	0.00652	0	0.00652	0.02	0	0.02
P24	3.42	3.42	0	3.42	3.42	0
P25	0.00626	0	0.00626	0.02	0	0.02
P26	2.53	2.52	0.0171	2.54	2.52	0.02
P27	0.0509	0	0.0509	0.02	0	0.02
P28	4.26	4.26	0	4.28	4.26	0.02
P29	0.0836	0	0.0836	0.02	0	0.02
P30	3.94	2.27	1.67	2.29	2.27	0.02
minimum			0			0
maximum			1.67			0.02

TAB. N.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 7

Annexe O

Graphes du problème 7

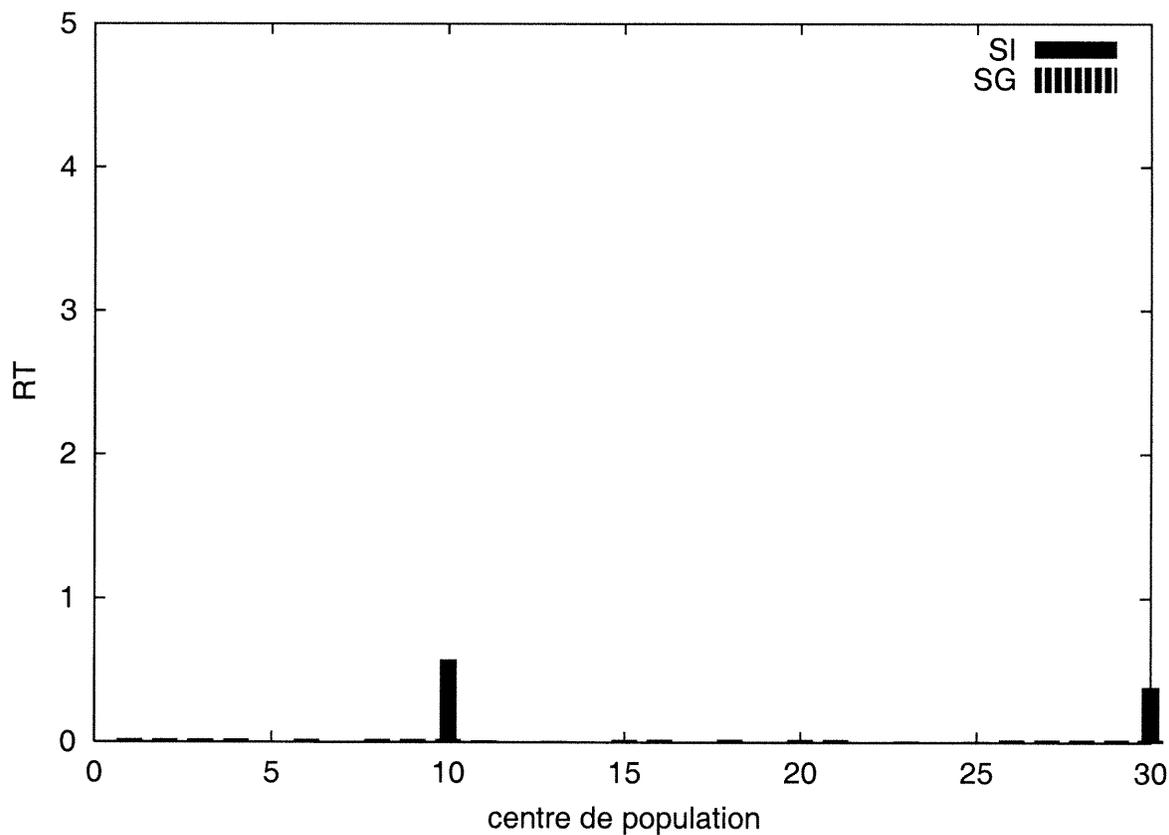


FIG. O.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 7 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2=0$)

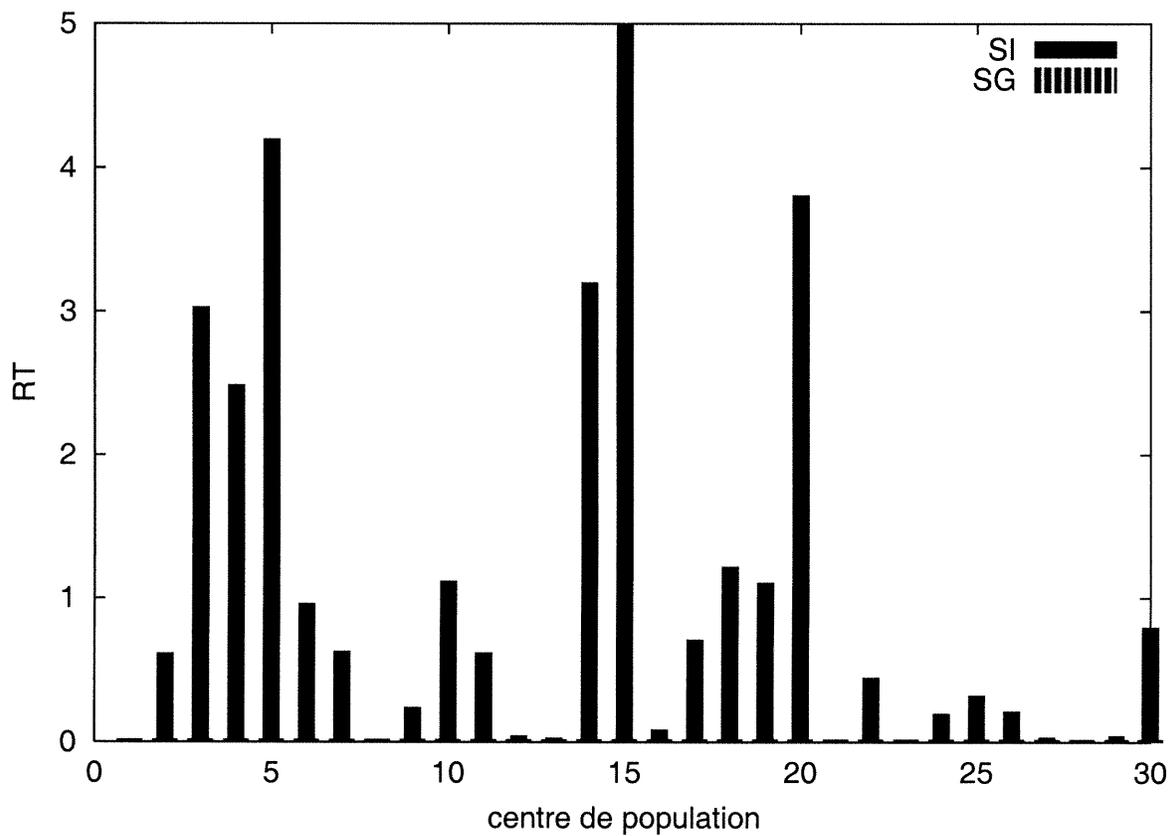


FIG. O.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 7 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)

