

CAHIER DU LAMSADE

Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision
(Université de Paris-Dauphine)
Unité Associée au CNRS n° 825

MÉTHODE MULTICRITÈRE DE CHOIX D'UN EMPLACEMENT : LE CAS D'UN AÉROPORT DANS LE NOUVEAU QUÉBEC ¹

CAHIER N° 104
mars 1991

J.M. MARTEL ²
B. AOUNI ²

Reçu : septembre 1990.

¹ Cette recherche a été partiellement subventionnée par le Conseil de Recherche en Sciences Humaines du Canada et le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie du Canada. Nous tenons à remercier sincèrement le Professeur Roy pour les commentaires fort judicieux qu'il a faits à l'un des auteurs lors de son séjour au LAMSADE ainsi qu'à Madame Dominique Champ-Brunet pour son aide précieuse à notre recherche bibliographique.

² Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, Cité Universitaire, Ste-Foy (Québec), G1K-7P4, Canada.

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Pages</u>
Abstract	i
Résumé	i
1. Introduction	1
2. Description du cas étudié	3
3. Définition des attributs	7
4. La méthode multicritère développée	13
5. Résolution du cas étudié	18
6. Conclusion	30
Bibliographie	31
Annexe A : Attributs (critères) utilisés dans diverses études	33
Annexe B : Fonction "types" de satisfaction	34

MULTICRITERIA METHOD FOR AIRPORT SITE SELECTION : THE CASE OF AN AIRPORT IN NEW QUEBEC

Abstract

The important aerien trafic demand involves the construction of the new airports. The site selection for these airports involves many incommensurable and conflictual objectives as : minimize the construction and total cost, minimize the noisy for the nearest community, minimize the site access time, have an adequat capacity to satisfy the demand, ... Many algorithms have been developed and proposed to solve the site selection problem. After that we will present a brief review of goals according to each attribute. The notion of generalized criterion introduced in the PROMETHEE outranking method will be used.

This concept will lead the decision maker to build satisfaction functions for every observed deviations from the fixed goals. This method will be used as a technique to select a site for the construction of an airport in the New Québec.

Keywords : Multicriteria analysis, preference structure, airport localisation.

MÉTHODE MULTICRITÉRE DE CHOIX D'UN EMPLACEMENT : LE CAS D'UN AÉROPORT DANS LE NOUVEAU QUÉBEC

Résumé

La forte croissance de la demande du trafic aérien nécessite constamment la construction de nouveaux aéroports. Le choix de leur emplacement met en jeu divers objectifs non commensurables et conflictuels tels que : minimiser les coûts totaux, minimiser le bruit, minimiser le temps d'accès, fournir une capacité adéquate pour satisfaire la demande, ... Plusieurs approches monocritères et multicritères ont déjà été proposées pour résoudre des problèmes de localisation.

Après une brève revue commentée de ces diverses approches, nous développons une méthode basée sur la fixation de buts sur chaque attribut et sur l'utilisation du concept du critère généralisé introduit dans PROMETHEE. Ce concept conduit à la construction de fonctions de satisfaction pour les écarts observés aux buts fixés. Nous présentons l'utilisation de cette méthode pour aider un groupe d'étude à choisir l'emplacement pour la construction d'un aéroport dans le Nouveau Québec.

Mots-clés : Analyse multicritère, structure de préférence, localisation d'un aéroport.

1. INTRODUCTION

Le problème de localisation a occupé une grande place dans la littérature portant sur la prise de décision durant les dernières décennies. Ainsi une panoplie de modèles ont été développés et appliqués pour la localisation de centres de services tels que: une librairie, un service d'urgence, un hôpital, un aéroport, une grande école, une usine d'épuration, un entrepôt de produits toxiques, des centrales nucléaires, etc.

Pour faciliter la revue de l'abondante littérature sur les modèles de localisation, diverses classifications de ces modèles ont été proposées. Reville et al. [1981] identifient deux types de problèmes de localisation: ceux centrés sur les biens et matériaux (usine, entrepôt, site d'enfouissement,...) et ceux centrés sur les clients-utilisateurs (hôpital, école, aéroport,...). Ils identifient également deux classes de techniques: celles générant des ensembles efficaces et celles basées sur les préférences.

Erkut et Newman [1989], quant à eux, distinguent la localisation d'installations désirables et non désirables. Selon le cas, un modèle cherchant à minimiser ou à maximiser une fonction de distance sera approprié. Ils distinguent également entre les problèmes de localisation d'une simple installation et les localisations d'installations multiples où les interrelations spatiales sont plus importantes.

La majorité des modèles et heuristiques proposés pour les problèmes de localisation appartiennent au paradigme monocritère (Barda [1987]). La majorité des modèles appartenant à ce paradigme conduisent à optimiser une fonction unique: une fonction de distance ou de coût. Les modèles présentés dans l'article de Hansen et al. [1985], par exemple, confirment bien la part importante du monocritère dans l'ensemble des travaux effectués en ce domaine.

Plusieurs auteurs (Schärliig [1973], Buhl [1988], Erkut et Newman [1989], ...) déplorent l'utilisation d'une approche monocritère aux problèmes de localisation qui sont essentiellement de nature multidimensionnelle. La complexité de ces problèmes exige que les

décideurs puissent intégrer dans leurs décisions plusieurs facteurs conflictuels, de nature assez diversifiée et avec des échelles de mesure hétérogènes.

En effet, le choix d'un emplacement nécessite généralement une analyse approfondie des multiples impacts qu'il faut prendre en compte. Ces divers impacts socio-économique, géo-politique, environnemental n'ont toutefois pas la même importance selon la nature de l'installation dont on doit choisir l'emplacement. Par exemple, les impacts socio-économique et politique d'un centre hospitalier ne sont pas les mêmes que pour une centrale nucléaire ou un entrepôt de produits toxiques. Les impacts liés au choix de l'emplacement pour un aéroport près d'une très grande ville (par exemple Mexico) ne sont pas les mêmes que pour un aéroport dans une région isolée (par exemple le Nouveau Québec).

La localisation d'un aéroport consiste généralement à choisir un emplacement, parmi plusieurs emplacements envisageables, qui répond aux exigences du décideur telles que: minimiser les coûts totaux de construction et d'entretien, minimiser l'impact d'incidence sur l'urbanisation et l'agriculture ainsi que l'emploi, minimiser le temps d'accès à l'aéroport, répondre à la demande et à d'autres exigences de nature technique et environnementale. Dans le cadre de nos classifications précédentes, il s'agit d'un problème de localisation d'une simple installation, plutôt désirable bien que partiellement indésirable sous certains aspects écologiques et qui concerne une décision relative à la distribution des clients-utilisateurs. Pour traiter ce problème, nous utilisons une méthode multicritère qui cherche à intégrer les préférences des décideurs (*articulation a priori des préférences selon la classification de Hwang et Masud [1979]*) même si, strictement, il s'agit d'une décision qui relève du pouvoir public.

Dans la section suivante de ce cahier, nous décrivons le cas étudié. La troisième section est consacrée à une présentation de la méthode développée, laquelle passe par la fixation d'un but sur chaque attribut et par l'explicitation de fonctions de satisfaction (*inspirée du concept du critère généralisé introduit dans PROMETHEE, Brans et al. [1984]*) des décideurs. Par la suite, nous utilisons cette méthode pour aider un groupe d'étude à recommander l'emplacement pour construire un aéroport dans le Nouveau Québec.

2. DESCRIPTION DU CAS ETUDIE

Afin de combler le besoin croissant de la communauté Inuit en matière de transport, services, communication,..., le Ministère du Transport du Québec s'est engagé à construire plusieurs aéroports dans le Nouveau Québec. La présence de pergélisol dans les environnements nordiques rend la construction d'aéroport plus difficile. Kangiqsualujjuaq (Port-Nouveau-Québec) est l'une des régions qui a été choisie pour construire un tel aéroport. Kangiqsualujjuaq est situé dans la partie sud-est de la Baie d'Ungava (Figure 1) à la longitude 66° O (Ouest) et à la latitude $58^{\circ} 30'$ N (Nord). La région est caractérisée par une zone de pergélisol discontinu. La température annuelle moyenne de l'air dans la zone habitée environnante est de $-5,6^{\circ}$ C (Gahé et al. [1988]).

Un groupe d'experts, formé de trois chercheurs ayant différentes expériences dans le domaine des études nordiques, a été chargé d'étudier l'environnement nordique et de recommander un emplacement favorable pour la construction de cet aéroport. Les emplacements potentiels se situent dans une vallée glaciaire d'orientation NW-SE (Nord Ouest-Sud Est) et sont entourés de falaises rocheuses. Le soubassement est composé principalement de gneiss granitique. De bas en haut, la stratigraphie des sédiments non consolidés est la suivante: du till (ou moraine glaciaire), des dépôts fluvio-glaciaires, marins et fluviaux. Dans certaines sous-régions spécifiques, quelques-uns de ces éléments stratigraphiques sont absents. On trouve des dépôts de sable et de gravier dans des sédiments fluvioglaciaires et fluviaux alors que le limon argileux apparaît dans un environnement marin. On rencontre du sable humide et sec ainsi que du gravier dans la vallée. Le degré d'humidité des sols dépend de la position de la nappe phréatique par rapport à la surface.

