

Conception optimale d'une Ligne TGV à l'aide d'une approche SIG-AHP

Ayoub FATIHI ¹, Reda YAAGOUBI ²

Résumé

Dans cet article, nous présenterons une approche basée sur les systèmes d'information géographique (SIG) et l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) afin de choisir la conception optimale d'une Ligne de Train à Grande Vitesse (TGV) qui fera le relié entre Casablanca à Marrakech. Une telle conception servira à respecter les exigences relatives au coût de construction et à la durabilité. Les critères qui ont été considérés dans cette études sont : la pente, l'utilisation des sols, la géologie et la proximité des lacs, des rivières et des routes. L'estimation des coûts a été calculée sur la base de la valeur de l'acquisition des terres, des matériaux de construction et des coûts de construction. Les résultats de ce travail montrent le potentiel de l'utilisation des SIG pour la prise de décision en se basant les analyses multicritères, notamment la méthode AHP.

Mots-clés

SIG— Analyse multicritère — AHP

¹ Étudiant au Département des Sciences Géomatiques et Ingénierie en Topographie, IAV Hassan II, Rabat, MAROC

² PhD, Enseignant au Département des Sciences Géomatiques et Ingénierie en Topographie, IAV Hassan II, Rabat, MAROC

Table de matières

Introduction	1
1 Revue de la littérature	1
2 Approche méthodologique	2
2.1 Analyse Hiérarchique des Processus (AHP)	2
2.2 Zone d'étude	3
2.3 Facteurs et acquisition des données	3
2.4 Prise de décision	3
2.5 Modélisation SIG	3
3 Résultats	3
3.1 Prise de décision	3
3.2 Modélisation SIG	4
Le chemin optimal • Estimation des coûts	
4 Conclusion	4
Références	4

Introduction

Le TGV a fait une révolution dans le monde des chemins de fer depuis son apparition. En fait, il a modifié la connectivité entre les agglomérations démographiques et réduit considérablement la durée des voyages. Il assure aux gens le trio vitesse, sécurité et confort à un prix abordable. Avec la croissance accélérée de l'économie et de la population au cours des dernières décennies, le Maroc avait déjà commencé à mettre en place des lignes de TGV. La première ligne reliant Tanger à Casablanca a connu un grand succès. La durabilité est un facteur important qu'il faut prendre en

considération lors de la conception des lignes TGV. En effet, il est nécessaire d'étudier l'impact environnemental des lignes de TGV afin d'éviter tout déséquilibre des écosystèmes. Cette biodiversité pourra être altérée par la construction des corridors ferroviaires nécessaires pour la sécurité et le bon fonctionnement du TGV. Le choix du corridor optimal pour un TGV est un problème de prise de décision à multiples critères dont la composante spatiale est primordiale. Ainsi, il sera pertinent d'adopter une approche SIG pour résoudre de tels problèmes.



Figure 1. TGV Maroc : chemins de fer actuels et projets futurs

1. Revue de la littérature

L'analyse décisionnelle multicritères (MCDA : MultiCriteria Decision Analysis) ou la prise de décision à multiples

critères (MCDM : MultiCriteria Decision Making) consiste à sélectionner les meilleures alternatives parmi un vaste ensemble de critères d'analyse conflictuels et concurrents [Janic, 2003]. Le SIG est défini comme un système d'information composé de données, de personnes, de méthodes, de matériel informatique et de logiciels pour la gestion et le partage de l'information spatiale. Tout processus de prise de décision peut être structuré en trois grandes phases : intelligence (intelligence), conception (design) et choix (choice)

[Malczewski, 1999].

Parmi les principaux problèmes impliquant l'utilisation des SIG dans la prise d'une décision, on trouve : l'adéquation du terrain, l'évaluation du plan/scénario, la recherche/sélection du site, l'allocation des ressources, l'itinéraire/le calendrier des transports/véhicules, l'évaluation de l'impact, l'allocation des emplacements ... [Malczewski, 2006].

Dès les années quatre-vingt-dix, les recherches sur l'intégration des SIG et des analyse décisionnelle multicritères (MCDA) ont connu une progression remarquable

[Malczewski, 2006].

Ceci souligne l'importance et l'efficacité de l'analyse décisionnelle multicritères basée sur les SIG dans l'environnement décisionnel.

