

Optimisation d'un réseau de transport durable : le pré et le post acheminement des marchandises import-export du Mali

Yapégué Bayogo

Enseignant-chercheur à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Institut Universitaire de Gestion (IUG), République du Mali

Lassina Togola

Enseignant-chercheur à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Faculté des Sciences Economiques et de Gestion (FSEG), République du Mali

Ahmadou Halassi Dicko

Enseignant-chercheur à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Institut Universitaire de Gestion (IUG), République du Mali

[Doi: 10.19044/esipreprint.10.2024.p119](https://doi.org/10.19044/esipreprint.10.2024.p119)

Approved: 07 October 2024
Posted: 09 October 2024

Copyright 2024 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Bayogo Y., Togola L. & Dicko A.H. (2024). *Optimisation d'un réseau de transport durable : le pré et le post acheminement des marchandises import-export du Mali*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.10.2024.p119>

Résumé

La continentalité du Mali fait que les produits importés et exportés ont un long parcours. L'objectif de l'étude est d'analyser la conception d'un réseau de transport en optimisant les flux et en tenant compte des impacts environnementaux. L'approche méthodologique s'est focalisée d'une part sur des recherches documentaires basées sur la lecture et l'analyse des ouvrages, des rapports d'activités, des articles scientifiques, des thèses de Doctorat et des sites Internet, d'autre part, des explorations de terrain faites avec un guide d'entretien ont permis d'obtenir des résultats. Enfin, un modèle d'optimisant faisant apparaître les trois paramètres a été formulé et testé avec le logiciel LINGO 11.00. Les résultats obtenus indiquent qu'en minimisant les temps et les coûts de pré et de post transport, nous pouvons considérablement réduire les effets des transports sur l'environnement. De même, des mesures de réduction des coûts de transport et des temps de

parcours ont été proposés. La mise en œuvre des mesures proposées permet de réduire les coûts logistiques, de minimiser le temps de parcours des marchandises et d'atténuer aussi les effets du transport des marchandises sur l'environnement.

Mots clés : Optimisation ; transport durable ; préacheminement ; post-acheminement ; Mali

Optimization of a sustainable transport network: the pre-and post-carriage of import-export goods from Mali

Yapégué Bayogo

Enseignant-chercheur à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Institut Universitaire de Gestion (IUG), République du Mali

Lassina Togola

Enseignant-chercheur à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Faculté des Sciences Economiques et de Gestion (FSEG), République du Mali

Ahmadou Halassi Dicko

Enseignant-chercheur à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Institut Universitaire de Gestion (IUG), République du Mali

Abstract

The continental nature of Mali means that imported and exported products have a long journey. The objective of the study is to analyse the design of a transport network by optimising flows and taking into account environmental impacts. The methodological approach focused on the one hand on documentary research based on the reading and analysis of works, activity reports, scientific articles, Doctoral theses and websites, on the other hand, Field explorations carried out with an interview guide made it possible to obtain results. Finally, an optimization model showing the three parameters was formulated and tested with LINGO 11.00 software. The results obtained indicate that by minimizing pre- and post-transport times and costs, we can significantly reduce the effects of transport on the environment. Likewise, measures to reduce transport costs and travel times have been proposed. Implementation of the proposed measures makes it possible to reduce logistics costs, minimize the travel time of goods and mitigate the effects of transport of goods on the environment.

Keywords: Optimization; sustainable transport; pre-routing; post-delivery; Mali

Introduction

Dans les pays en développement, le système de transport routier occupe une place importante à cause de sa flexibilité et les bas prix des infrastructures et des matériels roulant (Bayogo, 2021). Les grandes tendances et la forte croissance économique, le boom démographique, la forte croissance d'industrialisation et la hausse de la productivité industrielle accroissent considérablement le volume des marchandises transportées (Seguin, 2009). Le volume des marchandises transportées ne cesse d'accroître et les impacts des transports sur l'environnement se multiplient (Seguin, 2009). Les émissions de gaz dans l'atmosphère, les bruits sonores ainsi que les différentes vibrations provoquées par le matériel de transport lors du transport des marchandises contribuent à la pollution et au changement climatique (Bayogo, 2021). Les obstacles sont notamment l'absence de normes mondiales permettant de mesurer les résultats obtenus en matière de transport durable, l'accès limité aux technologies, le manque de coordination au niveau mondial, l'inadéquation et l'insuffisance de l'accès au financement, le manque d'investissement, le déficit d'infrastructures et le mauvais entretien des infrastructures existantes (CNUCED, 2018).

Le transport routier des marchandises joue un rôle important dans les échanges internationaux d'un pays enclavé. La République du Mali est un pays sans littoral, situé au cœur de l'Afrique occidentale. Avec la croissance économique, le volume des marchandises à transporter a augmenté considérablement. Le transport routier facilite le pré et le post acheminement des marchandises maliennes vers les ports des pays voisins. La route assure plus de 90% du transport des marchandises (DNTTMF, 2020). Le vieillissement du parc automobile et l'insuffisance des infrastructures routières entraînent des problèmes de pollution de l'environnement. Il est important de tenir compte du transport durable dans les importations et les exportations des marchandises au Mali.

Après l'introduction, le reste de l'article est structuré en quatre parties. La première partie porte sur la revue de la littérature. Dans la deuxième partie l'accent est mis sur les matériels et méthode. La troisième et la quatrième partie présentent respectivement les résultats et la discussion. Enfin, l'étude se termine par une conclusion.