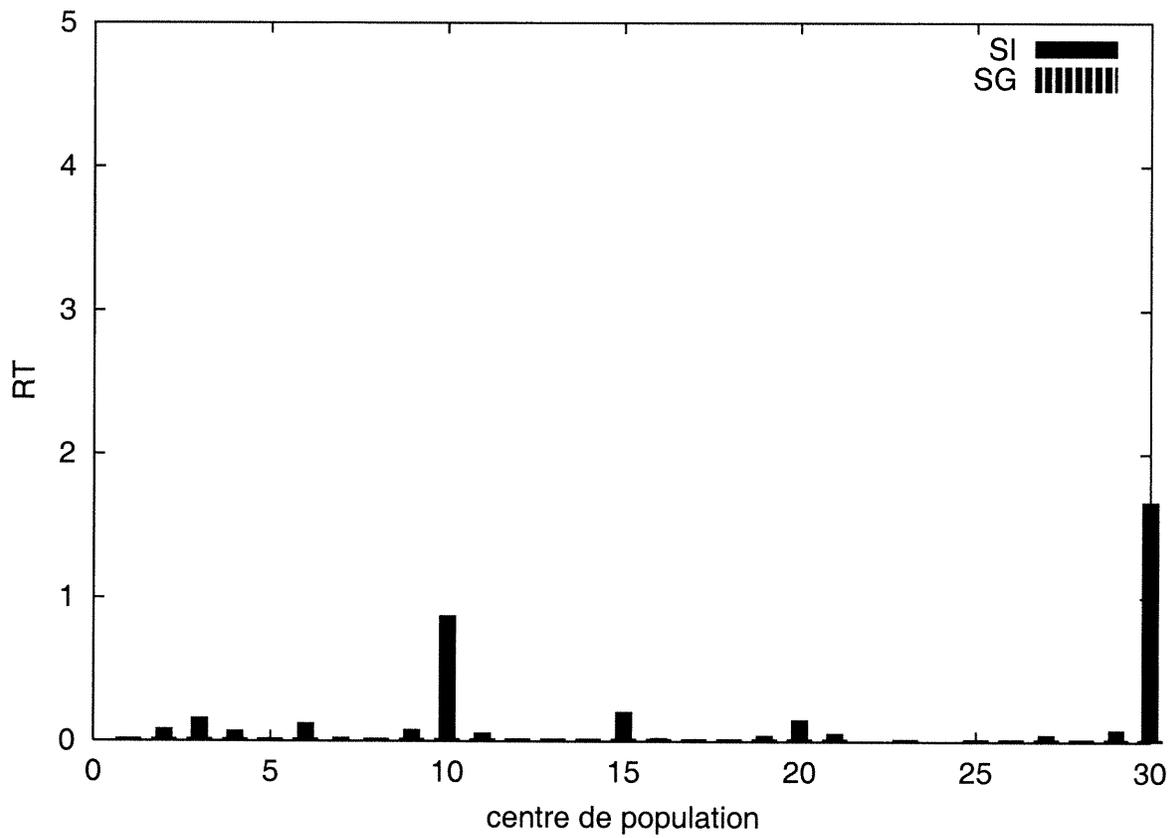


FIG. O.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 7 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