Après des études préliminaires, il est apparu au groupe d'experts que quatre emplacements pourraient potentiellement être envisagés pour localiser le futur aéroport dans cette région. Le choix définitif d'un emplacement pour la construction de cet aéroport doit faire l'objet d'une évaluation multi-critère plus approfondie et systématique. Le groupe d'experts a retenu ces quatre emplacements, situés dans la vallée (figure 2), principalement pour les raisons suivantes:

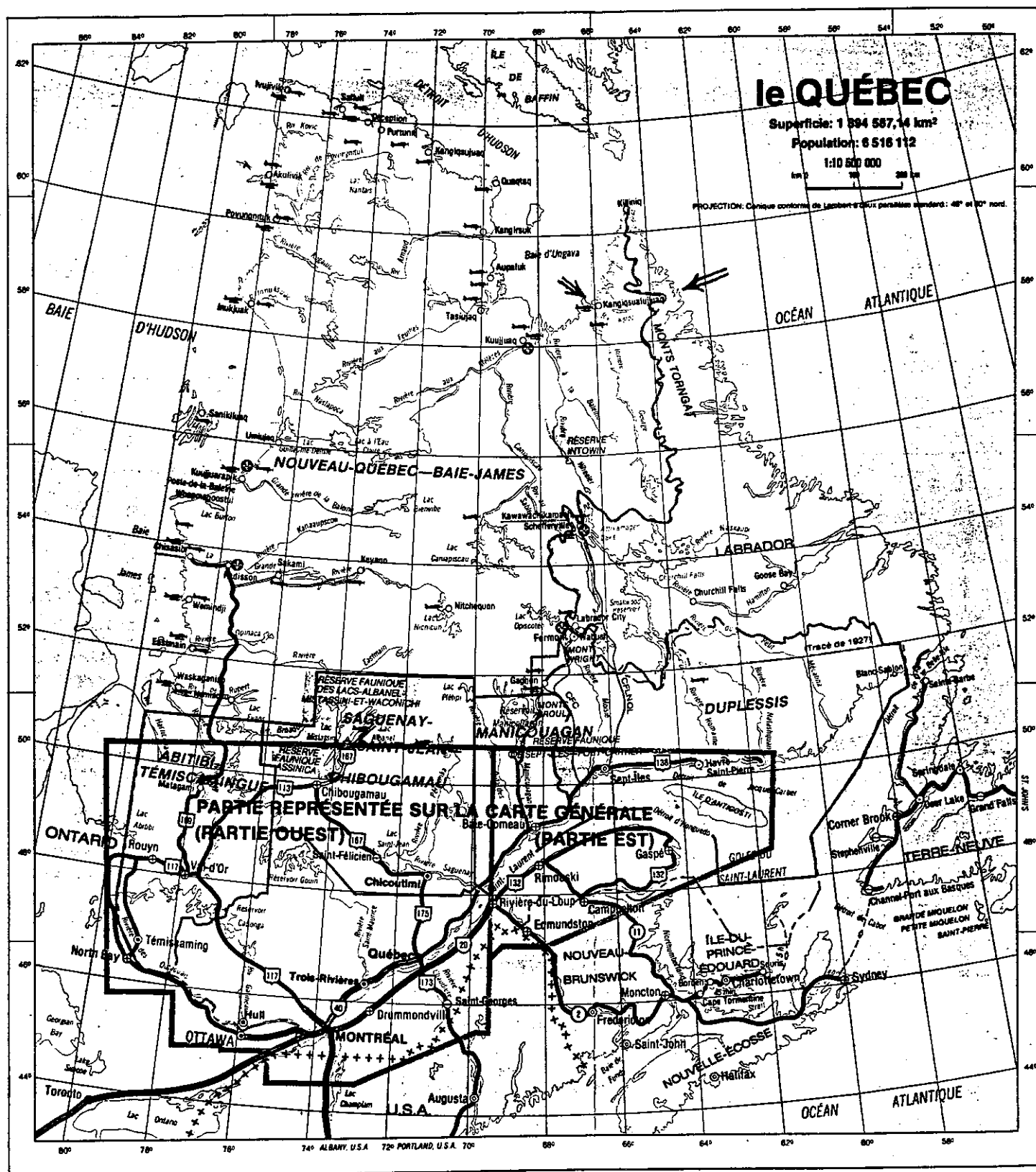


Figure 1: La carte de localisation

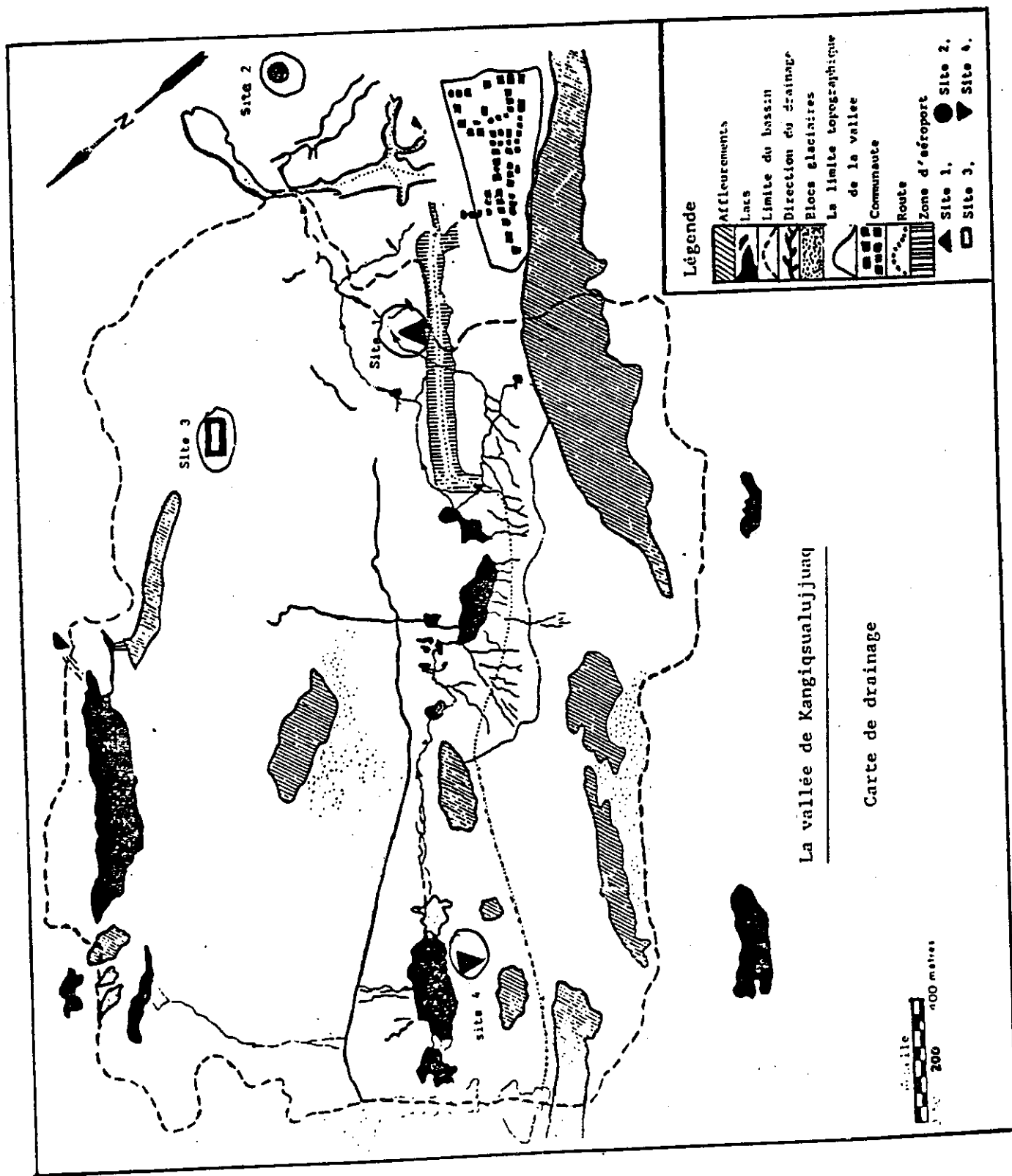


Figure 2: La carte de drainage

- (a) Il y a suffisamment d'espace pour construire un aéroport.
- (b) Leurs sols sont prédominants.
- (c) Les données géophysiques de surface et en profondeur sont disponibles.

En retenant uniquement quatre emplacements dans la région de Kangiqsualujjuaq, le groupe d'experts va bien dans le sens des recommandations de Bruce [1985] à savoir: effectuer un "screening" géographique et ne retenir que quatre à six emplacements pour une étude subséquente plus approfondie.

Les quatre emplacements retenus se distinguent sur plusieurs caractéristiques qui font qu'ils sont attrayants pour des raisons différentes. En fait, ils ont été évalués par le groupe d'experts en fonction de douze attributs. Ces attributs sont: le type de sol, la température du pergélisol, la déviation standard de l'épaisseur du pergélisol, la déviation standard de l'épaisseur de la couche active, l'épaisseur de la couche de neige, la direction des vents, la vitesse des vents, la température de l'air, les inégalités du terrain, l'altitude, la teneur en glace et la distance de l'emplacement par rapport à la zone habitée la plus proche.

Ces attributs, qui portent principalement sur des facteurs climatiques, atmosphériques et géologiques, ont été choisis en raison de leur impact sur les environnements du pergélisol discontinu; ils agissent sur le pergélisol et sur la couche active.

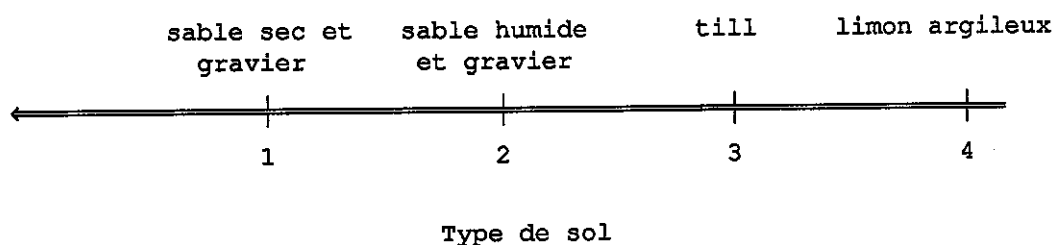
On doit noter que l'évaluation des emplacements selon les attributs a été obtenue à l'aide de divers procédés. Par exemple, la stratification, ainsi que la distribution et la température du pergélisol, ont été obtenues grâce à des procédés géophysiques de surface et de forage (généralement en profondeur).

3. DEFINITION DES ATTRIBUTS

1) Le type de sol (C_1)

Le type de sol est l'un des facteurs les plus importants qui agissent sur la couche active et sur le pergélisol parce que différents sols sont caractérisés par des conductivités thermiques spécifiques.

Il y a quatre types de sol dans la région étudiée. Les types de sol les moins gélifs sont le sable et le gravier. Une échelle relative de 1 à 4 est définie pour les caractériser. La valeur 1 est associée au meilleur type de sol pour la construction d'un aéroport; dans le cas étudié, c'est le sol de type sable sec et gravier.