1. Revue de la littérature

Dans le secteur du transport de marchandises, les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dépendent fortement de l'organisation de la chaîne logistique (de l'extraction des matières premières à la vente du produit fini), mais aussi, des choix technologiques et des modes de transports. Le secteur des transports est le premier consommateur de produits pétroliers et le premier émetteur de gaz à effet de serre. Il est donc impératif de réduire le niveau de consommation d'énergie des transports et de s'orienter vers des modes ayant moins d'impacts sur l'environnement, tels que : les rails et les voies navigables (Sawadogo, 2018). Pour les régulateurs, la réorganisation des transports est considérée sous l'angle de la viabilité financière, de la qualité du service, de la cohérence globale avec les outils de planification et de la conformité avec les standards internationaux. D'un point de vue plus rhétorique, le système de transport est présenté comme un moyen efficace d'accroître l'équité spatiale et de mettre en œuvre les principes de la durabilité. Pour les usagers, ces transformations posent surtout la question de l'accessibilité comme facteur de réduction de la pauvreté (Vermeulin et Khan, 2010). Le secteur des transports est une composante essentielle de l'économie. En Afrique, il fait face à un certain nombre de défis dont l'usage massif des carburants d'origine fossile qui s'accompagne des émissions de polluants responsables de la détérioration de la qualité de l'air et des changements climatiques. Il devient alors urgent de proposer un nouveau type de transport qui soit convivial, à coûts abordables et avec un faible impact négatif sur l'environnement (Tchanche, 2018). Un système de transport durable doit obéir à plusieurs critères. Il doit non seulement être écologique, en produisant le moins d'effets négatifs sur l'homme et son environnement, mais, il doit aussi être efficace, contribuer à la croissance économique, contribuer au désenclavement, être accessible à toute la population et être convivial (Tchanche, 2018).

En matière de transport et de mobilité, il met un accent particulier sur le maillage du territoire national par des réseaux d'infrastructures. Des corridors de transports internes et sous régionaux par voie routière ou ferroviaire sont proposés pour développer les échanges et diminuer les coûts de transactions. L'entretien des routes et des pistes rurales est prévu pour maintenir la qualité du réseau existant (SSATP, 2020). L'étude faite dans (Special Report TRB 279, 2004) a montré que les moyens de transport déversent des huiles moteurs et des produits chimiques dans la terre et dans les eaux de mer ou de fleuve qui constituent, aussi, une source importante de pollution de l'environnement. Les rapports de l'OCDE (2006) établissent le lien entre les transports et la pollution de l'air. Ces mêmes rapports montrent que le secteur des transports impacte l'environnement à travers le dégagement des gaz à effets de serre, les bruits sonores du matériel de

transport, les vibrations causées par ces matériels et la production de particules fines dangereuses. (Mahrous, 2012) a développé un modèle pour le système de transport multimodal d'une zone urbaine en utilisant un système géo-information avec pour objectif de choisir la route, un réseau prenant en compte la minimisation du coût total de transport et en considérant le minimum de transfert. (Bernard et Jacob, 2016) ont développé des technologies ITS pour réduire la consommation des véhicules de poids lourds en énergie fossile et les émissions de CO₂ dans le but d'assurer la sécurité et le respect des normes du transport. (McKinnon et Piecyk, 2010) ont fait des recherches sur les techniques de mesure et de gestion des émissions de carbones dans le secteur des transports et en particulier le transport routier des marchandises. Leur étude a permis d'établir un lien entre le volume de marchandises transportées, la distance de parcours et le coefficient d'émission. Selon leur étude, il existe une relation directe entre le carbone émit est nul, s'il n'y a pas de parcours. Leur étude nécessite des améliorations, car, l'immobilisation du matériel de transport provoque des émissions tant que le moteur n'est pas éteint. (Bektas et Crainic, 2007) ont utilisé une relation directe liant les émissions de carbones à la distance parcourue pour évaluer la taxe carbone. Selon leur étude la taxe carbone s'obtient en faisant une simple multiplication de quatre paramètres, à savoir : la distance, le volume des marchandises, le coefficient et la taxe prévue par les pays. (Boliang et al, 2015) ont analysé la possibilité du transport vert de marchandises en proposant le transfert d'une partie des marchandises de la route plus polluante au ferroviaire moins polluant.

2. Matériel et méthode

Pour la méthode adoptée, nous avons dans un premier temps procédé à des recherches documentaires basées sur l'analyse des ouvrages, des rapports d'activités, des thèses de Doctorat, des articles scientifiques, des mémoires universitaires et l'exploration des sites Internet. Dans un second temps, nous avons mené des enquêtes de terrain à l'aide d'un guide d'entretien. Le choix de la méthode qualitative est justifié par le fait qu'elle nous apporte des informations qualitatives. Le modèle d'optimisation qui prend en compte les trois paramètres permet d'analyser le problème et de justifier la pertinence de la minimisation des coûts et des délais d'acheminement des produits. Le guide d'entretien a été conçu pour 2 logisticiens transitaires, 2 agents de la Direction Générale des transports, 3 chargeurs, 2 transporteurs et 2 conducteurs de véhicules de poids lourds. Le tableau ci-dessus illustre le code des personnes interviewées.