À titre d'exemples, pour le tracé d'un oléoduc dans la mer Caspienne, Feldman et al [Feldman et al., 1995] ont utilisé les systèmes d'information géographique (SIG) et les données de télédétection afin de sélectionner la voie la moins coûteuse, en tenant compte de la longueur de l'oléoduc, de la topographie, de la géologie, de l'utilisation des terres, des croisements de chemins de fer et de routes, des ruisseaux et des zones humides. Dans une autre étude [Kim et al., 2013], l'auteur a modélisé un éventuel tracé de train à grande vitesse en mettant en œuvre un SIG dans un environnement décisionnel. En commençant par la phase de pré-modélisation qui comprend l'identification des facteurs, la collecte de données, la classification des facteurs et la détermination de l'importance de chacun d'entre eux à l'aide de la méthode AHP. La deuxième phase consistait à la modélisation SIG en utilisant les poids des facteurs pour définir le chemin optimal.

AHP : processus de hiérarchie analytique (Analytical Hierarchy Process), est une méthode structurée utilisée pour prendre des décisions de manière organisée, pour ce faire le problème doit être modélisé en le représentant dans une hiérarchie ou une structure de réseau. Les relations au sein de la structure sont établies par des comparaisons par paires (deux à deux)[Saaty, 1987].

2. Approche méthodologique

2.1 Analyse Hiérarchique des Processus (AHP)

L'Analyse Hiérarchique des Processus (Analytical Hierarchy Process), est une méthode utilisée pour prendre des décisions de manière organisée. Elle consiste à modéliser un problème selon une structure hiérarchique ou en réseau. Les relations au sein de cette structure sont établies par des comparaisons

par paires (deux à deux)[Saaty, 1987].

L'AHP consiste en 6 étapes qu'on les résumer comme suit [Saaty, 1987] :

1^{ère} étape : Décomposition du problème en une hiérarchie avec le but au sommet, et vers le bas les critères, les sous critères, niveaux, sous niveaux et les alternatives.

2^{ème} étape : Construction de la matrice de décision basée sur l'échelle de Saaty de 9 points. L'évaluation de 1 indique une importance égale 3 modérément plus, 5 fortement plus, 7 très fortement et 9 indique une importance extrêmement élevée. Les valeurs de 2, 4, 6 et 8 sont attribuées pour indiquer les valeurs de compromis de l'importance.

3^{ème} étape : Comparaison deux à deux des éléments de la hiérarchie construite. L'objectif est de fixer leurs priorités relatives par rapport à chacun des éléments du niveau immédiatement supérieur. La matrice de comparaison par paires, qui est basée sur l'échelle 1-9 de Saaty, où A représente la matrice de comparaison par paires, W le vecteur propre (eigenvector) et max la valeur propre (eigenvalue) la plus élevée. S'il existe des éléments aux niveaux supérieurs de la hiérarchie, le vecteur de poids obtenu est multiplié par les coefficients de poids des éléments aux niveaux supérieurs de la hiérarchie jusqu'à ce que le sommet de la hiérarchie soit atteint. L'alternative ayant la valeur la plus élevée du poids est prise comme la meilleure alternative. Si $\frac{n(n-1)}{2}$ com-

paraisons sont cohérentes avec n étant le nombre de critères, alors les éléments a_{ij} satisferont les conditions suivantes : $a_{ij} = w_i/w_j = 1/a_{ji}$ et $a_{ii} = 1$ avec $i, j, k = 1, 2, \dots, n$. Dans la matrice de comparaison, a_{ij} peut être interprété comme le degré de préférence du ième critère par rapport au jème critère.

4^{ème} étape : Calcul de l'indice d'incohérence (ou ratio de cohérence) pour refléter la cohérence des jugements des décideurs pendant la phase d'évaluation. L'indice d'incohérence de la matrice de décision et des matrices de comparaison par paires peut être calculé avec l'équation : $CI = \max - n/(n-1)$. Plus l'indice d'incohérence est proche de zéro, plus la cohérence est grande. La cohérence des évaluations est assurée si l'égalité $a_{ij} - a_{ik} = a_{jk}$ se vérifie pour tous les critères. L'indice pertinent doit être inférieur à 0,10 pour accepter les résultats de l'AHP comme cohérents. Si ce n'est pas le cas, le décideur doit revenir aux étapes 2 et 3 et refaire les évaluations et les comparaisons.

5^{ème} étape : Normalisation de la matrice de comparaison. Chaque colonne doit être divisée par la somme des entrées de la colonne correspondante. De cette façon, on obtient une matrice normalisée dans laquelle la somme des éléments de chaque colonne est égale à 1.

6^{ème} étape : Calcul des valeurs propres de cette matrice qui donneront les poids relatifs des critères. Les poids relatifs obtenus dans la troisième étape doivent vérifier $A \times W = \max \times W$.

