

# ÉVALUATION DE SYSTÈMES DE TRANSPORT ALTERNATIFS À CALI, COLOMBIE

S.MORIARTY & T.WANG

Kellogg Brown & Root, Leatherhead, Surrey, Royaume-Uni

[stephen.moriarty@halliburton.com](mailto:stephen.moriarty@halliburton.com)

[terry.wang@halliburton.com](mailto:terry.wang@halliburton.com)

## 1. EXTRAIT

L'expansion des zones urbaines dans les pays en développement présente de nombreux problèmes en matière de transport. Un grand nombre de villes s'étendent rapidement dans la campagne environnante et les nouveaux développements créent de nouvelles exigences au niveau de la circulation automobile, ce qui aggrave l'encombrement des réseaux routiers. Dans les pays en développement, les citoyens aspirent à l'acquisition et à l'utilisation de voitures mais l'objectif de la municipalité est souvent de fournir un bon système de transports en commun. En conséquence, les transports en commun sont considérés comme le mode de transport durable préféré pour satisfaire à la croissance de la demande en matière de déplacements par le biais d'une nouvelle infrastructure de transports en commun ou de l'amélioration des systèmes existants. Cependant, plusieurs autres systèmes sont possibles, chacun offrant des caractéristiques particulières. Pour les régies de transports en commun, le problème consiste à identifier les systèmes qui conviennent le mieux à leurs besoins locaux.

Cette note expose les constatations d'une étude effectuée à Cali, Colombie, où des systèmes alternatifs de transports en commun ont été examinés dans un cadre d'évaluation. Le cadre a été mis au point en consultation avec les principaux dépositaires d'enjeux de la ville, dont le gouvernement central, la municipalité et Metro Cali (la régie locale de transports en commun).

Il évaluait les avantages de systèmes de transports en commun alternatifs tels que le métro léger, le tramway moderne et les autobus articulés. Un modèle de transport multimodal EMME2 a été utilisé pour évaluer les avantages des systèmes alternatifs. Par ailleurs, dans le cadre de l'étude, des essais de préférence exprimée ont été menés pour améliorer le mécanisme de choix de mode des modèles EMME2 de telle sorte que les systèmes de métro léger, tramway moderne, autobus articulés et voitures particulières puissent être évalués de manière cohérente. Pour chaque option de système de transport en commun, des indicateurs clés tels que l'accessibilité, l'intégration, l'économie, la sécurité et l'environnement ont été pris en ligne de compte.

La principale conclusion de l'étude était que la performance des autobus articulés était supérieure dans l'ensemble au niveau de la fiabilité, du fonctionnement et de la maintenance tandis que les systèmes à infrastructure fixe tels que le métro léger ou le tramway moderne offraient de plus grands avantages en termes de couverture et d'accessibilité, d'intégration et de sécurité.

## 2. MOTS-CLÉS

TRANSPORT ROUTIER/VIVABILITÉ/DÉVELOPPEMENT DURABLE

### **3. INTRODUCTION**

En 2002, la coentreprise Schrodgers-Corfivalle a été retenue par le Programme d'Unité Nationale pour le Développement pour étudier la proposition d'un système de transports en commun intégré à Santiago de Cali, Colombie. Kellogg Brown & Root (KBR) a été retenue par la coentreprise pour entreprendre l'évaluation technique de systèmes de transports en commun alternatifs.

La ville de Santiago de Cali est située dans la région de Valle, en Colombie. Au cours des quelques dernières années, la ville s'est étendue vers les zones agricoles au sud et à l'est. La croissance de la population a augmenté la demande exercée sur le système de transports en commun existant. Les compagnies d'autobus ont réagi en fournissant des services supplémentaires pour répondre à la demande croissante. En même temps, la hausse des revenus a entraîné une hausse du nombre de propriétaires de véhicules et plus particulièrement de motos et mobylettes. L'augmentation combinée des services d'autobus et du nombre de véhicules particuliers a entraîné l'encombrement des routes à l'intérieur et aux abords du centre-ville aux heures de pointe, le matin et le soir.

Cependant, de nombreux citoyens n'ont pas les moyens financiers de posséder un véhicule particulier et l'accès à des transports en commun efficaces et abordables est essentiel pour leurs besoins quotidiens de déplacements. Un système de transports en commun efficace est considéré par les planificateurs du trafic de la ville comme le mode de transport préféré pour répondre à la demande croissante de déplacements, par le biais de la fourniture d'une nouvelle infrastructure de transports en commun ou de l'amélioration des systèmes existants.

### **4. SYSTÈME DE TRANSPORT**

La régie des transports locaux, Metro Cali, a envisagé un système de transports en commun double consistant en des services principaux et interurbains le long des grands axes, soutenus par des services de rabattement locaux.

Les services interurbains longeraient les principaux couloirs routiers dans tout Cali tandis que la ligne principale longe l'ancienne voie ferrée nord-sud qui traverse la ville. Les services de rabattement assureraient la correspondance entre les voisinages et les lignes principales et interurbaines à des points d'arrêt situés le long des grands couloirs.