Tableau 1 : codage des personnes enquêtées

| Initial | Code | Fonction |
|----------------------|-----------------|--------------------------------|
| T. T. ; H. S. | LT1 ; LT2 | Logisticiens transitaires (LT) |
| M. K. ; B. D. | DT1 ; DT2 | Agents de la DGT (DT) |
| A. T. ; Y. D ; H. B. | Ch1 ; Ch2 ; Ch3 | Chargeurs (Ch) |
| M. O. ; D. T. | T1 ; T2 | Transporteurs (T) |
| M. D. ; S. C. | Co1 ; Co2 | Conducteurs (Co) |

Source : enquêtes personnelles, 2024

Dans le tableau ci-dessus, nous avons illustré l'initial des personnes interviewées. Pour des raisons d'éthique, leur initial a été gardé dans l'anonymat. Nous avons effectué un codage à posteriori dans une logique de thématisation (catégorisation séquencée). Ainsi, LT est attribué aux logisticiens transitaires, DT aux agents de la Direction Générale des Transports, Ch aux chargeurs, T aux transporteurs et enfin Co est utilisé pour codifier les conducteurs. L'exploration de terrain nous a permis d'obtenir des données que nous avons traitées et analysées. Un modèle d'optimisation inspiré du modèle de transport multimodal décrit par Yi (Qu Tolga Bektas et Julia Bennell, 2016) confirme les hypothèses déjà justifiées par notre étude qualitative.

3. Résultats

La troisième section de notre article se focalise sur l'analyse et l'interprétation des résultats. Les enquêtes de terrain ont permis d'obtenir des informations sur les réseaux de transports utilisés pour les pré- et post-transports des marchandises, sur les facteurs explicatifs de la cherté des coûts et des pertes de temps sur ces réseaux. Des mesures de réduction des coûts et des pertes de temps ainsi que les impacts environnementaux ont été analysées.

3.1. Difficultés rencontrées par les chargeurs et les transporteurs lors des opérations de pré et de post transport des marchandises

L'étude montre que les difficultés auxquelles sont confrontées les chargeurs lors de leurs opérations de pré et de post transport de marchandises sont entre autres : la lenteur dans le traitement des dossiers et même dans les opérations logistiques comme la manutention, le dédouanement, les formalités du transport ou la traversée des frontières. De même, d'autres difficultés comme le nombre élevé de postes de contrôle, le mauvais état des infrastructures ainsi que la vétusté du parc automobile. Ainsi, selon LT1, « *Les difficultés rencontrées par les chargeurs et les transporteurs lors des opérations de pré et de post transport des marchandises sont : la lenteur du traitement des documents administratives, les poids excédentaires des marchandises, le mauvais état des routes, le contrôle abusif des*

marchandises aux postes frontaliers » alors que T1 met l'accent sur la congestion routière. Selon T1, « *Les difficultés des chargeurs et les transporteurs lors des opérations de pré et de post transport des marchandises sont : Le mauvais état du parc automobile, le mauvais état des routes, la Congestion des zones portuaires, la multiplicité des postes de contrôle sur des routes* ». Quant à DT1, Ch1 et Ch2, il faut ajouter la défaillance des réseaux ferroviaires pour lesquels, le coût du transport est relativement moins cher, les marchandises sont plus sécurisées et les impacts environnementaux sont plus faibles que les réseaux routiers. DT1 raconte, « *le mauvais état de route sur le corridor Dakar –Bamako et la voie ferrée, qui date de l'époque coloniale et manque d'entretien sont des difficultés d'acheminement des marchandises sur cet axe* ». T2, LT2, Co1 et Co2 pensent que ces difficultés sont surtout dues à la manutention des colis, la nature et la difficile appréhension des colis à expédiés. Selon T2, « *Les difficultés liées à la manutention des colis, les difficultés liées à la nature des colis et les difficultés dans l'appréhension des colis constituent un casse-tête pour les opérateurs* ». LT2 analyse les problèmes sous un autre angle. Selon LT2, « *En amont, les chargeurs et les transporteurs peuvent avoir comme difficultés un manque de confiance ; la planification des opérations du transport, la gestion du coût de transport. En aval, il peut y avoir des difficultés comme le respect du délai d'arrivée, la perte de qualité de service, la meilleure gestion des risques de transport* ». L' étude a montré que ces difficultés sont multiples et il urge d'envisager des mesures de réduction.

3.2. Impacts environnementaux des prés et post transport des marchandises

Selon nos recherches, les impacts environnementaux des prés et post transport des marchandises sont énormes et concernent essentiellement : la pollution de l'air, de l'eau, la dégradation des infrastructures de transport, les nuisances sonores, les vibrations, etc. Selon LT1, Ch1 et Ch2, les transports sont des sources de pollutions environnementales. LT1 pense que : « *les impacts environnementaux des prés et post transport des marchandises sont : la pollution des eaux, de l'environnement à travers les émissions des Gaz à Effet de Serre comme le CO, le CO₂, les composés de NO_x et de SO_x, la dégradation des routes* ». Selon DT1, « *la Pollution de l'air, de l'eau, la contribution au changement climatique sont causées par le transport des marchandises* ». D'autres intervenants comme T1, T2, Co1 et Co2 évoquent la destruction de la couche d'ozone, la pollution de l'air et les nuisances sonores. Pour T1 et Co2, « *Le secteur du transport est le premier émetteur de gaz à effet de serre et ses impacts sur l'environnement sont nombreux : la pollution de l'air, de l'eau, la nuisance sonore, la modification des paysages ou encore la contribution au changement climatique* ». D'après T2 et Co1,

« *La détérioration de la couche d'ozone, la pollution de l'air, la dégradation des routes, les surcharges des camions, le non-respect du poids et les risque d'accident* ». LT2, DT1 et DT2 pensent que la construction des infrastructures de transport cause des dégâts importants sur l'écosystème. Selon eux, « *En amont, le transport des marchandises constitue un danger spectaculaire pour l'environnement, car, le transport consomme beaucoup d'énergie qui dégrade l'atmosphère de façon générale. En aval, la construction des infrastructures routières provoque des dégâts sur l'écosystème* ».