2.2 Zone d'étude

Le point de départ de la ligne TGV à concevoir est la ville de Casablanca. Pour la destination, il s'agit de la ville de Marrakech. Par conséquent, la zone d'étude s'étale sur les régions de Casablanca-Settat et de Marrakech-Safi (2). Casablanca joue un rôle important en tant que le plus grand pôle industriel et économique du Maroc, elle est entourée principalement de zones industrielles et de zones urbaines. Une partie de la frontière entre les régions Casablanca-Settat et Marrakech-Safi suit le cours de la rivière Oum Er-Rbia, qui coule vers le nord-ouest jusqu'à l'Atlantique à Azemmour. Le fleuve divise la zone en deux plaines fertiles : Doukkala et Chaouia.

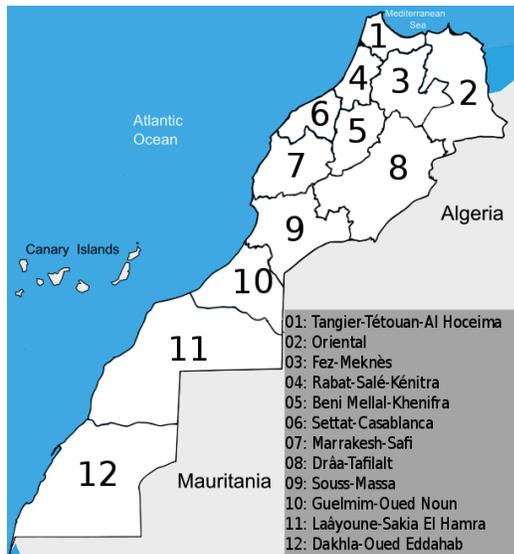


Figure 2. Régions du Maroc [CWp, 2020]

2.3 Facteurs et acquisition des données

Les facteurs qui influencent le choix du corridor optimal pour la ligne de TGV entre les villes de Casablanca et Marrakech sont : La pente, l'utilisation des sols, la géologie, proximité aux lacs, l'intersection avec les rivières et les routes.

Pente

La couche matricielle de pente a été extraite d'un MNT (modèle numérique de terrain) d'une résolution de 30 m.

Utilisation des sols

Pour obtenir l'utilisation des terres, une classification supervisée a été réalisée des images satellitaires acquises par Landsat 8.

Géologie - Lacs - Rivières - Routes

Toutes ces données ont été collectées dans un format vectoriel, puis transformées en raster d'une résolution de 30 m.

2.4 Prise de décision

Pour décider du corridor optimale de la ligne de TGV à concevoir, nous utiliserons la méthode AHP dans un environnement SIG. La méthode AHP permet de définir le poids de

chaque facteur choisi, après sa comparaison par paire avec les autres facteurs. Chaque critère est subdivisé en plusieurs sous-critères, et chaque sous-critère aura un poids variant entre 0 et 1. Les facteurs avec le faible poids signifie qu'ils auront une faible contribution en terme de coût globale de construction de la ligne TGV. Pour ce travail, nous avons considéré le travail Yildirim et al. [Yildirim and Bediroglu, 2019] pour extraire les poids de nos critères et sous-critères.

2.5 Modélisation SIG

Cette pondération des critères et sous-critères est utilisée pour calculer le raster des coûts. Ce raster sert à calculer le chemin le plus optimal en considérant les différents critères. Ensuite, un processus de lissage est utilisé pour répondre aux paramètres de construction des rails à grande vitesse, en particulier la courbe qui doit être d'un minimum de 7 km [Kim et al., 2013]. Par la suite, le prix de construction du corridor sera estimé.

3. Résultats

3.1 Prise de décision

La table 1 résume les poids des critères à utiliser dans notre cas d'étude.

Table 1. Poids des critères and sous-critères

Critère	Poids AHP	Poids ss-critérian
Rivières	0.1009	
0 to 150m		0.9
150m to 250m		0.7
250m to 500m		0.3
Routes	0.0308	
0 to 250m		0.7
Pente (°)	0.3588	
0 to 5		0.1
5 to 10		0.2
10 to 20		0.6
20 to 30		0.7
30 to 40		0.8
40 to 90		0.9
Géologie	0.2558	
Calcaire		0.4
Chiste		0.7
Roches métamorphiques		0.5
Sable		0.8
Utilisation du sol	0.1862	
Urbain		0.6
Terrain nu		0.1
Forêt		0.7
Agriculture		0.2
Lacs	0.0675	
0 to 1 km		0.9

3.2 Modélisation SIG

L'ensemble du flux de travail est fait à l'aide d' ArcGIS Pro.

3.2.1 Le chemin optimal

La figure 3 représente le raster des poids issus du processus AHP et le chemin optimal.