Le système réduirait le nombre d'autobus actuel sur le réseau routier interurbain ; une importante source d'encombrement et de pollution à Cali. Le nouveau système utiliserait les routes existantes ou des couloirs isolés et encouragerait un changement de modèle vers les transports en commun, ce qui entraînerait des avantages au niveau du désencombrement pour les autres utilisateurs des routes.

### **5. DÉVELOPPEMENT DU CADRE D'ÉVALUATION**

Il a été reconnu que plusieurs systèmes alternatifs étaient possibles, chacun possédant des caractéristiques particulières. Dans l'étude courante, trois systèmes de transports en commun différents ont été pris en ligne de compte :

- Métro léger

- Autobus articulés
- Tramway moderne

Des systèmes combinés pour métro léger et tramway moderne ont également été examinés.

Dans l'évaluation visant à déterminer le système optimal, il a été nécessaire de tenir compte des aspects techniques de chaque système alternatif. Cette évaluation technique a été entreprise dans le but d'évaluer la demande imposée aux lignes principales et interurbaines. Ceci a permis l'évaluation de chaque système alternatif en fonction d'aspects techniques tels que la couverture, l'accessibilité et le degré d'intégration.

Un cadre pour évaluer la performance des systèmes alternatifs et identifier le système optimal pour les services interurbains était exigé qui :

- soit acceptable par les dépositaires d'enjeux et
- donne une représentation équitable et équilibrée de la performance de chaque système.

Ce cadre a été développé en consultation avec le Comité Technique composé des principaux dépositaires d'enjeux de la ville dont le gouvernement central, la municipalité et Metro Cali, la régie locale de transports.

La première étape consistait à identifier, en conjonction avec les dépositaires d'enjeux, une série de critères et attributs pouvant être utilisés pour évaluer chaque système alternatif. À partir de cette évaluation initiale, il a été constaté que certains critères étaient subordonnés à d'autres, ce qui a permis de les organiser en une hiérarchie de critères, sous-critères et attributs. À partir de là, KBR a produit un avant-projet initial du cadre d'évaluation, basé sur une structure hiérarchique à trois niveaux :

- Critères étroitement liés aux objectifs clés du système de transports en commun.
- Sous-critères correspondant à chaque critère.
- Attributs correspondant à chaque sous-critère.

Pour le cadre d'évaluation, un système de score a été mis au point en consultation avec le Comité Technique. Ceci a permis d'évaluer divers critères, sous-critères et attributs et de leur attribuer des facteurs reflétant les avantages des systèmes alternatifs les uns par rapport aux autres.

Des facteurs ont ensuite été attribués à chaque critère, sous-critère et attribut, comme suit :

- Un facteur a été attribué à chaque critère, correspondant à la perception de son importance relative par rapport aux autres critères. La somme des facteurs de critères était de 1,00.
- De même, les sous-critères au sein de chaque critère ont ensuite été évalués et un facteur leur a été attribué en fonction de leur importance relative parmi les sous-critères au sein d'un même critère. La somme des facteurs de sous-critères au sein de chaque critère était de 1,00.

- Pareillement, les attributs au sein de chaque sous-critère ont été évalués et un facteur leur a été attribué en fonction de leur importance relative par rapport aux attributs au sein d'un même sous-critère. La somme des facteurs d'attributs pour chaque sous-critère était de 1,00.

Pour chaque attribut, un score a ensuite été estimé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Score de l'attribut} = \text{Facteur de critère} * \text{Facteur de sous-critère} * \text{Facteur d'attribut} * 1000$$

Chaque attribut a été classé comme soit quantitatif, soit qualitatif et une mesure d'évaluation lui a été attribuée.

L'avant-projet de cadre d'évaluation a été distribué au Comité Technique pour en obtenir les vues et incorporer tous commentaires de sa part.

Les facteurs de critères, facteurs de sous-critères, facteurs d'attributs et scores d'attributs sont donnés au Tableau 1.