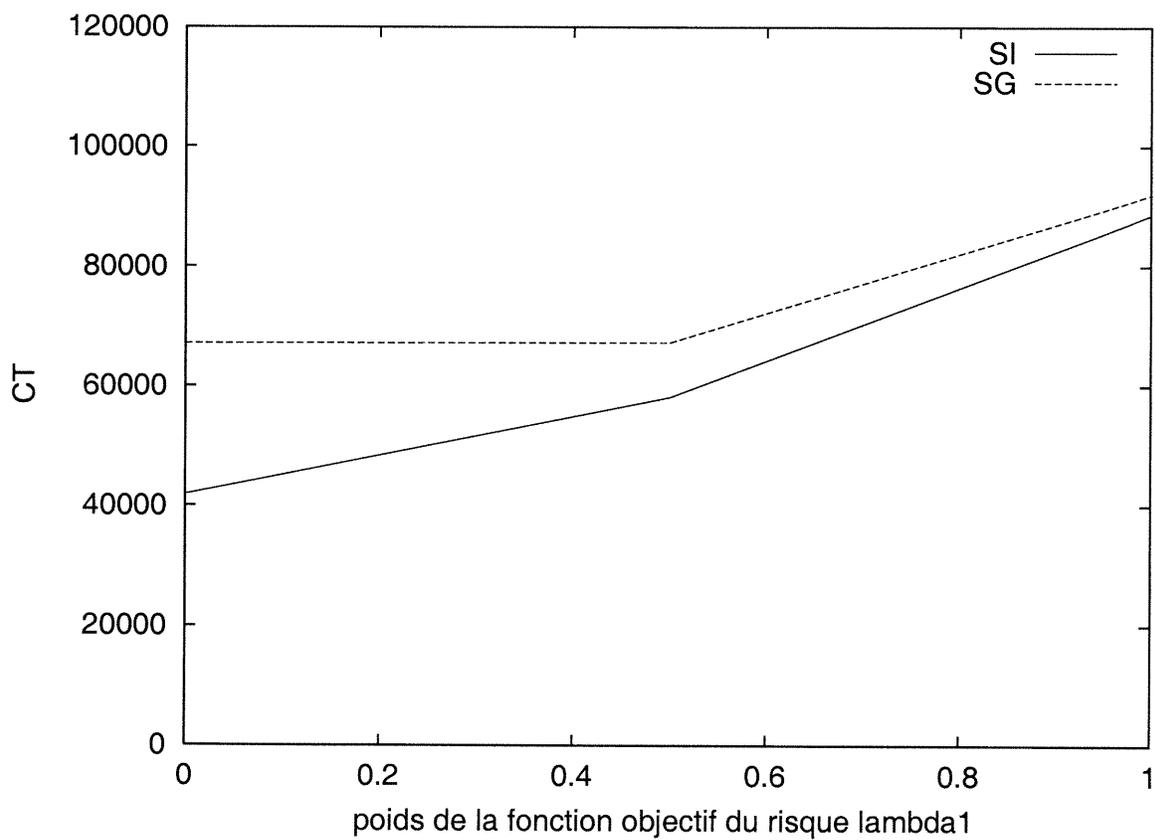


FIG. O.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 7

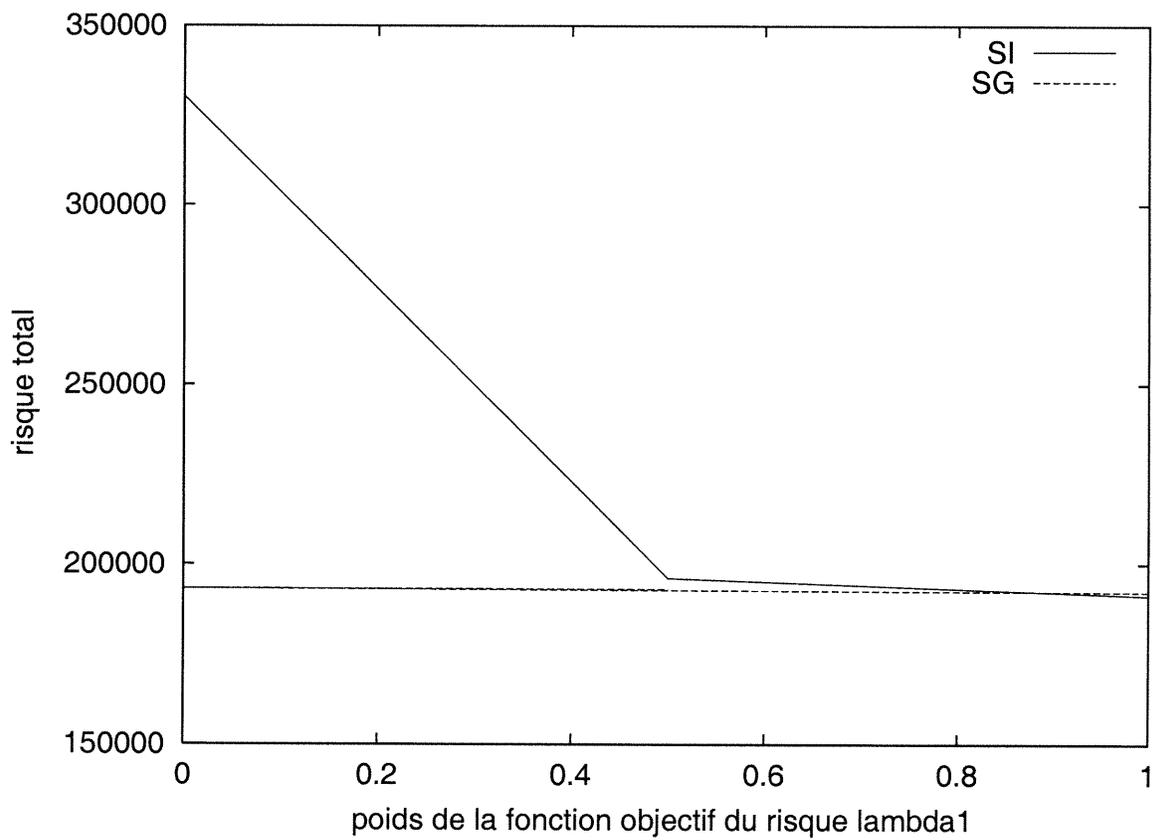


FIG. O.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 7

Annexe P

Résultats du problème 8

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$			$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$		
CPU	19			21		
Coût total du réseau	54577			52997.8		
Risque total du réseau	62175.3			65695		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.03	0	0.03
P2	1.6	1.57	0.0244	1.58	1.57	0.00467
P3	0.0179	0	0.0179	0.03	0	0.03
P4	1.25	1.11	0.137	1.14	1.11	0.03
P5	0	0	0	0.03	0	0.03
P6	1.45	1.45	0	1.48	1.45	0.03
P7	0	0	0	0.03	0	0.03
P8	0.619	0.619	0	0.649	0.619	0.03
P9	0	0	0	0.03	0	0.03
P10	1.69	1.69	0	1.72	1.69	0.03
P11	0	0	0	0.03	0	0.03
P12	0.271	0	0.271	0.03	0	0.03
P13	0	0	0	0.03	0	0.03
P14	0	0	0	0.00715	0	0.00715
P15	0	0	0	0.03	0	0.03
P16	0	0	0	0.03	0	0.03
P17	0	0	0	0.03	0	0.03
P18	0	0	0	0.03	0	0.03
P19	0	0	0	0.0172	0	0.0172
P20	0.777	0.777	0	0.807	0.777	0.03
P21	0	0	0	0.0256	0	0.0256
P22	1.04	1.04	0	1.07	1.04	0.0263
P23	0	0	0	0.03	0	0.03
P24	0.994	0.994	0	1.02	0.994	0.03
P25	0	0	0	0.00476	0	0.00476
P26	0	0	0	0.03	0	0.03
P27	0	0	0	0.0182	0	0.0182
P28	1.14	1.14	0	1.17	1.14	0.03
P29	0	0	0	0.03	0	0.03
P30	1.22	1.22	0	1.25	1.22	0.03
minimum			0			0.00467
maximum			0.271			0.03

TAB. P.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 8

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$			$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$		
CPU	20			22		
Coût total du réseau	24658			40160.1		
Risque total du réseau	93141.9			66461.8		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0.106	0	0.106	0.03	0	0.03
P2	1.68	1.57	0.105	1.6	1.57	0.03
P3	1.52	0	1.52	0.03	0	0.03
P4	1.21	1.11	0.104	1.14	1.11	0.03
P5	0	0	0	0.03	0	0.03
P6	1.57	1.45	0.119	1.48	1.45	0.03
P7	0.712	0	0.712	0.03	0	0.03
P8	0.648	0.619	0.0287	0.649	0.619	0.03
P9	0.259	0	0.259	0.03	0	0.03
P10	1.69	1.69	0	1.72	1.69	0.03
P11	0.218	0	0.218	0.03	0	0.03
P12	0.613	0	0.613	0.03	0	0.03
P13	0	0	0	0.03	0	0.03
P14	0	0	0	0.03	0	0.03
P15	0.033	0	0.033	0.03	0	0.03
P16	0.128	0	0.128	0.03	0	0.03
P17	0	0	0	0.03	0	0.03
P18	0.116	0	0.116	0.03	0	0.03
P19	0	0	0	0.03	0	0.03
P20	0.777	0.777	0	0.807	0.777	0.03
P21	0	0	0	0.03	0	0.03
P22	1.28	1.04	0.233	1.07	1.04	0.03
P23	2.65	0	2.65	0.03	0	0.03
P24	1.01	0.994	0.0163	1.02	0.994	0.03
P25	0.461	0	0.461	0.03	0	0.03
P26	0	0	0	0.03	0	0.03
P27	0	0	0	0.03	0	0.03
P28	1.14	1.14	0	1.17	1.14	0.03
P29	0.542	0	0.542	0.03	0	0.03
P30	1.22	1.22	0.00193	1.25	1.22	0.03
minimum			0			0.03
maximum			2.65			0.03

TAB. P.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 8

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$			$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$		
CPU	20			22		
Coût total du réseau	31319			40276.3		
Risque total du réseau	64678.6			66283.7		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	0	0	0	0.03	0	0.03
P2	1.57	1.57	0	1.6	1.57	0.03
P3	0.0124	0	0.0124	0.03	0	0.03
P4	1.11	1.11	0	1.14	1.11	0.03
P5	0	0	0	0.03	0	0.03
P6	1.47	1.45	0.0117	1.48	1.45	0.03
P7	0.0378	0	0.0378	0.03	0	0.03
P8	0.619	0.619	0	0.649	0.619	0.03
P9	0	0	0	0.03	0	0.03
P10	1.69	1.69	0	1.72	1.69	0.03
P11	0	0	0	0.03	0	0.03
P12	1.64	0	1.64	0.03	0	0.03
P13	0.00554	0	0.00554	0.03	0	0.03
P14	0	0	0	0.0124	0	0.0124
P15	0.00875	0	0.00875	0.03	0	0.03
P16	0.012	0	0.012	0.03	0	0.03
P17	0.000677	0	0.000677	0.03	0	0.03
P18	0.116	0	0.116	0.03	0	0.03
P19	0.00186	0	0.00186	0.03	0	0.03
P20	0.777	0.777	0	0.807	0.777	0.03
P21	0.0501	0	0.0501	0.03	0	0.03
P22	1.04	1.04	0	1.07	1.04	0.0279
P23	0.583	0	0.583	0.03	0	0.03
P24	1.06	0.994	0.0668	1.02	0.994	0.03
P25	0	0	0	0.03	0	0.03
P26	0.00134	0	0.00134	0.03	0	0.03
P27	0	0	0	0.03	0	0.03
P28	1.14	1.14	0	1.17	1.14	0.03
P29	0	0	0	0.03	0	0.03
P30	1.22	1.22	0	1.25	1.22	0.03
minimum			0			0.0124
maximum			1.64			0.03