2) La température du pergélisol (C_2)

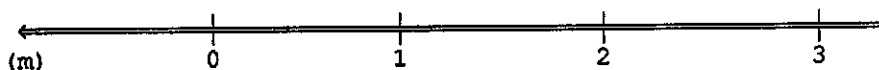
La lecture de la température du pergélisol se fait directement à partir de câbles thermistor profonds et de faible profondeur. Pour le troisième emplacement, dont le type de sol est caractérisé par du till (moraine glaciaire), la température du pergélisol a été obtenue au moyen d'une extrapolation mathématique à partir des lectures de température superficielle dans la couche active. Il faut éviter les zones de pergélisol marginal (0^0 à $1,5^0$ C) parce que des perturbations naturelles ou artificielles, ou les deux, d'un environnement de pergélisol marginal peuvent provoquer sa dégradation. Pour un pergélisol discontinu, une température de -4^0 C est bien acceptable et même idéale pour la construction d'un aéroport dans ce type de région.



Température du pergélisol.

3) La déviation standard du pergélisol (C_3)

Des facteurs reliés aux propriétés mécaniques des sols soumis aux cycles "gel-dégel" affectent l'épaisseur du pergélisol. Un pergélisol plus épais augmente la dureté du sol aussi bien que celle de la fondation sur laquelle sera construit l'aéroport. Une grande variabilité de cette épaisseur entraîne une diminution dans la capacité portante du sol gelé et nuit à la construction aéroportuaire. Afin d'éviter des problèmes après la construction, on recherche donc un emplacement dont la variation dans l'épaisseur du pergélisol soit la plus faible possible.



Déviation standard du pergélisol.

4) La déviation standard de la couche active (C_4)

Celle-ci est fonction du dégel saisonnier. Comme pour l'épaisseur du pergélisol, de petites valeurs de la déviation standard favorisent une augmentation dans la capacité portante du sol. La dureté du sol dans la couche active est favorisée par une bonne épaisseur de sable et de gravier dans cette couche. Par contre, dans l'argile, le limon argileux et la plupart des tills (avec une matrice à grain fin), un minimum d'épaisseur de la couche active est souhaitable.



La déviation standard de la couche active.

5) L'épaisseur de la couche de neige (C_5)

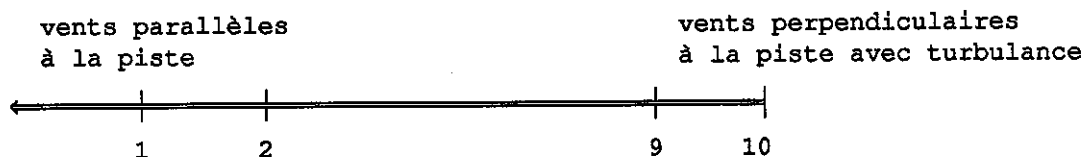
L'épaisseur de la couche de neige affecte la distribution et la température du pergélisol. Une épaisse couche de neige est responsable d'un pergélisol marginal. On observe une faible couche de neige (0-15 cm) dans les régions venteuses situées en altitude, lesquelles sont favorables à la formation de pergélisol à basse température; par conséquent, l'épaisseur moyenne de la couche de neige ne devrait donc pas être trop épaisse. L'épaisseur de la neige a été mesurée avec des jauges à neige sur l'emplacement no.1. Sur les autres emplacements, on a obtenu visuellement une estimation de la couche de neige en faisant une comparaison avec le premier emplacement (épaisseur de la couche de neige en hiver) et l'abrasion éolienne des arbustes en été. Dans cette région, le pergélisol est absent lorsque l'épaisseur de la neige dépasse 80 cm.



Epaisseur de la couche de neige.

6) La direction, la vitesse des vents et la température de l'air (C_6 , C_7 et C_8 respectivement)

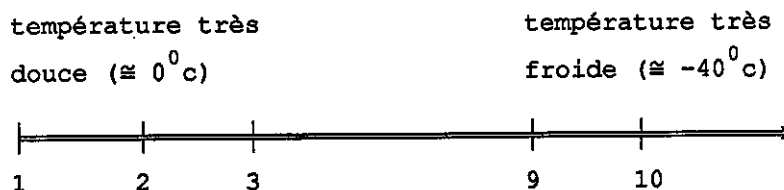
Celles-ci sont enregistrées toutes les heures à la station microclimatique installée au premier emplacement. Pour cette raison, la comparaison de ces trois paramètres avec ceux des autres emplacements a été faite sur une base relative en utilisant une échelle variant entre 1 et 10. Lors du choix d'un emplacement aéroportuaire, la direction et la vitesse des vents doivent être minimisées afin d'éviter les turbulences et les vents contraires (par exemple, la convection des grands vents sur les emplacements no 2 et no 3). Des températures plus froides de l'air favorisent une plus grande distribution et des températures plus basses du pergélisol; par conséquent, l'échelle relative des températures de l'air doit être optimisée dans le sens des plus basses valeurs. Sur le premier emplacement, la température annuelle moyenne de l'air est de $-5,6^{\circ}$ C. Le premier emplacement est le moins venteux en raison de l'abri qu'offrent les hautes falaises rocheuses abruptes entourant la vallée.



La direction des vents.



La vitesse des vents.



La température de l'air.

7) Les inégalités de surface (C_9) et l'altitude (C_{10})

L'altitude affecte le degré d'abritement qu'offre un emplacement spécifique tandis que les inégalités de surface influencent le volume des matériaux géologiques devant être déblayés lors de la construction. Donc, l'altitude et les inégalités doivent être aussi faibles que possible.



Les inégalités de surface.

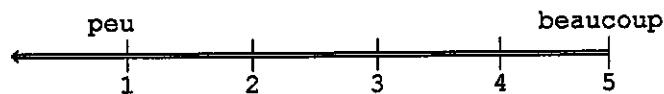


L'altitude.

8) La teneur en glace dans le pergélisol (C_{11})

La teneur en glace dans le pergélisol est un facteur nuisible pour la construction d'un aéroport; ceci est particulièrement vrai lorsque la glace apparaît sous forme de couches et de lentilles. Elles peuvent fondre et entraîner la formation de cavités sous la piste d'atterrissage. Une estimation de la teneur en glace a été obtenue en forant à deux emplacements (emplacements no 1 et no 2). La teneur en glace des deux autres emplacements a été obtenue en la comparant à celle des emplacements no 1 et no 2 et en utilisant une échelle relative qui varie entre 1 et 5 (la valeur 1 correspond à l'emplacement qui contient le moins de glace).

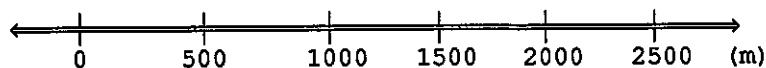
L'emplacement idéal pour une installation aéroportuaire est celui avec une teneur en glace très faible. Aux yeux de cet attribut, l'emplacement le plus favorable se trouve dans le sable sec et le gravier (emplacement no.1) où l'on ne trouve qu'une petite quantité de glace interstitielle.



La teneur en glace.

9) La distance de l'emplacement (C_{12})

Pour réduire les coûts de la construction et de l'entretien de la route, le transport et les problèmes reliés à l'enlèvement de la neige durant la saison hivernale, le groupe de décision recherche un emplacement qui soit proche de la communauté afin de faciliter l'accès à l'aéroport. Toutefois, par mesure de sécurité et pour des raisons écologiques, il faut préserver une certaine distance de cette communauté.



La distance.

Le résultat des évaluations des quatre emplacements envisagés selon chacun des douze attributs est consigné dans la matrice de performances du

tableau 1. Quelques uns de ces attributs sont qualitatifs, conduisent à des évaluations subjectives et renferment un certain niveau d'imprécision.

TABEAU 1: EVALUATION DES QUATRE EMPLACEMENTS.

Attributs	Emplacements				but
	1	2	3	4	
C ₁	1	4	3	2	1
C ₂	-1,5	-2,5	-2,0	-2,5	-4
C ₃	3,7	6,7	2,3	5,0	0
C ₄	0,86	0,38	0,37	0,46	0
C ₅	40	30	20	30	10
C ₆	4	8	7	3	3
C ₇	2	6	8	4	2
C ₈	3	7	8	4	10
C ₉	8	20	30	26	5
C ₁₀	29	12	60	35	10
C ₁₁	1	5	3	2	1
C ₁₂	700	800	1700	2500	1000

Comme on peut le constater, cet ensemble d'attributs est assez différent de ceux retenus dans d'autres études sur la localisation d'un aéroport: par exemple, dans le cas de l'aéroport de Mexico (de Neuville and Keeney [1972]); celui d'un aéroport dans la région de Louisville aux U.S.A (Jarvis et al. [1976]); ou encore le cas d'un deuxième aéroport national en Allemagne (Paelinck [1977]). L'annexe A donne la liste des critères/attributs pour chacun de ces trois cas. Dans notre étude, les attributs importants sont reliés à des facteurs climatiques, atmosphériques et géologiques beaucoup plus qu'à des facteurs socio-économiques ou environnementaux au sens des écologistes. Le facteur coût n'est pris en compte qu'indirectement à travers l'attribut "distance de l'emplacement" et l'attribut "inégalités de surface".

4. LA METHODE MULTICRITERE DEVELOPPEE

Soulignons que nous sommes ici en présence d'une problématique de choix (Roy [1985]) et que l'ensemble A de choix est discret, ce qui peut nous guider vers une méthode particulière. De plus, la nature de l'information disponible ainsi que notre attitude quant à l'intégration des préférences des décideurs et au moment où se fait cette intégration dans le processus de décision, sont d'autres facteurs qui affectent le choix (ou le développement) d'une méthode. Nous avons convenu d'utiliser une méthode multicritère compte tenu de la nature multidimensionnelle et conflictuelle (comme on peut le voir en examinant les données du tableau 1) des facteurs pris en compte dans le problème étudié. Toutefois, devant la panoplie des méthodes multicritères existantes (Schärlig [1985], Vincke [1989]), le choix de l'une d'entre elles recèle presque inévitablement une part d'arbitraire; on a tendance à privilégier une façon de faire ou de voir les choses.