Tableau 1 : Cadre d'évaluation

CRITÈRES		SOUS-CRITÈRES		ATTRIBUT			
Description	Facteur	Description	Facteur	Description	Mesure d'évaluation	Facteur	Score
Avantage primaire pour l'utilisateur	0,30	Couverture et accessibilité	0,67	Total de passagers en semaine	Nombre	0,25	50
				Pourcentage de la demande totale	%	0,25	50
				Durée moyenne des trajets	Minutes	0,25	50
				Longueur moyenne des trajets	Kilomètres	0,25	50
Avantage secondaire pour l'utilisateur	0,25	Intégration	0,33	Temps moyen de correspondance	Minutes	1,00	100
		Niveau de service	0,40	Niveau de confort	Excellent/ Bon/ Adéquat	1,00	100
		Fiabilité	0,30	Passagers affectés par les perturbations	Nombre	0,33	25
				Impact des incidents sur le fonctionnement du système	Haut/ Moyen/ Bas	0,07	5
				Impact des pannes sur les utilisateurs des routes	Haut/ Moyen/ Bas	0,20	15
				Variation attendue de la durée des trajets	Haute/ Moyenne/ Basse	0,20	15
		Fiabilité de l'alimentation électrique	Haute/ Moyenne/ Basse	0,20	15		
		Sécurité	0,30	Risque d'accidents potentiels	Haut/ Moyen/ Bas	1,00	75
Impact primaire du système alternatif	0,20	Fiabilité	0,30	Coût de l'augmentation de la couverture par km	US\$	0,33	20
				Coût de l'augmentation de la capacité de 20%	US\$	0,33	20
				Capacité du système	Nombre	0,33	20
		Fonctionnement du système	0,30	Disponibilité des pièces détachées	Haute/ Moyenne/ Basse	0,50	30
				Facilité de maintenance	Haute/ Moyenne/ Basse	0,50	30
		Impact sur l'environnement	0,40	Impact sur le paysage urbain et le bruit	Haut/ Moyen/ Bas	0,34	27
				Impact sur la qualité de l'air	Haut/ Moyen/ Bas	0,33	26
Ségrégation	Significative/Non significative			0,34	27		
Impact secondaire du système alternatif	0,15	Impact sur l'emploi	0,50	Emplois locaux directs pendant la construction	Haut/ Moyen/ Bas	0,33	25
				Emplois locaux directs pendant l'année d'inauguration	Nombre	0,66	50
		Impact sur le système de transport existant.	0,50	Autobus existants	Nombre	0,33	25
				Conducteurs d'autobus existants	Nombre	0,33	25
				Niveau de recyclage des employés	Haut/ Moyen/ Bas	0,33	25
Problèmes liés aux coûts	0,10	Construction	0,50	Durée de construction attendue	Années	0,33	17
				Risques liés aux coûts et au calendrier de construction	Haut/ Moyen/ Bas	0,67	33
		Frais d'exploitation	0,50	Risques liés aux frais d'exploitation	Haut/ Moyen/ Bas	1,00	50

Le principe du cadre d'évaluation pour les systèmes alternatifs était basé sur l'attribution du score d'attribut à l'alternative qui optimisait la mesure d'évaluation pour un attribut particulier. Les autres systèmes recevaient un score d'attribut en fonction de leur performance par rapport au système optimal pour l'attribut particulier, comme suit :

- Pour les mesures d'évaluation quantitatives, les autres systèmes recevaient un score proportionnel à leur mesure d'évaluation par rapport à la mesure d'évaluation du système optimal.
- Pour les mesures d'évaluation qualitatives, les autres systèmes recevaient le même score d'attribut si leur performance était similaire à celle du système optimal ou  $\frac{2}{3}$  du score d'attribut si leur performance était relativement intermédiaire par rapport au système optimal ou  $\frac{1}{3}$  du score d'attribut si leur performance était relativement faible par rapport au système optimal.

Cette approche modulaire de la détermination des scores d'attributs a permis à l'évaluation de se concentrer sur les attributs individuels, assurant ainsi une plus grande objectivité de l'évaluation des mesures quantitatives et qualitatives.

Les scores d'attributs ont pu être déterminés immédiatement une fois que les facteurs de critères, les facteurs de sous-critères et les facteurs d'attributs ont été spécifiés. Cette approche a permis une plus grande souplesse au niveau de l'exécution d'une analyse de sensibilité sur la robustesse de la comparaison des systèmes alternatifs en variant les facteurs de critères, sous-critères ou attributs.

Pour chaque critère, les scores d'attributs ont été additionnés pour déterminer le score des critères d'évaluation. À leur tour, ces derniers ont été additionnés pour déterminer le score d'évaluation total pour chaque système alternatif.

Dans les cas appropriés, les mesures d'évaluation pour les attributs quantitatifs étaient tirées du modèle EMME/2, de l'industrie du transport local ou des normes de l'industrie et le score était attribué selon le barème illustré au Tableau 1. D'autres mesures d'évaluation pour les attributs qualitatifs étaient subjectives et ces dernières ont été évaluées et notées par le Comité Technique.

Tous les systèmes alternatifs ont été considérés comme étant des options techniquement viables et le système de score était un moyen de mesurer l'adéquation de chacune des alternatives par rapport aux autres.

Les résultats de la notation ont été évalués pour déterminer si l'une des alternatives avait un score total plus robuste que les autres. Ceci a été fait en exécutant une analyse de sensibilité des résultats.

Pendant l'étude, les critères, sous-critères et attributs ont été revus et mis à jour au fur et à mesure de la progression du travail technique.