TAB. P.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 8

Annexe Q

Graphes du problème 8

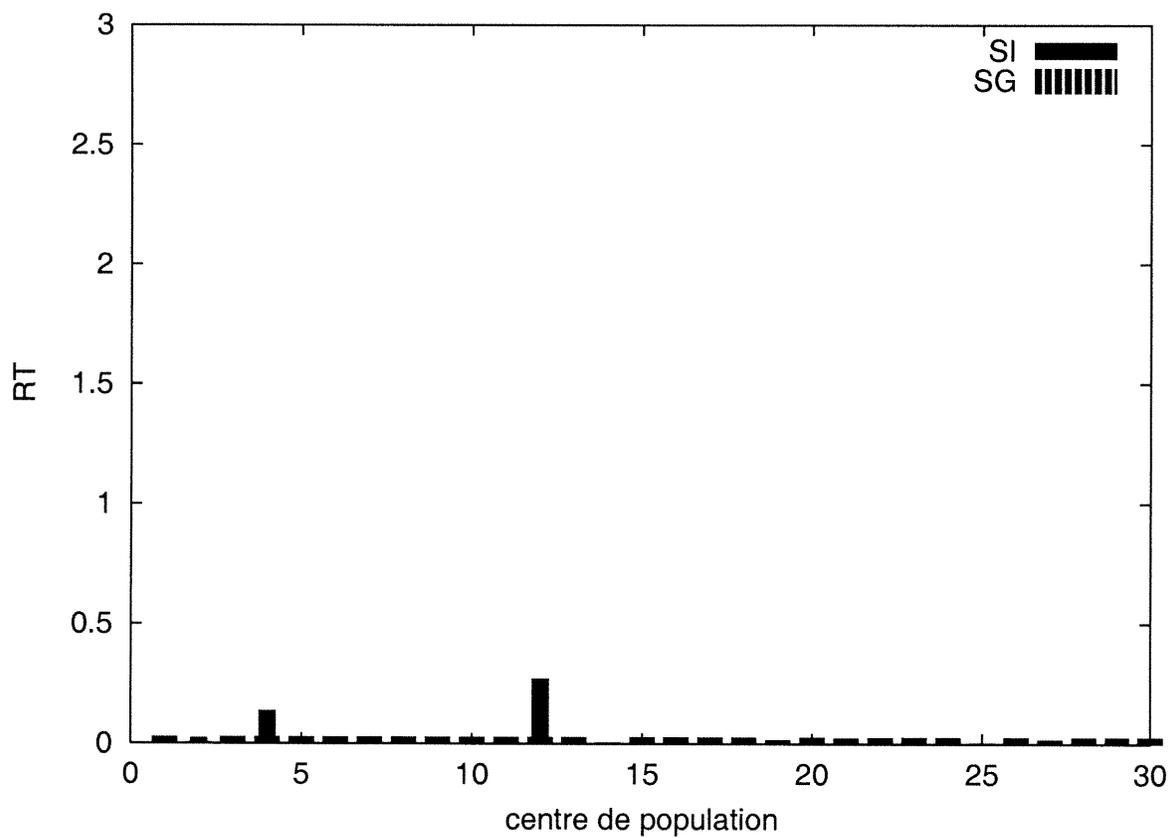


FIG. Q.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 8 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)

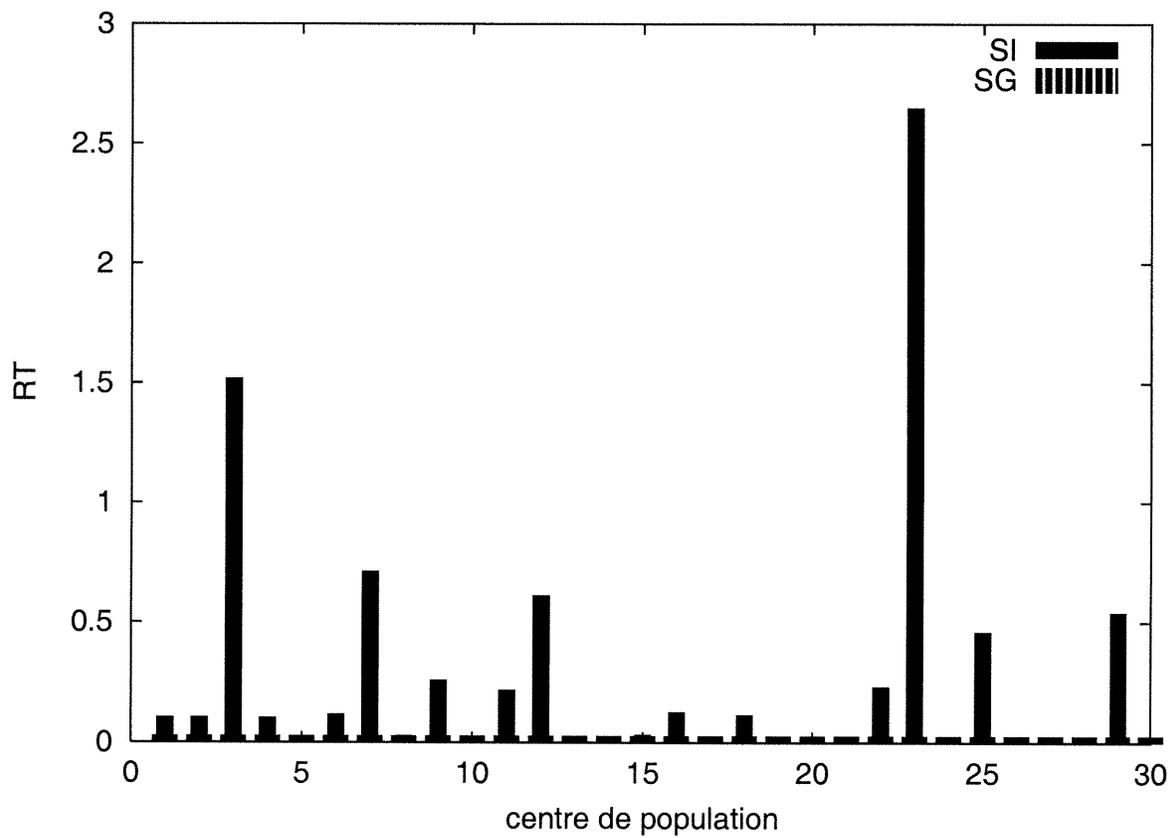


FIG. Q.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 8 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2=1$)