Les principales méthodes candidates ayant à notre connaissance déjà fait l'objet d'applications aux problèmes de localisation sont: l'utilité multiattribut (Nair and Keeney [1975], de Neuville and Keeney [1972]), l'analyse hiérarchique (Kathawala and Gholamnezhad [1987], Wedley [1988]), les méthodes ELECTRE (Khouadja et Roy [1975], Goicoechea et al. [1981], Barda [1987]) et les méthodes PROMETHEE (Mladineo et al. [1987], Karkazic [1989]). Ce ne sont évidemment pas les seules méthodes qui puissent être envisagées. On peut penser par exemple à Qualiflex (Paelinck [1977]) ou encore à des méthodes où l'on utilise un (des) standard(s) contre lequel(s) les actions envisagées sont comparées, par exemple le "goal programming" (Kwak and Schniederjans [1985]).

Dans sa thèse, Barda [1987] compare quatre méthodes multicritères (l'analyse hiérarchique, PREFCALC, ELECTRE IS et III) pour le choix de sites pour l'implantation de centrales thermiques en Algérie. Dans cette étude comparative, l'auteur formule plusieurs critiques à l'endroit de l'analyse hiérarchique. Les plus importantes, à notre avis, sont celles reliées au type d'échelle utilisée et à l'absence d'un point de référence pour comparer les actions. Toujours selon cette étude, la méthode ELECTRE IS, qui s'adresse à la problématique du choix, est surclassée par ELECTRE III et PREFCALC.

L'utilisation de PREFCALC, dans le contexte particulier de notre situation de localisation, ne nous est pas apparue appropriée, pas plus d'ailleurs qu'ELECTRE III. Cette dernière méthode, quoique très attrayante, comporte des seuils dont la signification n'est pas toujours évidente pour les décideurs et ne permet pas d'évaluer de façon intrinsèque chaque emplacement. Or, il n'est pas acquis que l'un des quatre emplacements envisagés soit vraiment satisfaisant; vouloir les comparer entre eux ne donnerait que leur classement relatif. C'est précisément cette limite que soulève Hill [1968] à l'endroit de l'application de méthodes telles que: le goal-achievement matrix, l'analyse coût-bénéfice,... Il s'exprime dans les termes suivants: "...these methods cannot determine whether a project should be executed or not...All of these methods of evaluation are designed primarily for the comparaison and ranking of alternative projects rather than for testing their absolute desirability".

Les méthodes PROMETHEE, quoique plus simples qu'ELECTRE III, cherchent également à classer les actions en les comparant entre elles. Comme la majorité des attributs utilisés dans notre étude sont de nature quantitative (et cardinale), nous aurions perdu beaucoup d'information avec l'utilisation de QUALIFLEX. La méthode de l'utilité multiattribut est assez difficile d'application et même discutable sur certains aspects.

Partant de constatations faites par plusieurs auteurs, à l'effet qu'il est assez naturel pour des décideurs d'appliquer une règle du type somme pondérée et de se référer à un (des) standard(s) pour évaluer les diverses solutions qui s'offrent à eux, nous avons développé une méthode qui va dans ce sens. Pour chaque attribut, nous demandons au décideur de fixer un "but" (un niveau d'aspiration, un niveau idéal, ce niveau idéal ne correspondant pas nécessairement à une valeur extrême sur l'échelle de cet attribut) tel qu'il serait parfaitement satisfait par un emplacement atteignant ce niveau sur cet attribut. Les emplacements sont alors évalués sur la base de leur niveau relatif d'atteinte de ces différents buts comme dans le "goal programming" ou le "compromise programming" ou encore, plus généralement, comme dans le modèle de la fonction distance de Romero [1985].

Toutefois, contrairement à ces dernières méthodes, on explicite, de manière constructive avec le décideur, des fonctions de valeur pour les

écarts aux buts fixés. Pour faciliter cette explicitation, on s'appuie sur la notion du critère généralisé introduite dans PROMETHEE. Ainsi, une action qui, sur un attribut donné, atteint un niveau de performance proche du but sera considérée comme très satisfaisante par les décideurs aux yeux de cet attribut. La fonction de valeur correspondante prendra une valeur proche de 1 (la valeur 1 est réservée aux situations où le décideur est totalement satisfait, une sorte de préférence stricte). Cette fonction de valeur varie inversement avec l'écart entre le but fixé et le niveau atteint par une action (figure 3). Cette fonction prend la valeur 0 lorsque l'écart est supérieur à un certain seuil. Le décideur est donc appelé à identifier un niveau, parfois deux, sur chaque attribut tel qu'il serait totalement insatisfait (satisfaction nulle) par un emplacement ayant cette performance sur cet attribut.

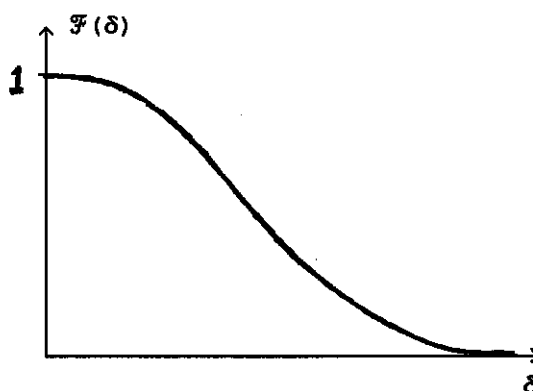


Figure 3: Fonction de satisfaction selon l'écart δ du but fixé.

Pour aider le décideur à expliciter ses fonctions de satisfaction, on peut lui présenter les six fonctions de l'annexe B, lesquelles constituent une transposition des six fonctions critères proposées dans PROMETHEE (Martel et Aouni [1991]). Il faut cependant lui rappeler que ces six fonctions ne constituent pas une liste exhaustive et qu'il donc n'est pas restreint à utiliser l'une d'elles; elles sont présentées uniquement à titre illustratif (selon les auteurs de PROMETHEE, elles permettent de faire face à la grande majorité des situations rencontrées en pratique). L'intérêt de ces fonctions réside dans le fait qu'elles comportent peu de paramètres (au maximum deux) mais encore faut-il qu'elles puissent représenter adéquatement les préférences du décideur.

Plus formellement, dans le cadre du modèle (A, A, E) , on a:

$A = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ = ensemble des emplacements envisagés;

$A = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ = ensemble des attributs utilisés;

$E = \{c_{ij}, i=1, 2, \dots, n \text{ et } j=1, 2, \dots, m\}$ où $c_{ij} = c_i(e_j)$ est la performance de l'emplacement e_j selon l'attribut c_i .

Dans un premier temps, le décideur fixe, sur chaque attribut c_i , un niveau de satisfaction totale (une sorte de niveau à préférence stricte).

c_i^* = but, niveau d'aspiration, niveau idéal qui ne correspond pas nécessairement à une valeur extrême sur l'échelle de l'attribut c_i , tel que, si

$$\delta_i = c_i^* - c_{ij} = 0, \text{ alors } \mathcal{F}_i(\delta_i) = 1,$$

où $\mathcal{F}_i(.)$ désigne la fonction de satisfaction du décideur selon l'attribut c_i .

Puis, dans un deuxième temps, pour aider à calibrer ses fonctions de satisfaction, il (décideur) identifie, sur chaque attribut, un ou deux niveaux de satisfaction nulle. Lorsque c_i^* est un niveau extrême, il suffit d'identifier un seul niveau c_{i0}^+ ou c_{i0}^- (selon le sens de l'attribut) tel que

$$\text{si } \delta_i^+ \geq c_{i0}^+ - c_i^*, \quad \mathcal{F}_i^+(\delta_i^+) = 0; \text{ ou}$$

$$\text{si } \delta_i^- \geq c_i^* - c_{i0}^-, \quad \mathcal{F}_i^-(\delta_i^-) = 0.$$

Lorsque c_i^* est un niveau intermédiaire et que le dépassement aussi bien que la non atteinte de ce niveau n'est pas totalement satisfaisant (cas où l'hypothèse "plus est toujours préférable" n'est pas satisfaite), il doit identifier c_{i0}^+ et c_{i0}^- .

Les fonctions $\mathcal{F}_i(.)$ ($\mathcal{F}_i^+$ et $\mathcal{F}_i^-$) peuvent faire intervenir des seuils d'indifférence α_{i1} tels que

Si $\delta_i \leq \alpha_{i1}$, alors $\mathcal{F}_i(\delta_i) = 1$.

Comme les buts c_i^* sont souvent entachés d'imprécision, ces seuils α_{i1} peuvent apporter plus de réalisme dans la modélisation des fonctions de satisfaction. Cette méthode prévoit également des seuils α_{iu} (seuils de veto) tels que, si sur l'un ou l'autre des attributs c_i , on observe pour un emplacement (e_j) $\delta_i > \alpha_{iu}$, alors cet emplacement est simplement décrété non acceptable. Ces fonctions $\mathcal{F}_i(.)$ peuvent être différentes d'un attribut à un autre et selon que la déviation au but c_i^* est positive ou négative.

Dans notre méthode nous recommandons l'emplacement qui maximise la satisfaction moyenne, c'est à dire:

$$\underset{e_j \in A}{\text{Maximiser } Z(e_j)} = \sum_{i=1}^n \{W_i^+ \mathcal{F}_i^+(\delta_i^+) + W_i^- \mathcal{F}_i^-(\delta_i^-)\} \quad (1)$$

Les coefficients W_i (W_i^+ et W_i^-) expriment l'importance relative des attributs. La signification réelle de ces coefficients, dans notre procédure d'agrégation, n'est pas claire car il n'est pas certain que l'importance des attributs ne soit pas déjà incorporée (au moins partiellement) dans les fonctions $\mathcal{F}_i(.)$.

On n'innove pas complètement avec cette méthode puisque les concepts sur lesquels elle se fonde ont déjà été utilisés dans des modèles de localisation d'aéroport; Voogd [1980] utilise le concept du "point idéal", Jarvis et al [1976] utilisent celui de la "somme pondérée". Même si cette méthode est du type somme pondérée, elle ne comporte pas tous les effets pervers attribuables à ce type de méthodes; par exemple, elle n'est pas totalement compensatoire, du moins au niveau des performances brutes, les échelles hétérogènes ne sont pas standardisées par une simple normalisation mathématique, elle intègre le concept de seuil de veto, ... De plus, elle atténue une difficulté liée à l'application de PROMETHEE du fait de l'utilisation de niveaux de référence sur chaque échelle pour construire les fonctions de satisfaction.