3.3. Facteurs explicatifs de la cherté des coûts et des pertes de temps sur ces réseaux de pré et de post transport

L'étude a permis d'identifier quelques facteurs qui expliquent la cherté des coûts de transport des marchandises, ainsi que les facteurs explicatifs des pertes de temps sur les réseaux de pré et de post transport des marchandises.

3.3.1. Cherté des coûts sur les réseaux de transport

La cherté des coûts sur les réseaux de transport s'explique par un certain nombre de facteurs qui sont :

- La flambée des prix du pétrole pousse les transporteurs à réviser leur frais de prestation. LT1 « *pense que les frais de carburant, de douane, de main d'œuvre et les péages sont des facteurs qui expliquent la cherté des coûts de pré et de post transport des marchandises* ». LT2 témoigne que « *les facteurs explicatifs du coût élevé des pré et post transport s'expliquent par la flambée du prix du carburant. Il y a également les risques liés aux intempéries au cours du transport des marchandises* » ;
- Les conflits régionaux qui se transforment souvent en conflit au-delà des frontières provoquent des crises d'acheminement des marchandises de première nécessité et la rareté de certains produits. Selon LT1, « *Les facteurs qui expliquent le coût élevé du pré et du post transport des marchandises sont : l'inflation du prix du carburant qui est due au conflit russo-ukrainien, le mauvais choix des INCOTERMS, les taxes sur marchandises à l'achat, le mode de transport des marchandises* » ;
- Les coûts élevés des opérateurs intermédiaires qui sont : le conditionnement et l'emballage, la conduite, l'entreposage, la manutention, les droits de traversés, les droits de douane et de transit, les frais accessoires liés aux intempéries. Le discours de T1 témoigne, « *les facteurs qui expliquent le coût élevé du transport des marchandises sont : la conduite, le déménagement, l'emballage,*

l'entreposage, l'étiquetage, le chargement, le déchargement, le coût du carburant, les taxes commerciales, les droits de douane, et bien d'autres ». Selon T2, « Naturellement, le coût de pré et post transport est élevé par rapport au coût du transport maritime, donc, le pré/post acheminement coûtera plus cher, car, il y a les frais, les taxes et les frais de péage. En plus, la capacité de transport est à prendre en compte sans oublier les coûts de la manutention ».

3.3.2. Pertes de temps sur les réseaux de transport

Chaque opération logistique nécessite du temps. Il est donc important de bien gérer les temps des différentes opérations intermédiaires afin d'avoir un meilleur temps pour toute la chaîne. Les pertes de temps sont souvent dues aux facteurs suivants :

- La lenteur administrative et les contrôles routiers. Selon LT1, *« Les facteurs qui expliquent les pertes de temps lors du pré et du post transport des marchandises sont : la lenteur des procédures administratives, les contrôles abusifs aux différents postes de douanes, le mode de conduite des conducteurs sur la route ».*
- La congestion routière, l'état des infrastructures et du matériel roulant. Selon T1, *« la congestion routière, l'usure des infrastructures routières, le risque d'accidents, le mauvais état des véhicules et la manutention manuelle sont des causes des pertes de temps ».* DT1 indique que *« le manque de coordination efficace entre les différents acteurs fournisseur, transporteur, client fait perdre beaucoup de temps lors de l'acheminement des marchandises sur les corridors » ;*
- Les barrières douanières avec des moyens de contrôle lents et inadaptés. Selon T2, *« a constaté que la libre circulation des personnes et des biens n'est pas appliquée par tous les pays, beaucoup de contrôles et beaucoup de barrières douanières constituent un frein à la libre circulation des biens et des personnes et occasionnent des pertes de temps énormes lors des pré et post acheminements des marchandises » ;*
- Les facteurs climatiques et techniques. Compte tenu de l'état des infrastructures, le facteur climatique peut causer la perte de temps à des endroits. Cela s'explique par la construction d'infrastructures sensibles à la pluviométrie par exemple. De même, les facteurs techniques qui s'expliquent par des technologies et des matériels non appropriés causent aussi des pertes de temps lors des opérations logistiques. Selon LT2, *« pense que les pertes de temps des pré et post transports sont liées à plusieurs facteurs, il peut y avoir des*

facteurs climatiques, des facteurs humains ou des facteurs techniques ».

3.4. Stratégies de réduction des coûts et des pertes de temps lors des opérations de pré et de post transports des marchandises

Cette section de l'étude vise à proposer des stratégies de réduction des coûts et des pertes de temps du transport des marchandises sur les réseaux de transport.