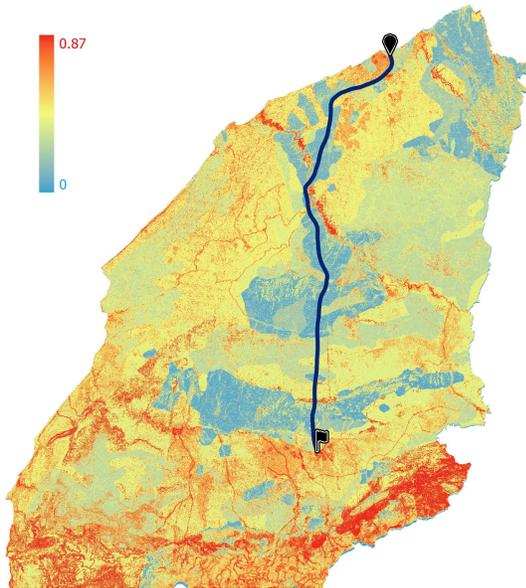


Figure 3. Raster des poids et route optimale

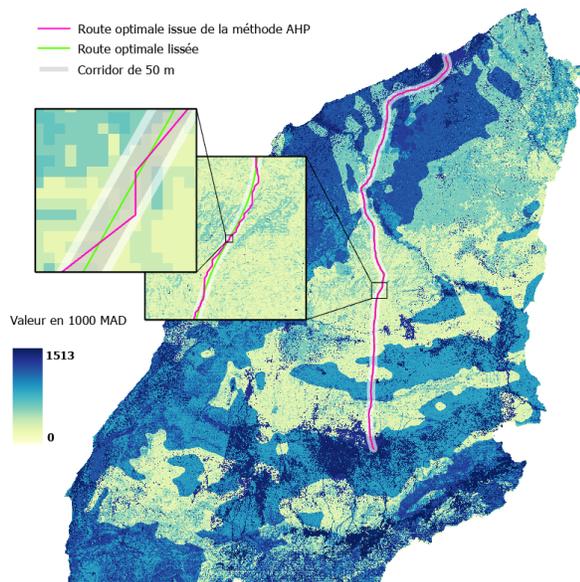


Figure 4. Raster des coûts , corridor de 50 m et route optimale

3.2.2 Estimation des coûts

Pour estimer le coût final du corridor de la ligne TGV entre Casablanca et Marrakech, un raster 4 avec une résolution de

30 m a été créé en combinant : la valeur de l'acquisition des terres, le coût des matériaux de construction et les coûts de construction. Les zones protégées ont été masquées puis un corridor de 50 mètres a été créé. La totalité des pixels constituant le corridor a été utilisée pour calculer le coût sous-total. Ensuite, les coûts des rails, des ponts et des passages ont été ajoutés. Le tableau 2 résume l'estimation du coût de la construction de la ligne grande vitesse en dollars américains.

Table 2. Estimation des coûts

	Unit	Quantité	Coût / Unité	Coût
Acquisition des terres	px	64375	variable	860,769,500
Construction de la voie ferrée	km	290	15,000,000	4,350,000,000
Construction de passages	unitaire	271	100,000	27,100,000
Construction de ponts	unitaire	4	800,000	3,200,000
TOTAL				5,241,069,500.00

4. Conclusion

Cette étude démontre l'efficacité de la combinaison du SIG et la méthode AHP dans la conception des lignes TGV. Le coût final estimé par cette étude est d'environ 5,24 milliards de dollars. L'ordre de grandeur de ce coût est proche de celui du projet de la LGV liant Tanger à Casablanca qui a coûté 4,41 milliards de dollars.

Références

- [CWp, 2020] CWp (2020). Regions of Morocco - Wikipedia by Contributors to Wikimedia projects.
- [Feldman et al., 1995] Feldman, S. C., Pelletier, R. E., Walser, E., Smoot, J. C., and Ahl, D. (1995). A prototype for pipeline routing using remotely sensed data and geographic information system analysis. *Remote Sensing of Environment*, 53(2):123–131.
- [Janic, 2003] Janic, M. (2003). Multicriteria evaluation of high-speed rail, Transrapid Maglev and air passenger transport in Europe. *Transportation Planning and Technology*, 26(6):491–512.
- [Kim et al., 2013] Kim, H. Y., Wunneburger, D. F., and Neuman, M. (2013). High-Speed Rail Route and Regional Mobility with a Raster-Based Decision Support System: The Texas Urban Triangle Case. *Journal of Geographic Information System*, 05(06):559–566.
- [Malczewski, 1999] Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. J. Wiley & Sons.
- [Malczewski, 2006] Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7):703–726.
- [Saaty, 1987] Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5):161–176.
- [Yildirim and Bediroglu, 2019] Yildirim, V. and Bediroglu, S. (2019). A geographic information system-based model for economical and eco-friendly high-speed railway route determination using analytic hierarchy process and least-cost-path analysis. *Expert Systems*, 36(3):608–617.