5. RESOLUTION DU CAS ETUDIE

Pour appliquer la méthode que nous leur avions proposée et qui vient d'être présentée, les décideurs (groupe d'experts) ont dû, dans un premier temps, fixer sur chaque attribut un "but" c_i^* . Cette première exigence a semblé assez naturelle aux décideurs puisque, tout en discutant des attributs, ils ont du même coup précisé ces niveaux, jugés comme idéaux ou, tout au moins, totalement satisfaisants pour la construction d'un aéroport dans ce type de région. Donc, sur chaque échelle/attribut, ils ont collectivement fixé, sans trop de peine, ces c_i^* .

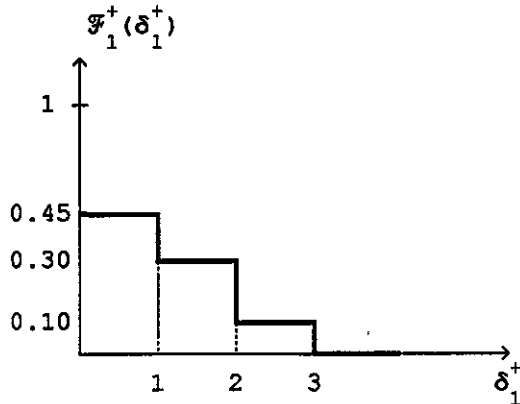
Puis, dans un deuxième temps, toujours en groupe, ils ont déterminé les niveaux c_{i0} pour lesquels ils seraient totalement insatisfaits d'un emplacement qui obtiendrait l'une ou l'autre de ces performances sur l'un ou l'autre des divers attributs. Il s'agit d'une insatisfaction locale et non globale. Comme ces experts ont de fortes connaissances techniques, il leur a été facile de s'entendre pour préciser ces valeurs. Malgré cela, l'explicitation des fonctions de satisfaction, selon l'ampleur des déviations aux buts, n'a pas été aussi simple. Il est rapidement apparu évident que l'une ou l'autre des six fonctions-critères (adaptées) de PROMETHEE ne leur permettait pas toujours d'exprimer leur satisfaction sur chacun des attributs. Ils ont donc convenu de faire individuellement l'exercice et d'en discuter à une autre réunion.

Au cours de cette autre réunion, chaque membre du groupe a présenté, pour chaque attribut, sa (ses) fonction(s) de satisfaction. Bien que la forme de ces fonctions pouvait parfois être différente d'un membre à l'autre, les degrés de satisfaction étaient, en général, quand même assez proches. A quelques rares occasions seulement, l'un ou l'autre membre a été invité à justifier et même à défendre son choix. Un consensus, sur des fonctions- compromis, a été obtenu après quelques échanges de points de vue entre les trois membres du groupe.

Les fonctions de satisfaction $F_i(\delta_i)$ présentées dans cette section sont le fruit de cette démarche. Dans cette présentation, les buts seront systématiquement indiqués ainsi que les seuils de veto lorsqu'il y aura lieu. Notre rôle a été celui de personnes ressources et d'animateurs qui se voulaient aussi neutres que possible. Il est évident que nous les avons certainement un peu influencés au niveau du choix de la méthode.

1) Pour l'attribut "type de sol":

Ils ont choisi une fonction en escalier en raison des propriétés physiques et, plus particulièrement, des conductivités thermiques qui sont très différentes d'un type de sol à un autre et qui ont plutôt tendance à varier d'une façon discrète. Ceci explique la nature discontinue de la fonction de satisfaction choisie. Ils ont fixé comme but $c_1^* = 1$, c'est-à-dire un sol de type sable sec et gravier.

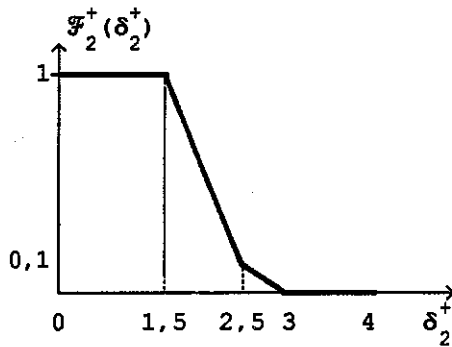


$$f_1^+(\delta_1^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } \delta_1^+ = 0; \\ 0.45 & \text{si } 0 < \delta_1^+ \leq 1; \\ 0.3 & \text{si } 1 < \delta_1^+ \leq 2; \\ 0.1 & \text{si } 2 < \delta_1^+ \leq 3; \\ 0 & \text{si } \delta_1^+ > 3. \end{cases}$$

2) Pour l'attribut "température du pergélisol":

Le groupe de décideurs cherche un emplacement de pergélisol froid car un pergélisol marginal peut créer des problèmes. Ils ont donc fixé comme but $c_2^* = -4^{\circ}\text{C}$.

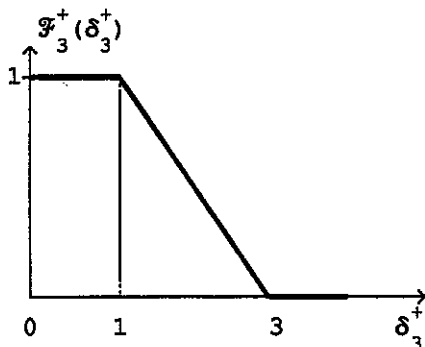
Pour une déviation du but fixé qui ne dépasse pas $1,5^{\circ}\text{C}$, leur niveau de satisfaction est de 1; pour des déviations de $1,5^{\circ}\text{C}$ à $2,5^{\circ}\text{C}$, la fonction de satisfaction décroît graduellement de 1 à 0,1; pour une déviation de $2,5^{\circ}\text{C}$ à 3°C , elle décroît toujours linéairement mais avec une pente différente. Finalement, pour une déviation de plus que 3°C , c'est-à-dire un pergélisol marginal, le niveau de satisfaction est nul (égal à 0). Tout emplacement conduisant à une déviation $\delta_2^+ > 4$ est rejeté (c'est-à-dire $\alpha_{24} = 4$) puisque, comme on l'indiquait dans la description de cet attribut, une température entre 0°C et $+1,5^{\circ}\text{C}$ est à éviter.



$$F_2^+(\delta_2^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_2^+ \leq 1,5; \\ -0,9\delta_2^+ + 2,35 & \text{si } 1,5 < \delta_2^+ \leq 2,5; \\ -0,2\delta_2^+ + 0,6 & \text{si } 2,5 < \delta_2^+ \leq 3; \\ 0 & \text{si } \delta_2^+ > 3. \end{cases}$$

3) Pour l'attribut "déviatiion standard de l'épaisseur du pergélisol":

On cherche à minimiser la variation de l'épaisseur du pergélisol, donc un but $c_3^* = 0$. Selon le groupe de décision, la déviatiion standard peut être divisée en trois segments principaux: ils sont satisfaits avec une déviatiion variant entre 0 et 1 par rapport au but fixé; leur satisfaction diminue graduellement dans l'intervalle de déviatiion du but s'échelonnant de 1 à 3; les déviations supérieures à 3 entraînent un niveau de satisfaction nul.

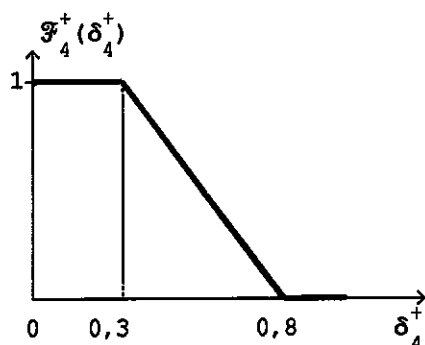


$$F_3^+(\delta_3^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_3^+ \leq 1; \\ -0,5\delta_3^+ + 1,5 & \text{si } 1 < \delta_3^+ \leq 3; \\ 0 & \text{si } \delta_3^+ > 3. \end{cases}$$

4) Pour l'attribut "déviatiion standard de l'épaisseur de la couche active":

Il faut minimiser la variation de l'épaisseur de la couche active, c'est-à-dire un but $c_4^* = 0$. La forme de la fonction de satisfaction choisie pour cet objectif ressemble tout à fait à celle établie pour la déviatiion standard de l'épaisseur du pergélisol. La fonction de satisfaction reçoit la valeur 1 pour un écart du but fixé inférieur ou égal à 0,3. Leur satisfaction diminue linéairement pour les écarts qui se situent dans

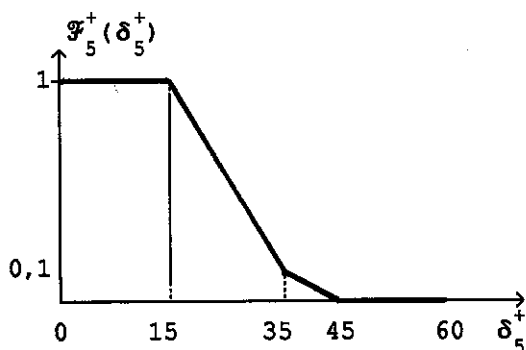
l'intervalle 0,3 à 0,8. Enfin, pour un écart au dessus de 0,8, leur satisfaction est nulle.



$$F_4^+(\delta_4^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_4^+ \leq 0,3; \\ -2,0\delta_4^+ + 1,6 & \text{si } 0,3 < \delta_4^+ \leq 0,8; \\ 0 & \text{si } \delta_4^+ > 0,8. \end{cases}$$

5) Pour l'attribut "épaisseur de la couche de neige":

Il s'agit ici de chercher un emplacement dont l'épaisseur de la couche de neige n'est pas trop importante; ils ont fixé comme but $c_5^* = 10$ cm. Leur niveau de satisfaction atteint la valeur 1 pour un écart du but fixé inférieur ou égal à 15 cm, puis leur fonction de satisfaction décroît linéairement de 1,0 à 0,1 dans l'intervalle de 15 à 35 cm. Cette fonction continue à décroître mais avec une pente différente dans l'intervalle 35 à 45 cm. Leur niveau de satisfaction est nul pour des déviations supérieures à 45 cm. Ils rejettent tout emplacement ayant une déviation $\delta_5^+ > 60$ cm, c'est-à-dire $\alpha_{5AB} = 60$.