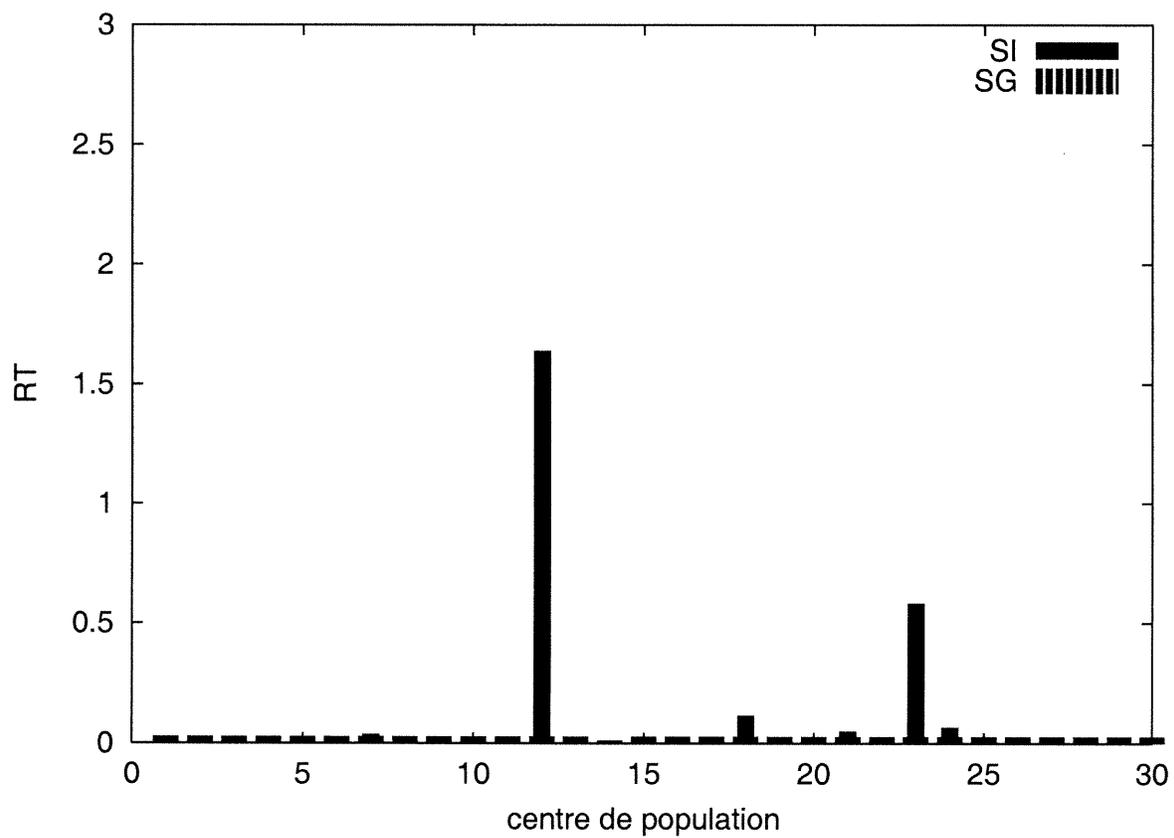


FIG. Q.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 8 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