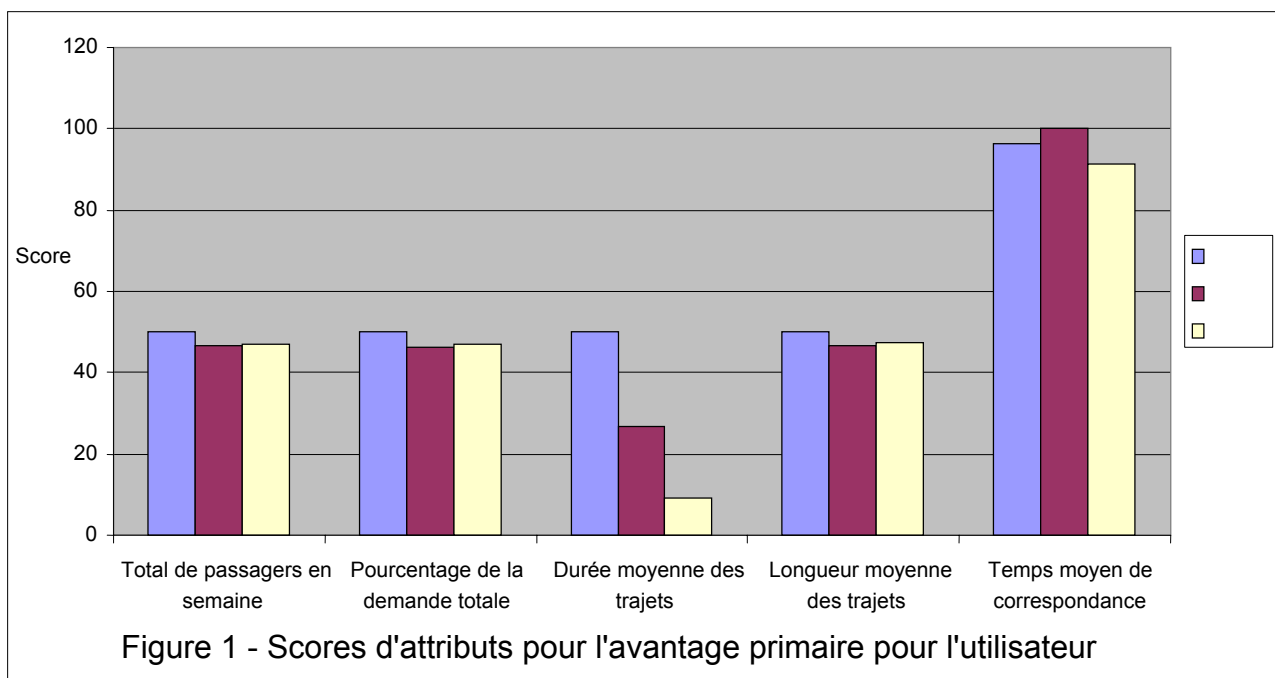
Par ailleurs, le modèle EMME2 a été amélioré pour mieux représenter le système de transport et le choix modal a été révisé en utilisant davantage de données de préférence exprimées récentes.

## 6. RÉSULTATS DU CADRE D'ÉVALUATION

### 6.1. Avantages primaires pour l'utilisateur

Les critères de couverture et accessibilité ont été considérés comme des avantages primaires pour l'utilisateur. Ces sous-critères reflétaient l'exigence technique principale du système de transports devant fournir un moyen efficace de satisfaire à la demande de Cali jusqu'à 2030 et au-delà. Ces sous-critères ont été considérés comme étant les plus importants car ils apportaient une mesure relative de la réponse du système de transports intégré aux exigences de déplacements de Cali.