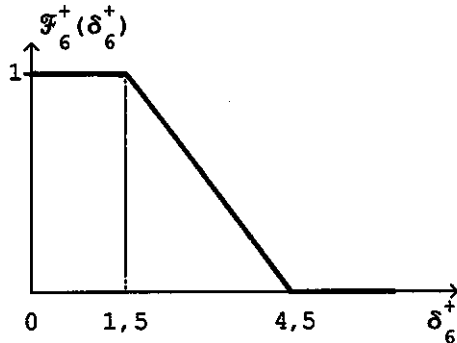


$$F_5^+(\delta_5^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_5^+ \leq 15; \\ -0,045\delta_5^+ + 1,67 & \text{si } 15 < \delta_5^+ \leq 35; \\ -0,2\delta_5^+ + 0,6 & \text{si } 35 < \delta_5^+ \leq 45; \\ 0 & \text{si } \delta_5^+ > 45. \end{cases}$$

6) Pour l'attribut "direction des vents":

Une valeur minimale sur cet attribut signifie une plus faible turbulence des vents. Ils ont fixé comme but $c_6^* = 3$. Un écart du but fixé

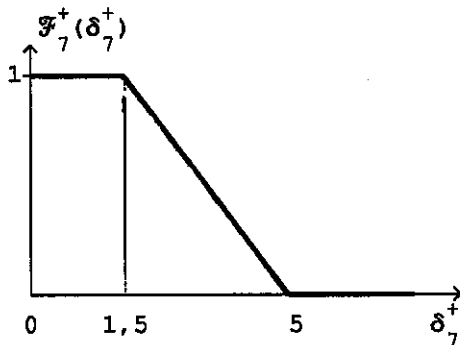
supérieur à 4,5 signifie que l'emplacement est sujet à des grands vents de travers, ce qui ne serait pas du tout satisfaisant. Ils ont retenu une fonction de satisfaction décroissant linéairement en raison de la variation graduelle de la turbulence.



$$F_6^+(\delta_6^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_6^+ \leq 1,5; \\ -0,33\delta_6^+ + 1,5 & \text{si } 1,5 < \delta_6^+ \leq 4,5; \\ 0 & \text{si } \delta_6^+ > 4,5. \end{cases}$$

7) L'attribut "vitesse des vents":

Il faut une vitesse des vents assez faible afin d'éviter les vents tirants. Cela justifie leur choix d'un but $c_7^* = 2$ sur l'échelle de cet attribut. Leur fonction de satisfaction est de type linéaire avec seuil d'indifférence de 1,5. Leur satisfaction est nulle dès que la déviation au but dépasse 5 sur cette échelle.

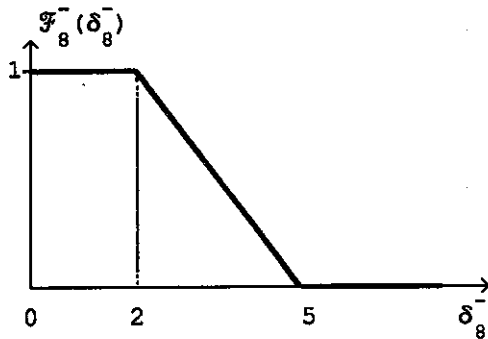


$$F_7^+(\delta_7^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_7^+ \leq 1,5; \\ -0,286\delta_7^+ + 1,4 & \text{si } 1,5 < \delta_7^+ \leq 5; \\ 0 & \text{si } \delta_7^+ > 5. \end{cases}$$

8) Pour l'attribut "température de l'air":

Il s'agit d'avoir une température de l'air pour l'emplacement choisi qui soit assez froide puisque cette dernière a une influence sur la distribution et la température du sol. Le but a donc été fixé à $c_8^* = 10$. Une fonction de satisfaction linéaire avec seuil d'indifférence $\alpha_{81} = 2$ a été choisie pour la régularité dans la variation du microclimat d'un emplacement par rapport à un autre. Leur satisfaction chute à zéro dès que

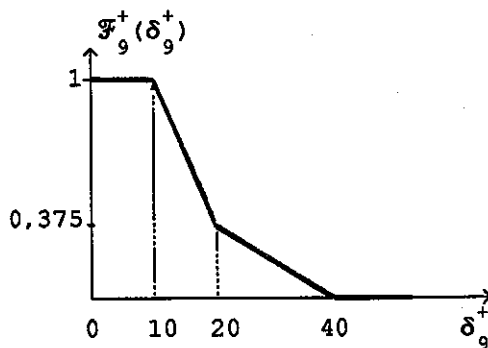
la déviation au but est supérieure à 5 sur cette échelle.



$$\mathcal{F}_8^-(\delta_8^-) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_8^- \leq 1,5; \\ -0,33\delta_8^- + 1,67 & \text{si } 2 < \delta_8^- \leq 5; \\ 0 & \text{si } \delta_8^- > 5. \end{cases}$$

9) Pour l'attribut "inégalité de surface":

On cherche un emplacement avec des variations topographiques minimales car une aire plane avec un minimum d'inégalité du terrain facilite la construction et les atterrissages. Ils ont convenu qu'un but $c_9^* = 5$ mètres serait tout à fait convenable. Leur fonction de satisfaction atteint sa valeur maximale de 1 pour les écarts inférieurs ou égaux à 10 mètres par rapport au but fixé; une fonction de satisfaction décroissante à deux morceaux linéaires a été choisie pour les déviations entre 10 et 40 mètres. Cette fonction prend la valeur 0 pour une déviation supérieure à 40 mètres.

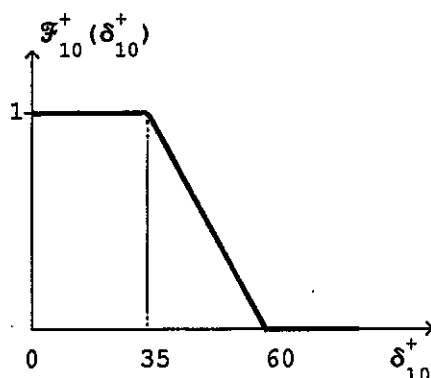


$$\mathcal{F}_9^+(\delta_9^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_9^+ \leq 10; \\ -0,063\delta_9^+ + 1,63 & \text{si } 10 < \delta_9^+ \leq 20; \\ -0,019\delta_9^+ + 0,75 & \text{si } 20 < \delta_9^+ \leq 40; \\ 0 & \text{si } \delta_9^+ > 40. \end{cases}$$

10) Pour l'attribut "altitude":

Un niveau de 10 mètres pour cet attribut leur est apparu comme étant un niveau qu'ils devraient chercher à atteindre, c'est-à-dire $c_{10}^* = 10$. Ils ont choisi encore ici une fonction de satisfaction linéaire décroissante

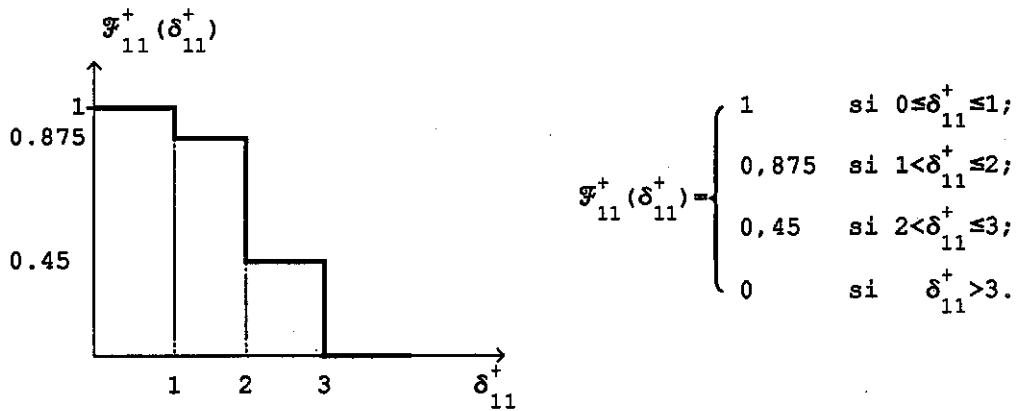
avec un seuil d'indifférence relativement important $\alpha_{101}=35$. Ce choix se justifie en raison de la configuration géométrique de la vallée. Le fond de la vallée est relativement plat alors qu'au-dessus d'une certaine élévation on observe des pentes topographiques raides. Pour des déviations plus importantes, leur satisfaction décroît linéairement pour atteindre une valeur nulle dès que cette déviation dépasse 60 mètres.



$$g_{10}^+(\delta_{10}^+) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_{10}^+ \leq 35; \\ -0,04\delta_{10}^+ + 2,4 & \text{si } 35 < \delta_{10}^+ \leq 60; \\ 0 & \text{si } \delta_{10}^+ > 60. \end{cases}$$

11) Pour l'attribut "teneur en glace":

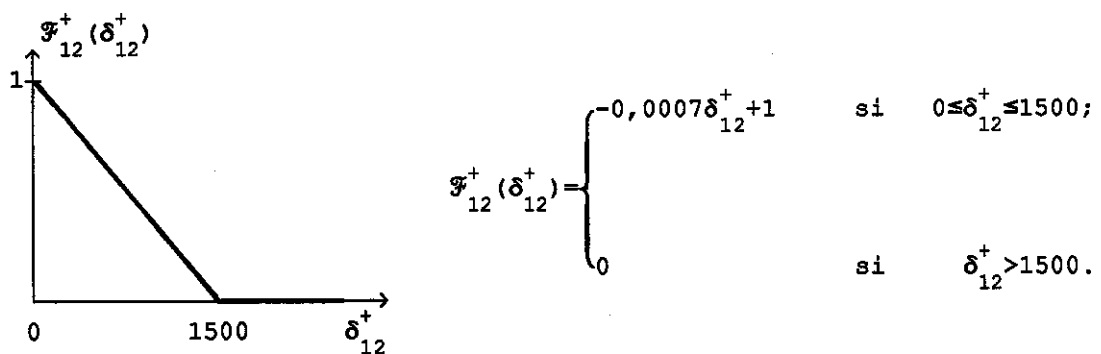
Comme sur cet attribut on cherche un emplacement ayant une très faible teneur en glace, ils ont fixé $c_{11}^* = 1$ qui correspond au meilleur niveau sur l'échelle de cet attribut. La forme en escalier de leur fonction de satisfaction s'explique par le fait qu'ils ont utilisé une échelle discrète pour représenter cet attribut. Il est bon de noter que la "teneur en glace" n'est pas indépendante de l'attribut "type de sol" car c'est principalement dans un sol de type sable sec et gravier que la teneur en glace est la plus faible alors qu'elle est plus importante pour un sol de type limon argileux.