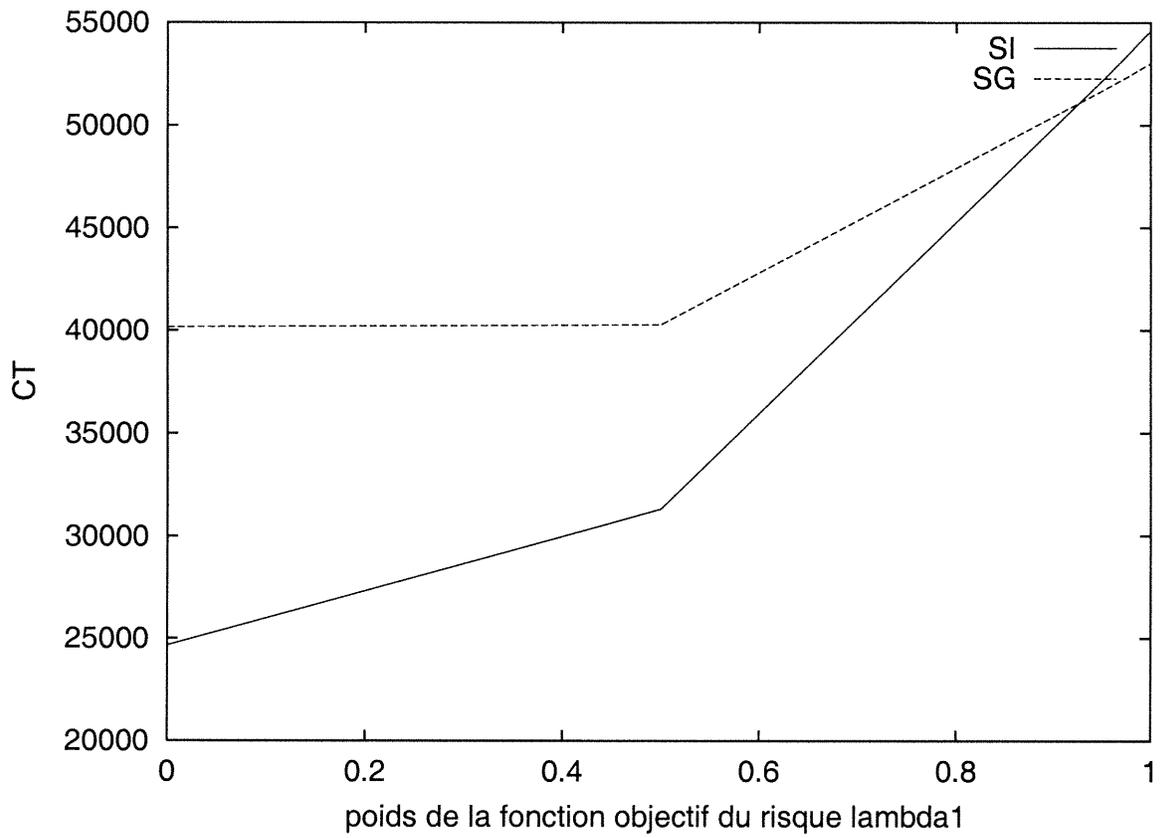


FIG. Q.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 8

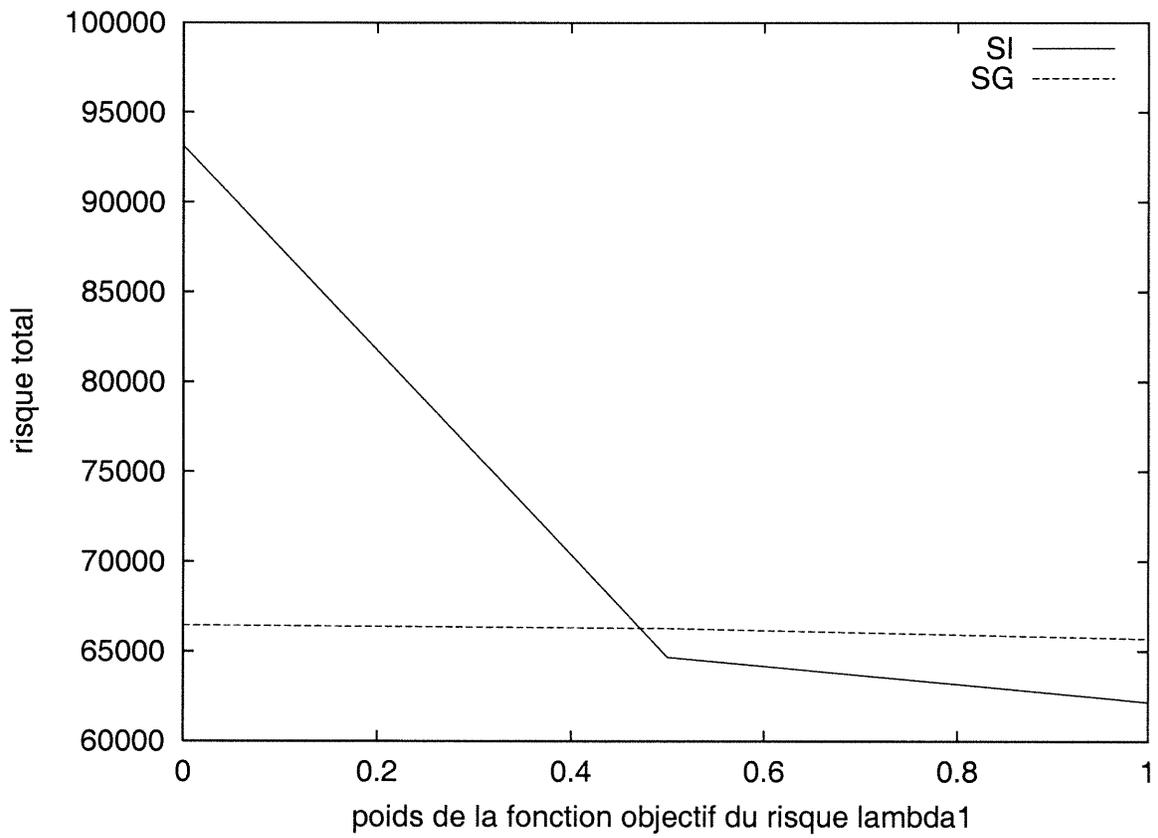


FIG. Q.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 8

Annexe R

Résultats du problème 11

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$			$(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$		
CPU	184			192		
Coût total du réseau	62833			65592.6		
Risque total du réseau	128354			131454		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	1.25	1.23	0.0181	1.25	1.23	0.0181
P2	1.36	1.24	0.12	1.43	1.24	0.19
P3	0.99	0.971	0.0196	1.16	0.971	0.19
P4	1.66	1.63	0.0279	1.82	1.63	0.19
P5	2.17	1.51	0.659	1.7	1.51	0.19
P6	1.01	1.01	0.00395	1.06	1.01	0.0508
P7	1.57	1.3	0.275	1.49	1.3	0.19
P8	1.21	1.21	0	1.21	1.21	0.00641
P9	1.48	1.38	0.101	1.57	1.38	0.19
P10	0.878	0.843	0.0348	0.995	0.843	0.153
P11	0.924	0.696	0.228	0.886	0.696	0.19
P12	1.6	1.36	0.239	1.55	1.36	0.19
P13	1.15	1.05	0.0993	1.24	1.05	0.19
P14	1.16	0.614	0.544	0.804	0.614	0.19
P15	1.49	1.46	0.0364	1.65	1.46	0.19
P16	3.71	1.12	2.58	1.31	1.12	0.19
P17	1.27	1.27	0.000642	1.27	1.27	0.00435
P18	0.777	0.776	0.00148	0.966	0.776	0.19
P19	1.02	0.996	0.024	1.03	0.996	0.0357
P20	1.06	1.04	0.0117	1.07	1.04	0.0265
minimum			0			0.00435
maximum			2.58			0.19

TAB. R.1 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0)$ du problème 11

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$			$(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$		
CPU	187			194		
Coût total du réseau	32686			53067.7		
Risque total du réseau	254537			139921		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	2.46	1.23	1.23	1.42	1.23	0.19
P2	3.06	1.24	1.82	1.43	1.24	0.19
P3	2.21	0.971	1.24	1.16	0.971	0.19
P4	2.13	1.63	0.497	1.82	1.63	0.19
P5	1.51	1.51	0	1.7	1.51	0.19
P6	1.4	1.01	0.395	1.2	1.01	0.19
P7	2.39	1.3	1.09	1.49	1.3	0.19
P8	1.75	1.21	0.54	1.4	1.21	0.19
P9	1.75	1.38	0.371	1.57	1.38	0.19
P10	2.15	0.843	1.31	1.03	0.843	0.19
P11	2.22	0.696	1.52	0.886	0.696	0.19
P12	2.03	1.36	0.67	1.55	1.36	0.19
P13	1.37	1.05	0.319	1.24	1.05	0.19
P14	1.54	0.614	0.93	0.804	0.614	0.19
P15	3.43	1.46	1.98	1.65	1.46	0.19
P16	3.25	1.12	2.12	1.31	1.12	0.19
P17	1.48	1.27	0.214	1.46	1.27	0.19
P18	2.64	0.776	1.87	0.966	0.776	0.19
P19	1.32	0.996	0.322	1.19	0.996	0.19
P20	5.01	1.04	3.96	1.23	1.04	0.19
minimum			0			0.19
maximum			3.96			0.19

TAB. R.2 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1)$ du problème 11

Type de sélection	individuelle			globale avec équité		
$(\lambda_1 \text{ du risque}, \lambda_2 \text{ du coût})$	$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$			$(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$		
CPU	186			193		
Coût total du réseau	49822			56269.1		
Risque total du réseau	132358			134290		
Centre de population	RIT	RE	RT	RIT	RE	RT
P1	1.24	1.23	0.0113	1.25	1.23	0.0181
P2	1.36	1.24	0.119	1.43	1.24	0.19
P3	1.14	0.971	0.17	1.16	0.971	0.19
P4	1.78	1.63	0.152	1.82	1.63	0.19
P5	2.15	1.51	0.643	1.7	1.51	0.19
P6	1.03	1.01	0.0232	1.08	1.01	0.0701
P7	1.75	1.3	0.451	1.49	1.3	0.19
P8	1.21	1.21	0.00641	1.21	1.21	0.00641
P9	1.53	1.38	0.15	1.57	1.38	0.19
P10	0.9	0.843	0.0571	1.03	0.843	0.19
P11	0.944	0.696	0.249	0.886	0.696	0.19
P12	1.61	1.36	0.249	1.55	1.36	0.19
P13	1.11	1.05	0.0548	1.24	1.05	0.19
P14	1.2	0.614	0.585	0.804	0.614	0.19
P15	1.58	1.46	0.126	1.65	1.46	0.19
P16	3.36	1.12	2.24	1.31	1.12	0.19
P17	1.27	1.27	0.00435	1.32	1.27	0.0458
P18	0.903	0.776	0.128	0.966	0.776	0.19
P19	0.996	0.996	0	1.09	0.996	0.0895
P20	1.13	1.04	0.0865	1.23	1.04	0.19
minimum			0			0.00641
maximum			2.24			0.19

TAB. R.3 – Les résultats obtenus avec $(\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.5)$ du problème 11