Les résultats de l'évaluation sont donnés à la Figure 1

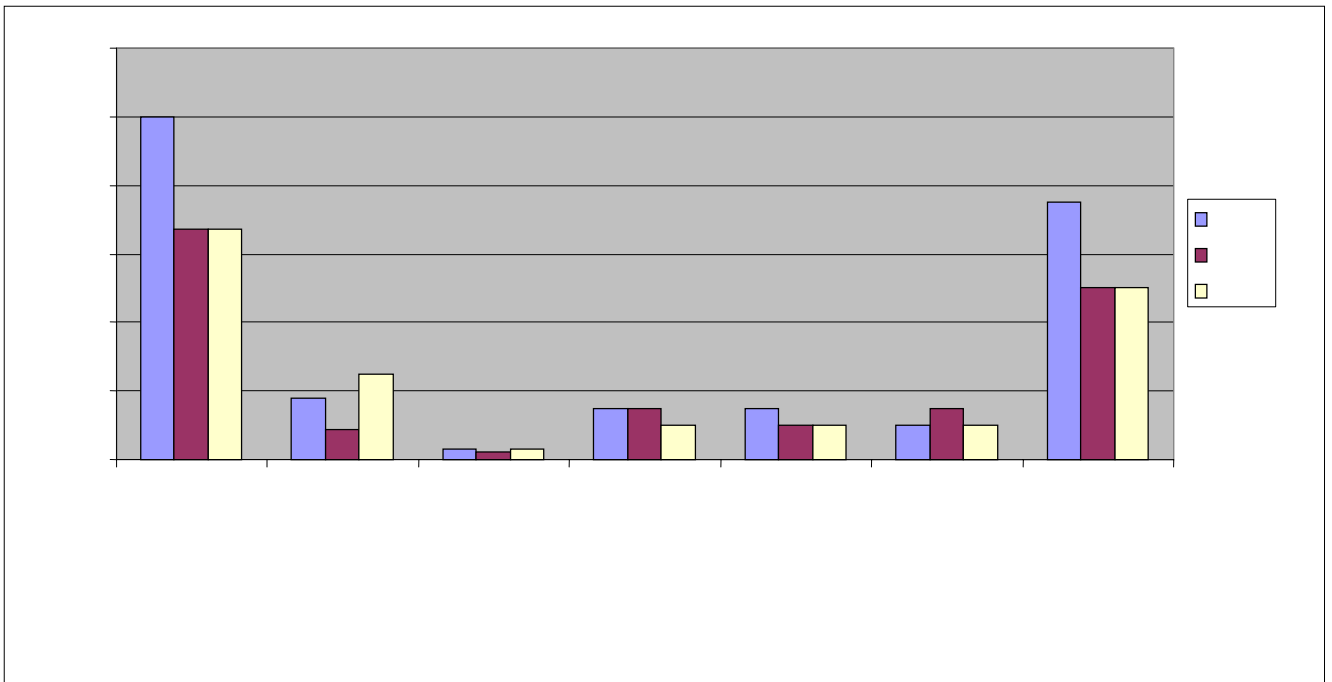


Les attributs « total de passagers en semaine » et « durée moyenne des trajets » sont une mesure indirecte des avantages en termes de désencombrement pour les autres utilisateurs des routes. Si davantage de personnes utilisaient le nouveau système, un complément d'espace-route serait libéré pour les autres utilisateurs.

### 6.2. Avantage secondaire pour l'utilisateur

Les sous-critères « niveau de service », « fiabilité » et « sécurité » ont été considérés comme étant des avantages secondaires pour les utilisateurs par comparaison avec les sous-critères « couverture » et « accessibilité » ainsi qu'en relation avec l'expérience de déplacement que les utilisateurs peuvent attendre de chaque système alternatif.

Les résultats de cette évaluation sont donnés à la Figure 2.



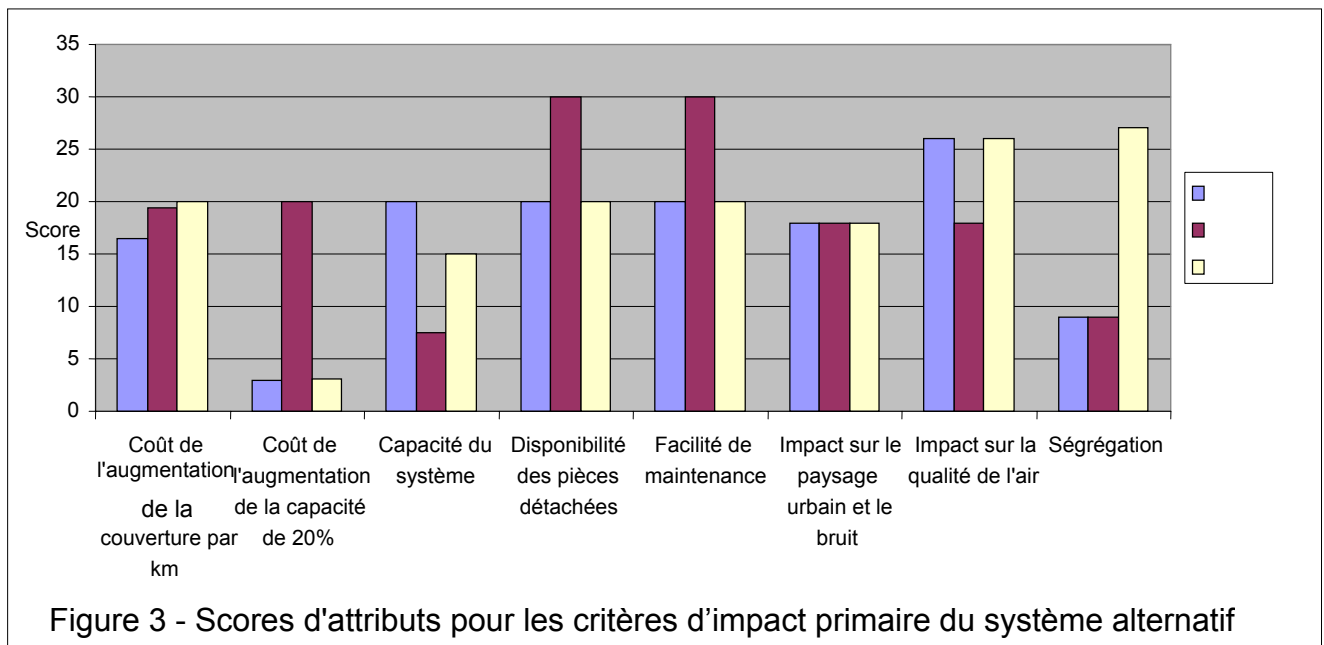
Le sous-critère « sécurité » est une mesure indirecte des avantages en termes de désencombrement pour les autres utilisateurs des routes. Les systèmes alternatifs attirent davantage de passagers, ce qui entraîne une réduction des accidents de la route et présente donc un avantage pour les utilisateurs des routes.