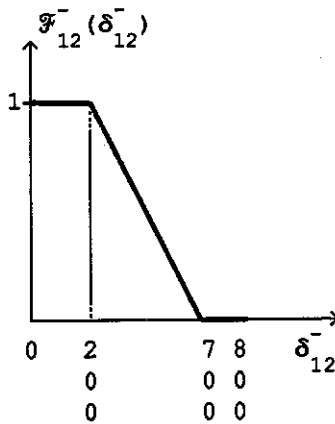


12) Pour l'attribut "distance de l'emplacement":

L'aéroport doit être construit assez proche de la communauté qu'elle doit desservir à cause du coût élevé de la construction des routes et de leur entretien. Il doit également être à une certaine distance de cette communauté par mesure de sécurité et pour des raisons écologiques (bruits,...). Un but $c_{12}^* = 1000$ mètres a donc été retenu comme niveau que l'on devrait essayer d'atteindre.

Comme c_{12}^* est une valeur intermédiaire, ils ont explicité deux fonctions de satisfaction $\mathcal{F}_{12}^+$ et $\mathcal{F}_{12}^-$. Comme l'aéroport doit nécessairement être à une distance minimale de la communauté, un seuil de veto $\alpha_{12u}^- = 800$ mètres a été fixé.





$$F_{12}^{-}(\delta_{12}^{-}) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \delta_{12}^{-} \leq 200; \\ -0,002\delta_{12}^{-} + 1,4 & \text{si } 200 < \delta_{12}^{-} \leq 700; \\ 0 & \text{si } \delta_{12}^{-} > 700. \end{cases}$$

A l'aide de ces fonctions de satisfaction, les performances du tableau 1 sont exprimées en termes de degrés de satisfaction (tableau 2).

Pour appliquer la formule (1) à ces degrés de satisfaction, il faut déterminer des coefficients de pondération W_i exprimant l'importance relative de chacun des attributs. Si l'on considère que l'importance relative des attributs est totalement prise en compte dans les fonctions $F_i(\cdot)$, alors on peut fixer $W_i^+ = W_i^- = 1/12$ pour $i=1,2,\dots,n$, et on obtient comme satisfaction globale pour chacun des emplacements:

$$Z(e_1) = \underline{0,602}, Z(e_2) = 0,542, Z(e_3) = 0,519 \text{ et } Z(e_4) = 0,579.$$

L'emplacement à recommander serait e_1 .

TABLEAU 2: DEGRES DE SATISFACTION

Attributs	Emplacements			
	1	2	3	4
C_1	1	0,1	0,3	0,45
C_2	0,1	1	0,55	1
C_3	0	0	0,35	0
C_4	0	0,84	0,86	0,68
C_5	0,32	0,77	1	0,77
C_6	1	0,18	0,51	1
C_7	1	0,256	0	0,828
C_8	0	0,67	1	0
C_9	1	0,685	0,275	0,351
C_{10}	1	1	0,4	1
C_{11}	1	0	0,45	0,875
C_{12}	0,8	1	0,533	0

Cependant, si l'importance relative des attributs n'est pas totalement prise en compte dans les $\mathcal{F}_i(\cdot)$, on peut déterminer les W_i^+ , W_i^- en regroupant les attributs associés à un même aspect de la mesure de performance. On commence par accorder des importances relatives à ces diverses catégories puis à chacun des attributs composant ces catégories. C'est l'approche qui a été suivie avec le groupe de décision et nous avons obtenu les coefficients de pondération indiqués au tableau 3.

TABLEAU 3: COEFFICIENTS DE PONDERATION.

Aspects	"Sol" (0,25)	"Pergélisol" (0,30)	"Vents" (0,30)	"Coûts" (0,15)
Attributs	$(c_1; c_{11})$	$(c_2; c_3; c_4; c_5; c_8)$	$(c_6; c_7; c_{10})$	$(c_9; c_{12})$
(W_i)	(0,2;0,05)	(0,07;0,05;0,08; 0,05;0,05)	(0,13;0,12; 0,05)	(0,07;0,08)

avec $W_{12}^+ = W_{12}^- = 0,08$.

En appliquant à nouveau la formule (1) avec ces coefficients W_i , on est conduit à:

$$Z(e_1) = \underline{0,707}; Z(e_2) = 0,461; Z(e_3) = 0,456 \text{ et } Z(e_4) = 0,601.$$

L'emplacement à recommander est encore le premier emplacement.

La performance globale maximum ainsi obtenue ($Z(e_1^*) = 0,707$) pourrait s'interpréter comme le niveau global moyen d'atteinte de l'ensemble des buts tel qu'apprécié par le "décideur" à travers ses fonctions de satisfaction. Le "décideur" donnera suite à cette recommandation s'il juge que dans l'ensemble un niveau d'atteinte des buts de 70,7% est satisfaisant.

En général, l'information disponible concernant le premier emplacement était plus précise que pour les trois autres emplacements. On peut alors se demander si cela n'a pas favorisé l'emplacement e_1 , le groupe de décision ayant éventuellement été assez conservateur dans l'évaluation (résultat d'extrapolation) des autres emplacements sur certains attributs.

Pour cette raison et pour pallier à la nature compensatoire de la méthode employée, nous avons calculé (selon ELECTRE III avec des seuils constants $q_i = 0,1$, $p_i = 0,6$ et $u_i = 1$), à partir des degrés de satisfaction, les degrés de crédibilité du surclassement pour chaque paire d'emplacements.

Le tableau 4 donne ces degrés de crédibilité pour le jeu de poids obtenu au tableau 3.

TABLEAU 4: DEGRES DE CREDIBILITE

$\delta(e_i, e_j)$	e_1	e_2	e_3	e_4
e_1	—	0,749	0 (0,746) *	0,815
e_2	0 (0,470)	—	0,804	0,607
e_3	0 (0,387)	0,761	—	0,627
e_4	0,650	0 (0,827)	0 (0,830)	—

(*) Les valeurs entre parenthèses correspondent aux indices de concordance.

Les degrés de crédibilité nuls sont obtenus pour des paires d'emplacements avec des degrés de satisfaction extrêmes (0 ou 1) sur au moins un critère (attribut). Par exemples, $\delta(e_1, e_3)$ et $\delta(e_4, e_3)=0$ parce que le degré de satisfaction de e_3 sur l'attribut c_8 prend la valeur 1 alors que ce degré de satisfaction, pour ce même attribut, prend la valeur 0 pour les emplacements e_1, e_4 . Il suffirait de modifier le seuil α_{81} à 1,5 (plutôt que 2) de la fonction $\mathcal{F}_8^-(\delta_8^-)$ pour que les degrés de satisfaction soient tels que (ces degrés prennent respectivement les valeurs 0, 0,57, 0,86, 0 pour les emplacements e_1, e_2, e_3 et e_4) les degrés de crédibilité $\delta(e_1, e_3)$ et $\delta(e_4, e_3)$ égalent les indices de concordance correspondant à ces deux paires d'emplacements.

En atténuant l'impact des seuils de veto reliés aux indices de discordance, on peut dire que l'emplacement e_1 surclasse les trois autres emplacements, ce qui concorde avec le résultat obtenu par notre méthode.

6. CONCLUSION

Un problème de localisation et, en particulier, celui du choix d'un emplacement pour un aéroport, est un problème essentiellement de nature multidimensionnelle. En effet, il nécessite généralement la prise en compte de multiples impacts socio-économique, géo-politique, environnemental, etc. Les impacts primordiaux, dans le cas étudié, concernent des facteurs climatiques, atmosphériques et géologiques.

De nombreuses méthodes multicritères ont été proposées ou utilisées pour résoudre des problèmes de localisation. Plusieurs d'entre elles conduisent à un classement des emplacements potentiels sans vraiment se prononcer sur la désirabilité véritable de l'un ou l'autre de ces derniers. De plus, aucune de ces méthodes n'est parfaite et chacune comporte des exigences pas toujours faciles à satisfaire par le décideur.

Nous avons donc développé une méthode qui est simple à appliquer et légitime pour le groupe de décision impliqué. Cette méthode se base sur la fixation d'un but sur chaque attribut et sur la construction de fonctions de satisfaction du décideur pour les écarts observés à ces buts avec les divers emplacements envisagés. L'emplacement prescrit est celui qui montre la satisfaction globale moyenne la plus élevée.

Dans ce processus, le groupe de décision a connu quelques difficultés avec la construction des fonctions de satisfaction, même si ces dernières se voulaient très simples. Ces difficultés sont inhérentes à l'inévitable aspect subjectif entourant l'enregistrement des préférences du décideur et à la qualité de l'information disponible. Malgré cela, le groupe de décision a très bien collaboré tout au long du processus et semblait très satisfait du résultat obtenu. Nous sommes donc portés à croire que nous avons réalisé une aide multicritère à la décision.