3.4.1 Stratégies de réduction des couts sur les réseaux de pré et de post transport

Pour réduire les coûts de transport sur les réseaux de pré et de post transport, les mesures suivantes pourront être envisagées :

- La révision des prix du carburant et des taxes : l'objectif de la communauté économique régionale est de réduire les barrières douanières et les contrôles pour favoriser la libre circulation des marchandises. Mais, ces conventions sont plus théoriques que pratiques. Selon LT1, « *Pour la réduction des coûts, il faudra une baisse du prix du carburant, une baisse des droit et taxes lors de la traversée des frontières et à l'achat des marchandises* » ;
- L'optimisation des itinéraires et du chargement des véhicules de transport : cette optimisation du transport permet de raccourcir les parcours et de diminuer les consommations de carburant et de réduire considérablement les coûts de pré et post transport. Plus le taux de chargement des véhicules est élevé, plus, le coût unitaire est bas (en évitant la surcharge). Le discours de T1 témoigne que « *pour réduire les coûts du transport des marchandises, il faut : évaluer le transport existant, optimiser les itinéraires de transport, optimisation du remplissage des camions, choisir des emballages adaptés, réduire les temps de trajet, réduire le poids des emballages, éviter les sur tonnage des marchandises...* » ;
- La rénovation et le développement des réseaux ferroviaires qui sont des modes de transports de masse, moins chers et mieux adaptés pour les pré et post acheminements des marchandises. Selon DT1, DT2 et Ch3, le chemin de fer paraît sûr, sécurisé et moins cher pour le transport des marchandises. Selon DT1 et Ch3, « *pour réduire les coûts du transport des marchandises, il faut avoir des bonnes routes, surtout un chemin de fer en bon état, des emballages robustes et bien dimensionnés qui protègent bien les produits* » ;
- L'application des réglementations en vigueur. Selon T2, « *Il est bon pour un premier temps d'appliquer les réglementations en vigueur avec la suppression de certains postes de contrôle et des barrières*

douanières, le renouvellement du parc-auto peut aussi constituer à une amélioration des coûts de pré/post transport, la réparation des routes, la construction des infrastructures adaptées au besoin, la réduction des formalités administratives et la création d'un guichet unique où les déclarations sont faites aux mêmes endroits » ;

- La révision des tarifs douaniers et la planification des itinéraires peuvent permettre aussi de réduire considérablement les coûts du transport des marchandises. Selon LT2, « *Pour réduire les coûts de transport, il faut une réduction du prix de carburant. Planifier l'itinéraire du transport de marchandises, réduire les tarifs douaniers* ».

3.4.2. Stratégies de réduction des pertes de temps sur les réseaux de pré et de post transport

Les mesures d'atténuation des pertes de temps lors des pré et post acheminement des marchandises sont multiples. Parmi ces multiples mesures, nous pouvons noter :

- La pratique d'une bonne logistique tout au long de la chaîne et une bonne méthode du processus d'approvisionnement. Selon LT1, « *Pour la réduction du temps de pré et de post transport des marchandises, il faut faire une bonne logistique de la marchandise du pays d'exportation jusqu' au pays d'importation. Il faut appliquer une bonne méthode d'approvisionnement des marchandises* » ;
- L'optimisation du transport, des expéditions et la révision l'état des véhicules : T1, Co1 et Ch3 pensent qu'il faut optimiser les opérations logistiques pour réduire les pertes de temps. Ainsi, selon T1, « *pense qu'il faut envisager quelques mesures pour réduire le temps de pré et de post transport des marchandises en optimisant le temps de transport, en évitant les risques d'accidents, en mutualisant les expéditions, en disposant de véhicules en bon état, puis, en évitant les surcharges des véhicules* » ;
- L'aménagement des lieux de manutention et l'accélération des opérations : les témoignages DT1, Ch1, et T2 illustrent ces mesures. Selon DT1 et Ch1, « *Il est nécessaire d'aménager les lieux de manutention, les ports et de prendre les mesures qui permettent d'accélérer les opérations de manutention et les autres opérations logistiques* » ;
- La construction d'infrastructures adaptées au besoin et la simplification des contrôles sont aussi des mesures de réduction des pertes de temps sur les corridors. Selon T2, « *la construction des infrastructures adaptées au besoin, la simplification des formalités et*

la suppression des barrières de contrôle pourront permettre de réduire les pertes de temps pendant le transport des marchandises » ;

- La proposition de délai raisonnable et l'imposition des pénalités de retard sont des mesures de réduction des pertes de temps lors des pré et post acheminement des marchandises racontent nos deux personnes interviewées (LT2 et Ch3). Ch3 a indiqué « *la sécurisation des marchandises pour le strict respect du délai d'arrivée ; qu'on propose un délai raisonnable pour le transport des marchandises ; qu'on utilise aussi les moyens de transport, les plus adaptés et les plus efficaces. De même, il propose d'amender en cas de non-respect du délai d'arrivée, d'où, il faut imposer des pénalités de retard pour obliger chacun à faire pleinement sa partition* ».