Annexe S

Graphes du problème 11

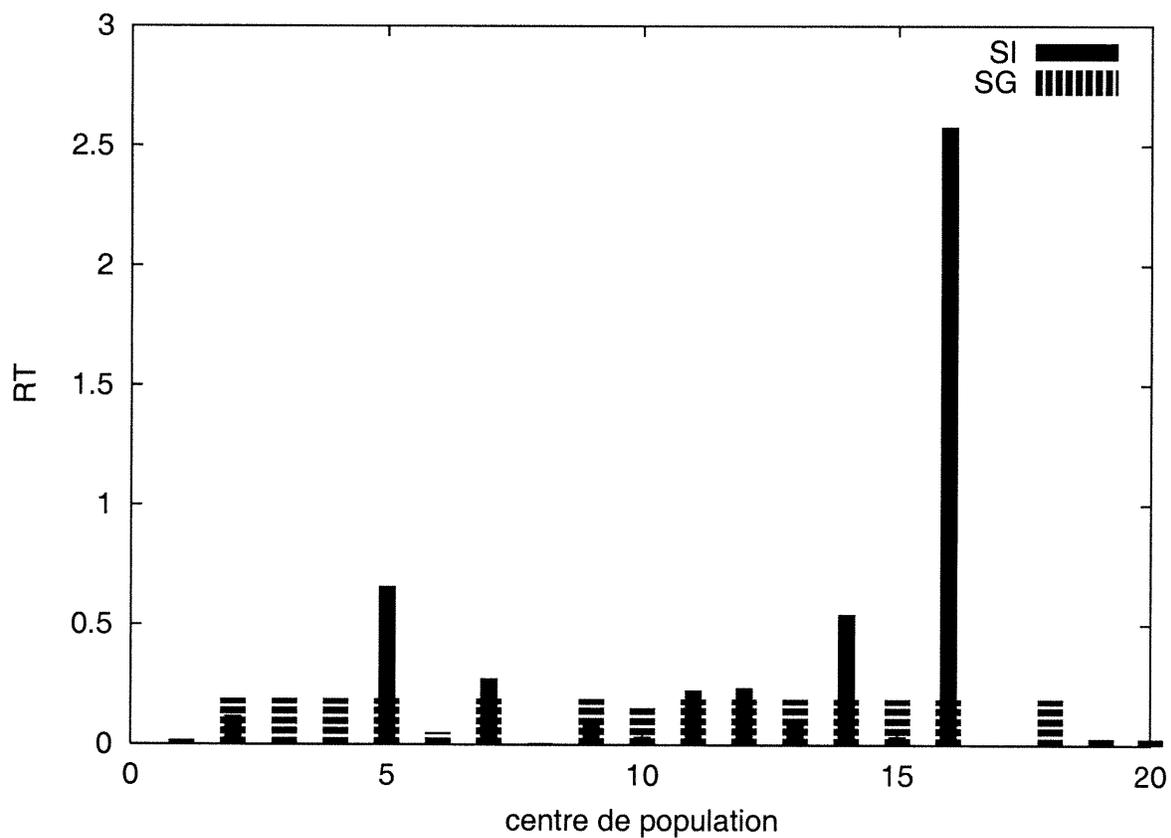


FIG. S.1 – Distribution du risque dû au transport du problème 11 ($\lambda_1=1$, $\lambda_2 =0$)

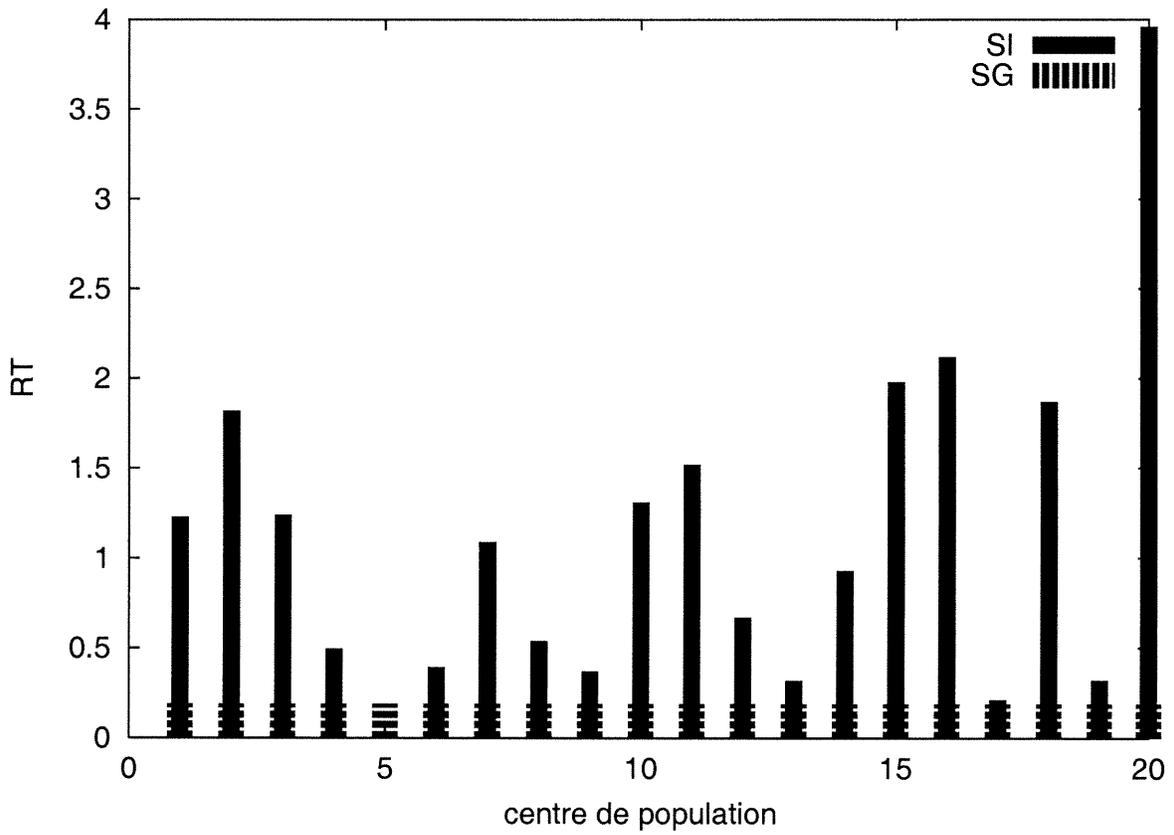


FIG. S.2 – Distribution du risque dû au transport du problème 11 ($\lambda_1=0$, $\lambda_2 =1$)

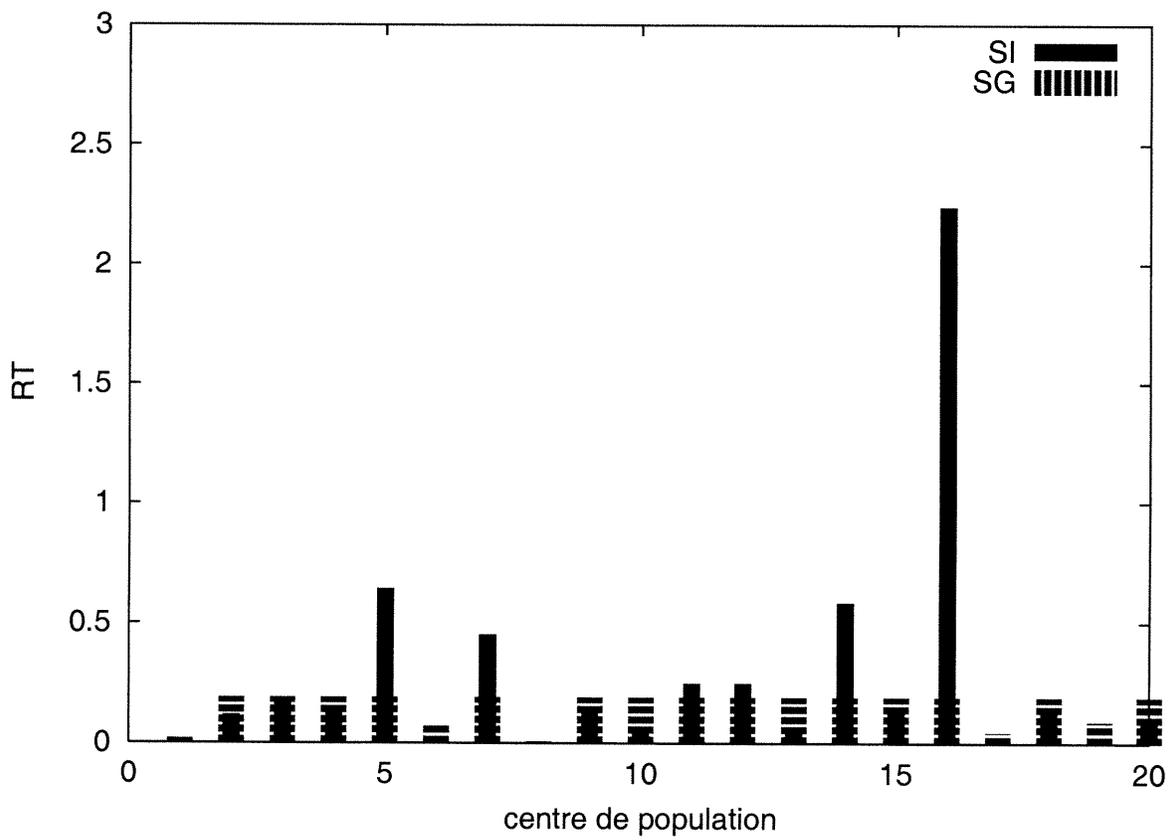


FIG. S.3 – Distribution du risque dû au transport du problème 11 ($\lambda_1=0.5$, $\lambda_2 =0.5$)