### 6.3. Impact primaire du système alternatif

Les sous-critères « fiabilité », « fonctionnement du système » et « impact sur l'environnement » ont été considérés comme étant l'impact primaire de chaque système alternatif. Ces sous-critères devaient servir à évaluer l'impact direct de chaque système au niveau de son fonctionnement et de sa maintenance ainsi qu'au niveau de son impact sur l'environnement.

Les résultats de cette évaluation sont donnés à la Figure 3.



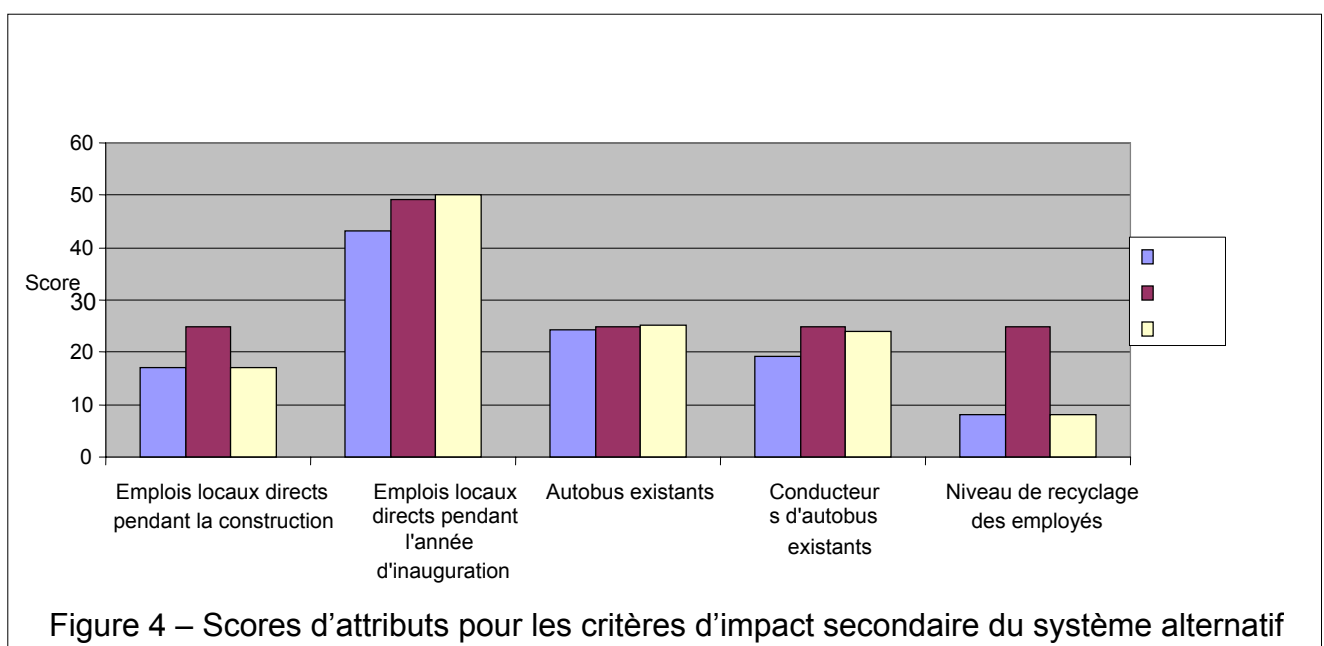


Les critères « impact sur le bruit » et « qualité de l'air » sont des mesures indirectes des avantages en termes de désencombrement pour les autres utilisateurs des routes. Le passage modal aux divers systèmes réduira le bruit et améliorera la qualité de l'air, ce qui sera avantageux pour les autres utilisateurs des routes.

#### 6.4. Impact secondaire du système alternatif

Les sous-critères « impact sur l'emploi » et « impact sur le système de transports » ont été considérés comme étant l'impact secondaire de chaque système alternatif. Ces sous-critères devaient servir à évaluer quel serait l'impact de chacun des systèmes alternatifs sur la situation courante en matière d'emploi à Cali.