3.5. Modélisation d'un réseau de transport multimodal

3.5.1. Formulation du modèle

Notre modèle d'optimisation permet d'optimiser un réseau de transport multimodal pour lequel, il sera possible de faire la succession des modes de transport. Nous nous sommes inspirés des modèles d'optimisation de (Yun - He, Z., Lin, B. et Al., August 2006) et de la recherche menée par Yi Qu Tolga Bektas, Julia Bennell. (2016). Le but principal du modèle est de minimiser les émissions de gaz à effet de serre à travers la réduction du volume du trafic. La formulation du modèle est la suivante :

$$\min Z = \sum_{i,i+1} \sum_m C_{i,i+1}^m X_{i,i+1}^m + \sum_i \sum_{m,n} t_i^{m,n} y_i^{m,n} \quad (1)$$

Sous contraintes :

$$\sum_m X_{i,i+1}^m = 1, \forall (i, i+1) \quad (2)$$

$$\sum_{m,n} y_i^{m,n} = 1, \forall i \in \{1, 2, 3 \dots k\} \quad (3)$$

$$X_{i,i+1}^m, y_i^{m,n} \in \{0; 1\} \quad (4)$$

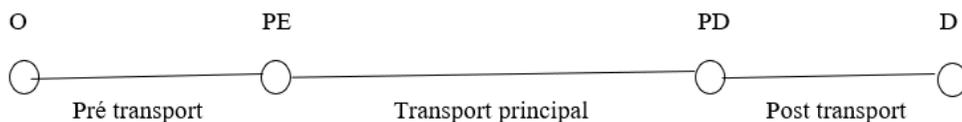
La fonction objective (1) minimise le coût total du transport (le temps total de parcourt) sur le réseau de transport multimodal, la contrainte (2) garantie l'utilisation d'un seul mode de transport m sur le tronçon allant de i à i+1 alors que la contrainte (3) spécifie l'unicité du transfert des marchandises du mode m au mode n. La contrainte (4) indique que les paramètres $X_{i,i+1}^m$ et $y_i^{m,n}$ sont des variables de décision. La variable décisionnelle $X_{i,i+1}^m$ est égale 1, si le mode m est choisi sur l'arc (i, i+1) et

elle prend la valeur zéro (0) lorsque ce mode n'est pas choisi sur ledit arc. Pour la variable $y_i^{m,n}$, nous soulignons le choix d'un seul transfert des marchandises. Le transbordement des marchandises est unique et s'opère du mode m au mode n si la variable $y_i^{m,n} = 1$, pour un autre type de transbordement, $y_i^{m,n} = 0$. Le paramètre $C_{i,i+1}^m$ correspond au coût de transport (ou le temps de parcours) du mode m sur l'axe ($i ; i+1$). Le paramètre $t_i^{m,n}$ désigne le coût lié au transbordement des marchandises allant du mode m au mode n .

3.5.2. Test du modèle d'optimisation

Les figures 1 et 2 illustrent un schéma de transport multimodal composé de trois arcs de transport, à savoir : le pré transport, le transport principal et le post transport. Le parcours des marchandises se fait suivant ces figures où les marchandises font un premier parcours allant de la porte (ou l'usine) du fournisseur jusqu'au lieu de regroupement des marchandises qui peut être soit un port maritime, soit un aéroport ou une gare ferroviaire. De cette zone d'embarquement, les marchandises sont transportées par le mode convenable en utilisant le long parcours appelé transport principal. Une fois arrivées au point de destination principal, la dernière étape concerne le post acheminement des marchandises qui part de ce point (port, aéroport ou gare ferroviaire) de destination convenue jusqu'à l'usine ou à la porte du client. Nous considérons le cas où les pré et post et transport principal peuvent être assuré par l'un des quatre modes de transport ou itinéraires (figure 1).

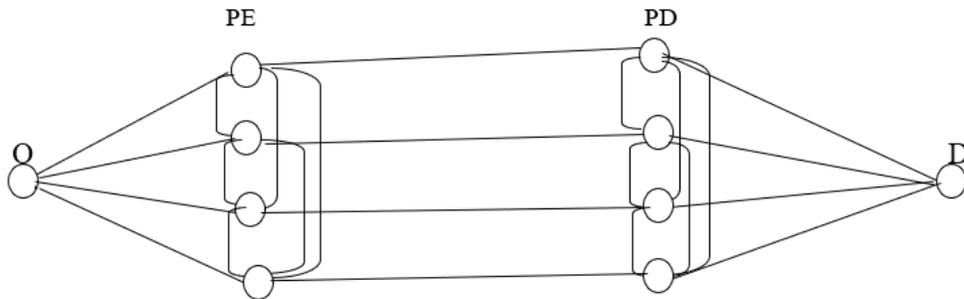
Figure 1 : réseau de transport multimodal



Source : auteurs, 2024

Sur la figure 1, O est l'origine des marchandises, PE désigne le point d'embarquement ou le point de départ du transport principal alors que PD est le point de destination du transport principal. La destination des marchandises est symbolisée par D. La figure 2 indique respectivement les itinéraires des modes 1, 2, 3 et 4.

Figure 2 : réseau de transport multimodal avec les différents itinéraires des modes et les transbordements



Source : auteurs, 2024

La figure 2 indique qu'il existe plusieurs combinaisons de multimodal pour quitter l'origine O et arriver à la destination D. pour tester le modèle, nous considérons les valeurs utilisées dans les tableaux 2 et 3 comme données de base. Les valeurs sont exprimées en Unité Monétaire.