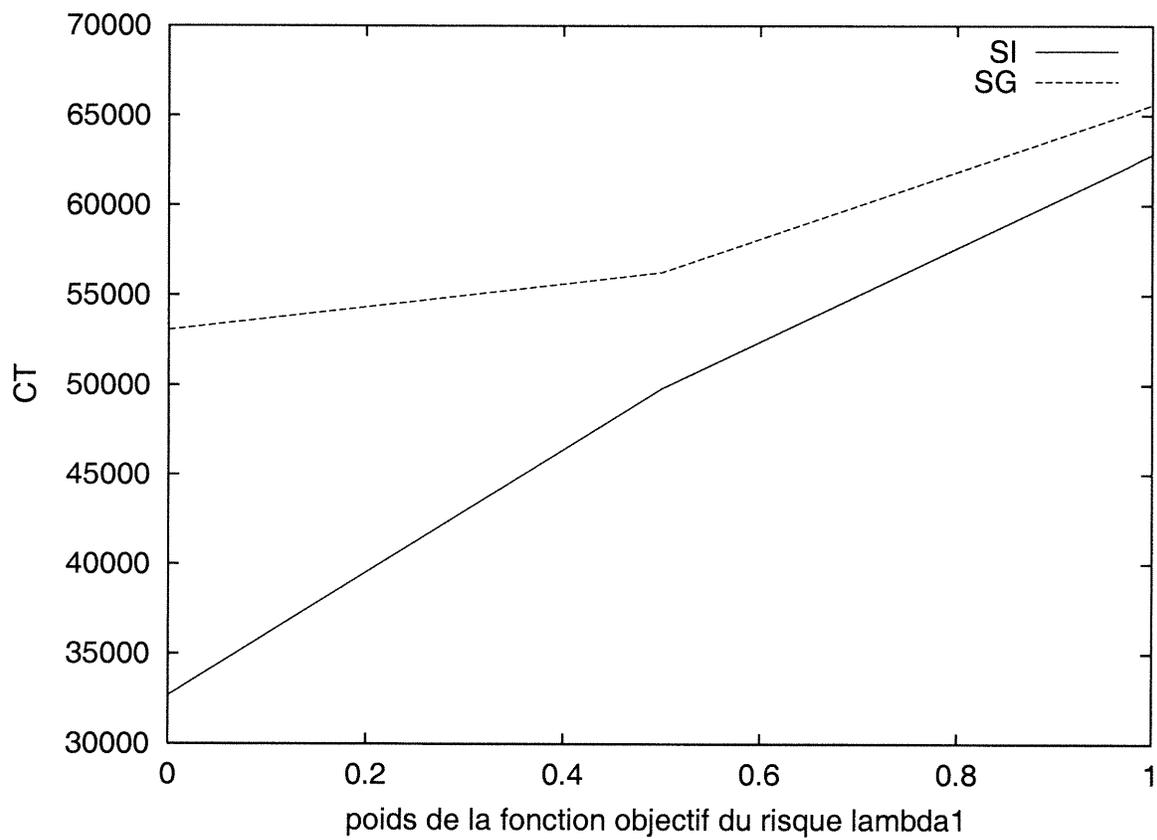


FIG. S.4 – Distribution de l'objectif du coût en fonction de λ_1 du problème 11

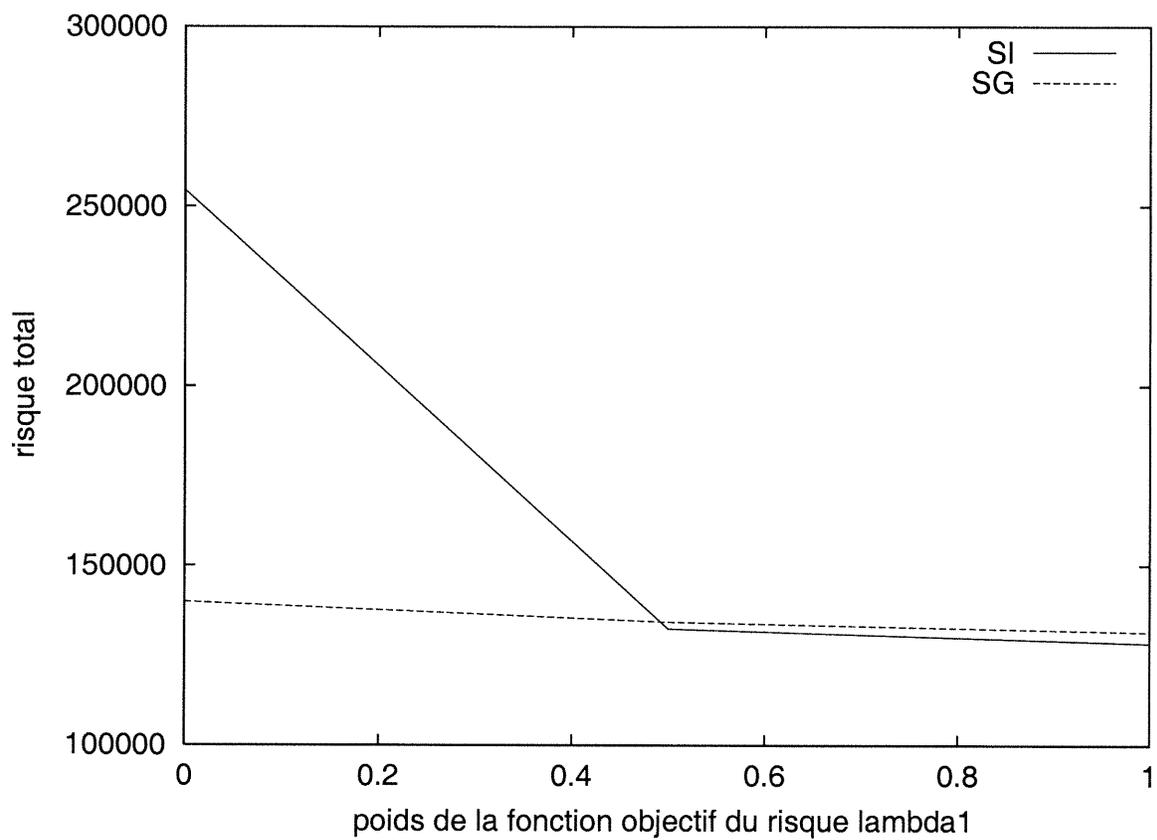


FIG. S.5 – Distribution de l'objectif du risque en fonction de λ_1 du problème 11