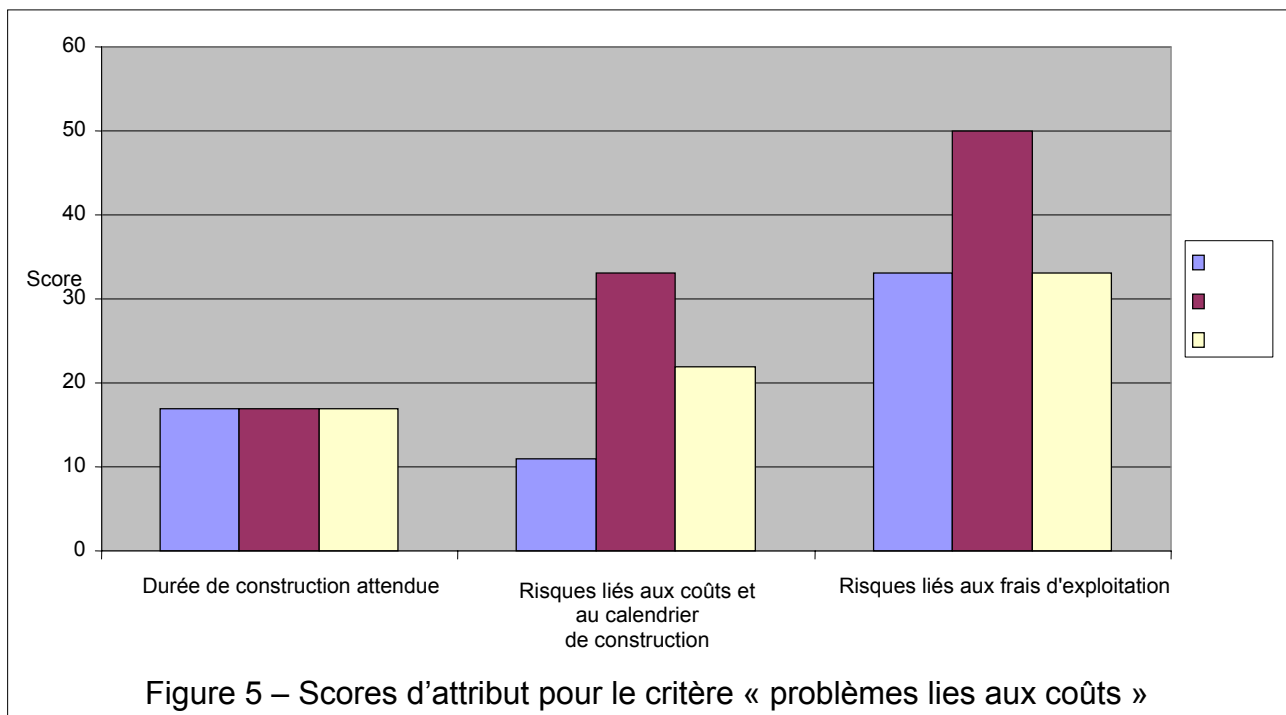
Les résultats de cette évaluation sont donnés à la Figure 4.



## 6.5. Problèmes liés aux coûts

Les problèmes liés aux coûts sont principalement traités dans le modèle financier. Cependant, certains aspects relatifs aux coûts ne sont pas entièrement évalués en termes financiers et ces derniers ont été inclus dans l'évaluation technique.

Les résultats de cette évaluation sont donnés à la Figure 5.