Tableau 2 : coûts de transport sur les arcs suivant les modes ou les itinéraires de transport

| Arcs \ Modes | O – PE | PE – PD | PD – D |
|--------------|--------|---------|--------|
| Mode 1 | 5 | 5 | 7 |
| Mode 2 | 4 | 8 | 5 |
| Mode 3 | 6 | 7 | 4 |
| Mode 4 | 4 | 6 | 7 |

Source : auteurs, 2024

Tableau 3 : coûts de transbordement aux nœuds PE et PD

| Arcs \ Modes | Mode 1 | Mode 2 | Mode 3 | Mode 4 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Mode 1 | 0 | 2 | 4 | 3 |
| Mode 2 | 2 | 0 | 3 | 4 |
| Mode 3 | 4 | 3 | 0 | 2 |
| Mode 4 | 3 | 4 | 2 | 0 |

Source : auteurs, 2024

Dans l'étude, le coût de transbordement pour un même itinéraire ou d'un mode au même mode est nul. Après compilation avec lingo 11.00, nous avons obtenu les résultats consignés en annexe. L'étude montre que sur les arcs (O-PE) et (PE-PD), il est préférable d'utiliser le mode 4 et sur l'arc (PD-D), on utilisera le mode 3. Seul, le transbordement au nœud PD occasionne des coûts de transfert. Le coût optimisé du transport est 16 Um, c'est-à-dire, $4+6+4+2 = 16$. Les valeurs des variables binaires x et y sont consignées dans le tableau 4.

Tableau 4 : valeurs de paramètre binaires x et y

| Variables binaires x et y | Symboles de programmation | Valeurs obtenues comme solution | Significations |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|
| $X_{i,i+1}^m$ | X(1,2,4) | 1 | Utilisation du mode 4 sur l'arc (O-PE) |
| | X(2,3,4) | 1 | Utilisation du mode 4 sur l'arc (PE-PD) |
| | X(3,4,3) | 1 | Utilisation du mode 3 sur l'arc (PD-D) |
| $y_i^{m,n}$ | Y(4,4,2) | 1 | Transbordement du mode 4 au mode 4 au niveau du nœud PE |
| | Y(4,3,3) | 1 | Transbordement du mode 4 au mode 3 au niveau du nœud PD |

Source : auteurs, 2024

Le tableau ci-dessus montre qu'en dehors de ces variables, toutes les autres variables binaires de x et y sont nulles.

4. Discussion des résultats

Les résultats de l'étude ont montré qu'en minimisant les temps et les coûts de pré et de post transport, nous pouvons considérablement réduire les effets des transports sur l'environnement. De même, des mesures de réduction des coûts de transport et des temps de parcours ont été proposés. La mise en œuvre des mesures proposées permet de réduire les coûts logistiques, de minimiser le temps de parcours des marchandises et d'atténuer les effets du transport des marchandises sur l'environnement. Les études menées par (Soro et al, 2018) ont abordé dans le sens que la mise en place d'un système de transport de marchandises longue distance efficace revêt à ce jour une importance toute particulière dans un secteur économique en pleine restructuration. Ils ont confirmé que le service du transport de marchandises permet d'approvisionner des unités de production et de distribution en produits finis. La hausse de la consommation de carburant se traduit par une augmentation drastique des émissions de carbone. (Wu, et al., 2011) ont étudié un examen critique de la fonction de transport des marchandises dans l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. Leur étude vise à comparer plusieurs modèles de recherche du transport ayant permis d'identifier un paradigme, deux tendances et une anomalie. L'anomalie transport intermodal des marchandises et les résultats ont conduit à l'hypothèse selon laquelle, en moyenne, le transport intermodal améliore l'efficacité Carbone du camionnage à travers le transfert d'une quantité des marchandises aux modes relativement moins polluants et qui assurent le transport en masse des marchandises. Dans cette étude, les auteurs ont montré que la combinaison des modes de transport permet de réduire les émissions de CO₂.

Par ailleurs, selon (Hecht, et al., 1997), dans la plupart des pays développés, le secteur des transports occupe le deuxième rang en termes de pollution ou d'émissions de CO₂ après le secteur industrielle. Cette étude

montre qu'environ 30% du CO₂ émis provient de l'industrie et le secteur des transports émet près de 27% selon la même source. (Contois, 2011) a publié une étude mettant en exergue l'impact des infrastructures de transport sur la production agricole. Dans leur étude, le cas des zones économiques spéciales en Chine a été utilisé comme exemple illustratif et l'étude montre les effets négatifs du développement des transports sur la végétation ainsi que la réduction des zones cultivables à cause des infrastructures de transports.

Conclusion

L'objectif de cet article était d'analyser l'optimisation d'un réseau de transport durable : le pré et le post acheminement des marchandises import-export du Mali. Pour y parvenir, d'abord, nous avons mis en exergue la revue des écrits sur l'optimisation d'un réseau de transport durable. Ensuite, nous avons orienté notre réflexion sur la méthodologie basée sur l'approche qualitative. Les résultats ont indiqué qu'en minimisant les temps et les coûts de pré et de post transport des marchandises import-export du Mali, nous pouvons considérablement réduire les effets des transports sur l'environnement. L'étude a permis de faire des propositions pour atténuer les effets du transport des marchandises sur l'environnement, à savoir : la réduction des coûts de transport et des temps de parcours. La mise en œuvre de ces mesures permettent de réduire les coûts logistiques, de minimiser le temps de parcourt des marchandises au Mali.

Les principales limites de la recherche demeurent la non analyse des coûts des effets du transport de marchandises import-export du Mali sur l'environnement. L'étude s'est focalisée sur l'optimisation d'un réseau de transport durable de pré et post-acheminement des marchandises au Mali.