BIBLIOGRAPHIE

- Aouni, B., *Introduction des Préférences du Décideur dans le Modèle du "Goal Programming: Une Nouvelle Formulation et Application. Essai de maîtrise non publié, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, 1988 (62-94).*
- Barda, O.H., *Etude Comparative des Méthodes Multicritères dans le Cadre d'un Problème de Localisation, Thèse pour l'obtention du titre de docteur de 3^e cycle, LAMSADE, Université de Paris-Dauphine, 1987.*
- Brans J.P., B. Mareschal et Ph. Vincke, "PROMETHEE: A new Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis," In J.P. Brans (ed.), *Operational Research'84*, North-Holland, Amsterdam, 1984.
- Brown, P.A. and D.F. Gibson, "A Quantified Model for Facility Site Selection- Application to a Multiplant Location Problem", *AIIE Transactions*, March 1982.
- Bruce J.M., "Developing a Framework For Location Analysis", *Industrial Engineering*, Vol. 17, 1985 (part 1:52-63, part 2: 60-65).
- Buhl H.U., "Axiomatic Consideration In Multi-objective Location Theory," *EJOR*, 37, 1988 (363-367).
- De Neufville, R. and R.L. Keeney, "Systems Evaluation Through Decision Analysis: Mexico City Airport," *Journal of Systems Engineering*, Vol. 3, 1, 1972 (34-50).
- Erkut, E. and S. Newman, "Analytical Models for Locating Undesirable Facilities", *EJOR*, 40, 1989 (275-291).
- Francis R.L., L.F. McGinnis and J.A. White, "Locational Analysis", *EJOR*, Vol. 12, 3, 1983 (220-52).
- Gahé, E., M. Allard, M.K. Seguin and R. Fortier, "Measurements of Active Layer and Permafrost Parameters with Electrical Resistivity, Self Potential and Induced Polarization", *Proceeding of the 5th International conference on permafrost*, 1988 (148-153).
- Goicoechea, A., D.R. Hansen and R.L. Handrickson, "A Hierarchical Multilevel Approach to the Development and Ranking of Systems in The Tanning Industry," *J. of Computers and Industrial Engineering*, Vol. 5, 1981 (33-47).
- Hansen P., M. Labbé, D. Petters and J.F. Thisse, "Facility Location Analysis", *Fundamentals Pure of applied economics*, Vol. 22, 1987 (1-70).
- Hill, M., "A Goal-Achievement Matrix for Evaluating Alternative Plans," *J. of American Institute of Planners*, Vol. 34, 1, 1968 (19-29).
- Hwang, C.L. and A. Masud, "Multiple Objective Decision Making-Methods and Applications: A State-of-The Art Survey, Lecture notes in economics and mathematical systems 164, Springer Verlag, Berlin, 1979.

- Jarvis, J.J., C.C. Shimpeler, J.C. Corradino, "Multiple Criteria Theory and Airport Site Evaluation", *Journal of the urban planning and development division*, August 1976.
- Karkazic, J., "Facilities Location In a Competitive Environnement: A PROMETHEE Based Multiple Criteria Analysis," *EJOR*, Vol. 42,3,1989 (294-304).
- Kathawala Y. and H. Gholamnezhad, "New Approach to Facility Locations Decisions," *Int. J. Systems Sci.* Vol. 18, 2, 1987 (389-402).
- Khouadja H. et B. Roy, "Comment Choisir la Location d'une Grande Ecole d'Ingénieurs: L'exemple de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Marseille", *Université de Paris-Dauphine, Cahiers du LAMSADE No.1*, 1975.
- Kwak N.K. and M.J. Schniederjans, "A Goal Programming Model for Selecting a Facility Location Site," *RAIRO*, Vol. 19, 1, 1985 (1-14).
- Martel, J.M. et B. Aouni, "Incorporating Decision Maker's Preference in The Goal Programming Model," *JORS*, Vol. 41, 4, 1991 (à paraître).
- Mladineo N., J. Margeta, J.P. Brans et B. Mareshal, "Multicriteria Ranking of Alternative Locations for Small Scale Hydro Plants," *EJOR*, Vol.31, 2, 1987 (215-222).
- Nair K. and R. Keeney, "Selecting Nuclear Power Plant Sites Using Decision Analysis," *Woodward-Clyde Consultants*, San Francisco, California, Dec. 1975.
- Paelinck J., "Qualitative Multicriteria Analysis: An Application to Airport Location," *Environment and planning A*, Vol. 9, 1977.
- Revelle, C., J. L. Cohon and D. Shobrys, "Multiple Objectives in Facility Location: A Review," in J.N. Morse (ed.), *Organisations: Multiple Agents with Multiple Criteria*, 1981.
- Romero, C., "Multi-Objective and Goal Programming Approaches As a Distance Function Model," *J. Opl. Res. Soc.*, Vol. 36, 3, 1985 (249-51).
- Roy, B., *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Economica, 1985.
- Schärlig, A., *Où Construire l'Usine?*, Dunod, 1973.
- Schärlig, A., *Décider sur Plusieurs Critères: Panorama de l'aide à la décision multicritère*, Presses Polytechniques Romandes, 1985.
- Vincke, P., *L'aide Multicritère à la Décision*, SMA Editions de l'Université de Bruxelles, 1989.
- Voogd H., "Multicriteria Evaluation by Means of the Ideal Point Concept," *Dept. de planification urbaine et régionale, Université technique de Delft*, mars 1980.
- Wedley, C.W., "Facility Location With The Analytic Hierarchy Process," *Proceeding of ASAC 1988 conference in Production Operations Management*, Vol. 9, Part 7, 1988.

ANNEXE A: ATTRIBUTS (CRITERES) UTILISES DANS DIVERSES ETUDES

De Neuville et Keeney
"Aéroport de Mexico"

Jarvis et al.
"Aéroport dans la région
de Louisville"

Paelinck
"Aéroport en Allemagne"

MINIMIZE TOTAL CONSTRUCTION AND MAINTENANCE COSTS;

PARTICULARLY HIGH INVESTMENT COSTS;

AIR SPACE;

PROVIDE ADEQUATE CAPACITY TO MEET THE AIR TRAFFIC DEMANDS;

RELATIVELY LOW INVESTMENT COSTS;

UTILITIES;

APPROACH AND RETREAT COSTS;

ENGINEERING AND OBSTRUCTION;

MINIMIZE THE ACCESS TIME TO THE AIRPORT;

URBAN ENVIRONMENT, TIGHT LABOUR MARKET;

NATURAL ENVIRONMENT;

MAXIMIZE THE SAFETY OF THE SYSTEM;

URBAN ENVIRONMENT, POSSIBLE LABOUR MARKET;

NATURAL ENVIRONMENT;

MINIMIZE SOCIAL DISRUPTION CAUSED BY THE PROVISION OF NEW AIRPORT FACILITIES;

URBAN ENVIRONMENT, VARIETY;

RELOCATION IMPACT (HUMAN FACTORS);

MINIMIZE THE EFFECTS OF NOISE POLLUTION DUE TO AIR TRAFFIC.

METROPOLITAN ENVIRONMENT;

NOISE AND OTHER HUMAN ENVIRONMENTAL IMPACT;

NATURAL ENVIRONMENT, HIGH NUISANCE LEVEL;

GROUND ACCESS AVAILABILITY;

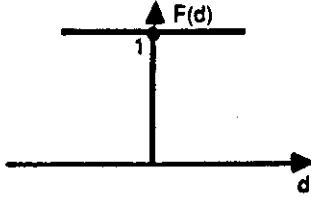
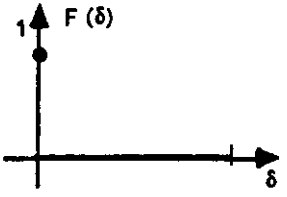
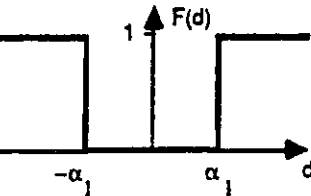
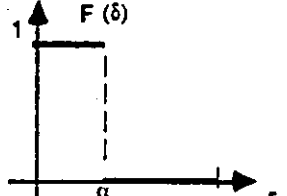
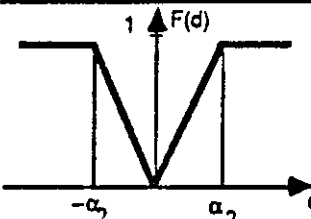
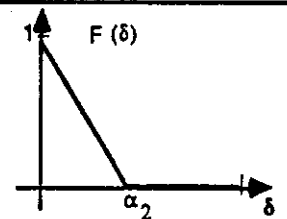
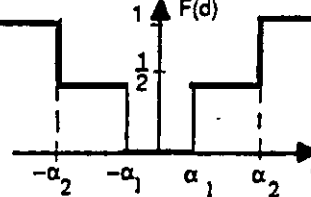
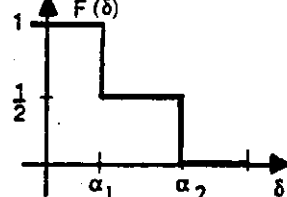
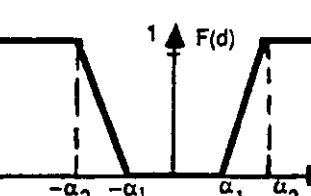
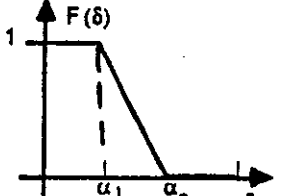
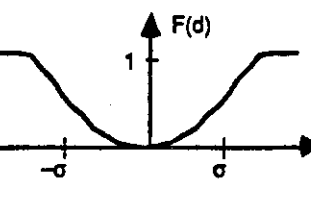
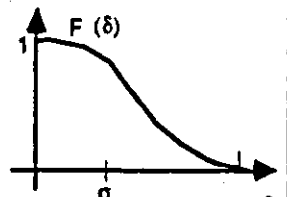
NATURAL ENVIRONMENT, ACCEPTABLE NUISANCE LEVELS.

TOTAL PROJECT COST;

ECONOMIC IMPACT;

GOVERNMENTAL/INSTITUTIONAL CONSIDERATIONS;

ANNEXE B: FONCTIONS "TYPES" DE SATISFACTION

Type de fonction critère	Dans PROMETHEE	Paramètres à définir	Dans le GP	Définition analytique
I Vrai critère		-		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta = 0 \\ 0, & \delta > 0 \end{cases}$
II Quasi-critère		a_1		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq \alpha_1 \\ 0, & \delta > \alpha_1 \end{cases}$
III Critère à préférence linéaire		a_2		$F(\delta) = \begin{cases} 1 - \frac{\delta}{\alpha_2}, & \delta \leq \alpha_2 \\ 0, & \delta > \alpha_2 \end{cases}$
IV Critère à paliers		a_1, a_2		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq \alpha_1 \\ \frac{1}{2}, & \alpha_1 < \delta \leq \alpha_2 \\ 0, & \delta > \alpha_2 \end{cases}$
V Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence		a_1, a_2		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq \alpha_1 \\ \frac{\alpha_2 - \delta}{\alpha_2 - \alpha_1}, & \alpha_1 < \delta \leq \alpha_2 \\ 0, & \delta > \alpha_2 \end{cases}$
VI Critère (inverse) gaussien		s		$F(\delta) = \exp(-\delta^2 / 2\sigma^2)$