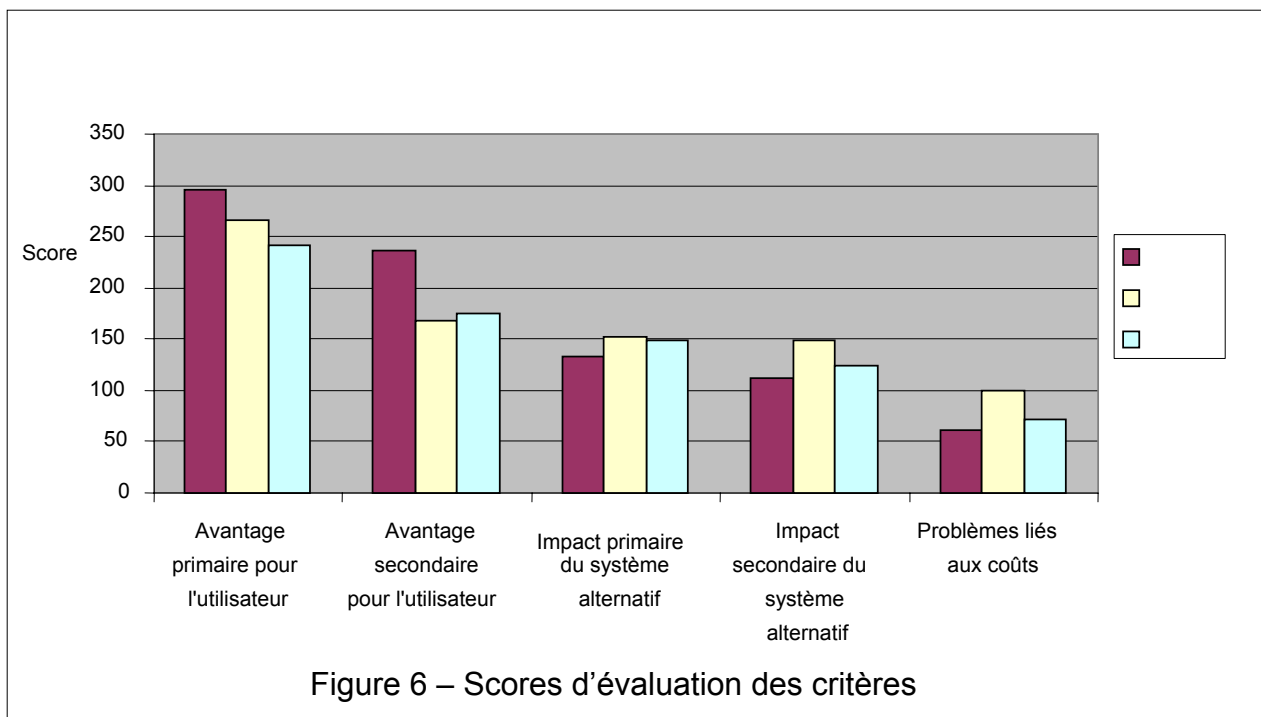


## 6.6. Évaluation globale des systèmes alternatifs

Les résultats de l'évaluation globale sont résumés dans le Tableau 2 et indiqués à la Figure 6 pour les trois systèmes alternatifs. Bien que l'évaluation indique le plus haut score pour le métro léger, il ne pourrait être recommandé que si le score était plus élevé que pour les deux autres systèmes. Avec les facteurs de critères, sous-critères et attributs utilisés pour l'évaluation, le métro léger a obtenu un score d'évaluation total supérieur de 0,5% seulement à l'alternative classée numéro 2, les bus articulés. Par ailleurs, le troisième système au classement, le tramway moderne, n'était inférieur que de 10,7%, ce qui n'était pas excessif.

Tableau 2 – Scores d'évaluation totaux

Système alternatif	Score d'évaluation total
ML	837
Autobus articulés	835
Tramway moderne	762



De manière à évaluer la robustesse globale du résultat pour les deux premières alternatives, les facteurs de critères ont été ajustés par le dépositaire d'enjeu comme suit :

- Le facteur de critères pour les critères « avantages primaires pour l'utilisateur » a été réduit de 0,30 à 0,25. Dans ce groupe, le ML a obtenu le meilleur score.
- Le facteur de critères pour les critères « problèmes liés aux coûts » a été augmenté de 0,10 à 0,15. Pour ce critère, l'autobus articulé a obtenu le meilleur score et une moyenne supérieure au ML.

Les résultats de ces modifications pour les trois systèmes sont donnés au Tableau 3.

Tableau 3 - Test de sensibilité

CRITÈRES	Variation du facteur de critères	Score d'évaluation des critères originaux			Score d'évaluation des critères révisés		
		ML	BUS	TRAM	ML	BUS	TRAM
Avantage primaire pour l'utilisateur	-0,05	296	266	242	276	248	230
Problèmes liés aux coûts	+0,05	61	100	72	73	120	76

Les scores d'évaluation totaux des trois systèmes pour le test de sensibilité sont donnés au Tableau 4. Avec les petites modifications apportées aux facteurs de critères, le score du ML chute au-dessous de celui de l'autobus articulé. Néanmoins, les deux premiers systèmes maintiennent leur avance sur le tramway moderne qui reste pratiquement inchangé.

Tableau 4 - Scores d'évaluation sensibilisés

Système alternatif	Score d'évaluation total
ML	830
Autobus articulés	836
Tramway moderne	756

Le ML et l'autobus articulé ont obtenu des scores d'évaluation totaux pratiquement similaires. Toutefois, il existe des différences entre les deux systèmes :

- Le ML était supérieur pour les critères « avantages primaires » et « avantages secondaires pour l'utilisateur », ce qui signifiait qu'il répondait mieux aux exigences de transport et à l'expérience de déplacement des utilisateurs potentiels.
- L'autobus articulé était supérieur pour les critères « impact primaire du système alternatif », « impact secondaire du système alternatif » et « problèmes liés aux coûts », ce qui signifiait qu'il se comportait mieux en termes de fiabilité, fonctionnement, maintenance et de son impact sur l'environnement et l'emploi à Cali.

## 7. CONCLUSIONS

Sur le plan technique, les trois systèmes semblent être viables et aucun ne peut être identifié comme étant sensiblement meilleur que les autres.

La principale conclusion de l'étude était que les autobus articulés donnent un système plus flexible et adaptable en termes de fiabilité, fonctionnement et maintenance tandis que les systèmes à infrastructure fixe tels que le métro léger ou le tramway moderne offrent de plus grands avantages en termes de couverture et accessibilité ainsi que d'intégration et sécurité.

Le passage modal au système alternatif entraînera une hausse du nombre d'utilisateurs de transports en commun, mesuré par le nombre total de passagers en semaine et la durée moyenne des trajets. Les sous-critères et attributs mesurent également les

avantages en termes de désencombrement pour les autres utilisateurs des routes. En conséquence, la sécurité routière, l'encombrement des routes et l'environnement devraient être améliorés ainsi que l'usage accru des transports en commun.

## **8. RÉFÉRENCES**

Municipalité de Santiago de Cali, Département de l'urbanisme, (1998), « Données et chiffres de Cali »

Cal y Mayor, (1997), « Étude de la demande de transports en communs SITM à Cali »

J.de.D.Ortuzar & L.G Willumsen», (1998), « Modéliser les transports