En termes de perspective, il s'agira pour nous d'orienter notre réflexion sur la contribution du transport pré et post acheminement des marchandises dans le développement du Mali.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Bayogo, Y. (2021). Impacts environnementaux du transport des marchandises par voies routière et ferroviaire : cas des corridors

- Ouest et Sud du Mali. Thèse de Doctorat à l'Institut de Pédagogie Universitaire (IPU), Bamako-Mali; Bibliothèque IPU, pp : 54 - 62.
2. Bektas, T. & Crainic, T. G. (2007). A Brief Overview of Intermodal Transportation. CIRRELT 03 : 1-25
<https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2007-2003>, pp : 1-25.
 3. Bernard, V., & Jacob, C. (2016). Solution ITS pour le transport routier de marchandises : les rencontres de la mobilité intelligente. Papers 00070, Intelligent Transportation System : ITS, pp : 14 ; t : <https://www.researchgate.net/publication/292398610>.
 4. Boliang, L., et al. (2015). Research on the Methods of Releasing the Capacity of Railway for Transferring Freight Flow from Road to Railway.
 5. Contois, C. (2011). Impact des infrastructures de transport sur la production agricole: cas des zones économiques spéciales en chine. Canadian Journal of Development Studies / Revue canadienne d'études du développement: <http://dx.doi.org/10.1080/02255189.1988>.
 6. Direction Nationale des Transports Terrestres Maritimes et Fluviaux (DNTTMF). (2020). Observatoire des Transports. Annuaire statistique du Mali, p 153.
 7. Hecht, J. et al. (1997). Rapport de l'OCDE sur le commerce et l'environnement. Paris: OCDE.
 8. Mahrous, R. F. (2012). Multimodal Transportation System: Modelling Challenges Enschede, University of Twente, Faculty of Géo-Information Sciences and Earth Observation Netherlands Master thesis, 1-74 <http://www.itc.nl/library/papers-2012/msc/>.
 9. McKinnon, A., & Piecyk, M. (2010). Measuring and managing CO2 emissions in european chemical transport Tech. Report. Logistics Research Center, Heriot-Watt University, Edingurgh, UK.
 10. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2006). decoupling the environmental of transport from economic grow. oecd; victoria transport policy institute.
 11. Rapport CNUCED, (2018). Le transport durable de marchandises à l'appui du programme de développement durable à l'horizon 2030.
 12. Sawadogo, M. (2018). Intégration de l'impact environnemental, sociétal et économique du transport intermodal au sein des chaines logistiques vertes: optimisation multi objectif dans les colonies de fourmis, thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine de Metz.
 13. Seguin, M. (2009). Etudes et Documents: Transports et environnement: Comparaisons Européennes. Commissariat General au Developpement Durable N°13.

14. Soro, et al. (2018). Approches exacte et heuristique pour un problème Bi-niveau de transport longue distance de marchandises Afrique SCIENCE 14(5) (2018) 269 - 284 269 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>
15. Special Report TRB 279. (2004). The Marine Transportation System and the Federal Role: Measuring performance, targeting improvement. Transportation Research Board of the National Academies, pp: 55 - 72: www.TRB.org.
16. SSATP, (2020) Politiques de mobilité et d'accessibilité durables dans les villes maliennes.
17. Tchanche, B. (2018). Concevoir des systèmes des transports durables en Afrique, Liaison Energie-francophonie numéro 108, pp : 31-33.
18. Vermeulin, S., & Khan, S. (2010). Mobilités urbaines et durabilité dans les villes sud-africaines volume 4. URL : <http://journals.openedition.org/eue/775> ISSN : 1916-4645
19. Yi Qu Tolga Bektas & Julia Bennell. (2016). Sustainability SI: Multimode multicommodity Network Design Model for Intermodal Freight Transportation with transfert and Emission Costs (eng);
20. Yun - He, Z., Lin, B. et al. (2006). "Research on a Generalized shortest path method of Optimizing intermodal Transportation problems. *Journal of China Railway Society* 28(4) , 22 - 26 (In Chinese).
21. Wu, D., et al. (2011). Pareto-improving congestion pricing on multimodal transportation networks, *European Journal of Operational Research* 210 (3), 660-669.

Annexe : Solution obtenu après résolution l'optimisation du réseau de transport multimodal

Global optimal solution found.

| | |
|--------------------------|----------|
| Objective value: | 1600000 |
| Objective bound: | 16.00000 |
| Infeasibilities: | 0.000000 |
| Extended solver steps: | 0 |
| Total solver iterations: | 0 |

| Variable | Value | Reduced Cost |
|-------------------|----------|--------------|
| COS(1, 2, 4) | 4.000000 | 0.000000 |
| COS(2, 3, 4) | 6.000000 | 0.000000 |
| COS(3, 4, 3) | 4.000000 | 0.000000 |
| X(1, 2, 4) | 1.000000 | 4.000000 |
| X(2, 3, 4) | 1.000000 | 6.000000 |
| X(3, 4, 3) | 1.000000 | 4.000000 |
| TRACOST(4, 4, 2) | 0.000000 | 0.000000 |
| TRACOST(4, 3, 3) | 2.000000 | 0.000000 |
| Y(4, 3, 3) | 1.000000 | 2.000000 |
| Y(4, 4, 2) | 1.000000 | 0.000000 |