

Optimisation d'un réseau de transport routier en considérant les facteurs de pollution : cas de la distribution des produits en zones CMDT au Mali

Optimization of a road transport network by considering pollution factors: case of the distribution of products in CMDT area in Mali

BAYOGO Yapégué

Enseignant chercheur

Institut Universitaire de Gestion (IUG)

Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB) - Mali

Département de commerce international, Gestion des Entreprises et des administrations et

Gestion des Transports et de la Logistique ; DER : CI-GLT-GEA

yap.masseni@yahoo.fr

Date de soumission : 25/03/2022

Date d'acceptation : 06/05/2022

Pour citer cet article :

BAYOGO. Y. (2022) «Optimisation d'un réseau de transport routier en considérant les facteurs de pollution : cas de la distribution des produits en zones CMDT au Mali», Revue Française d'Economie et de Gestion «Volume 3 : Numéro 5» pp : 160-177.

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons

Attribution License 4.0 International License



Résumé

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. Ce papier vise à élaborer un réseau de transport routier moins polluant. La méthodologie adoptée a consisté d'une part à la recherche documentaire basée 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 études de terrain ont été faites et enfin un modèle optimisant les flux marchandises a été formulé et testé à l'aide des données recueillies auprès des agents de la CMDT. Le modèle proposé a été testé avec des données sur le transport des produits dans les zones CMDT en République du Mali en utilisant le logiciel d'optimisation LINGO 11.00. Les résultats de l'étude indiquent qu'on peut considérablement réduire les émissions dues au secteur des transports en minimisant le volume du trafic et en améliorant l'état des infrastructures et du matériel roulant. De même, notre étude indique que la production de coton graine pourrait augmenter d'environ 80% d'ici 2050 occasionnant une hausse des émissions de carbone dues à cette activité. Des mesures de lutte contre la pollution due au secteur du transport routier des marchandises ont été proposées.

Mots clés : transport routier ; pollution ; flexibilité ; réseau optimisé ; zones CMDT

Abstract

In the developing countries, the road transport system occupies an important place because of its flexibility and the low prices of its infrastructure and rolling stock. This paper aims to develop a road transport network taking into account environmental impacts. The methodology adopted consisted on the one hand of documentary research based on the reading and analysis of works, activity reports, scientific articles, doctoral theses and web sites, on the other hand the area studies have been done and finally a model optimizing the freight flow was formulated and tested using data collected from agents of company. The proposed model was tested with data on the transport of products in company areas in the Republic of Mali using LINGO 11.00 optimization software. The results of the study indicate that emissions from the transport sector can be significantly reduced by minimizing the volume of traffic and by improving the condition of the infrastructures as well as the rolling stock. Our study indicates that the production of seed cotton could increase around 80% by 2050, causing an increase in carbon emissions due to this activity. Some measures to control pollution from the road freight transportation sector have been proposed.

Keywords: road transport; pollution; flexibility; optimized network; CMDT production area

Introduction

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 M., Avril 2009). Cependant, la pollution de l'air, les bruits sonores et les vibrations accompagnent le transport des marchandises (OECD, 2006). Dans le monde entier, le secteur des transports occupe le deuxième rang en termes de pollution ou d'émissions de CO₂ après le secteur industriel (JOY et ANDREW, 1997).

Selon (SEGUIN M., Avril 2009), le volume des marchandises transportées ne cessent d'accroître et les impacts des transports sur l'environnement se multiplient :

- à travers **les émissions de gaz à effet de serre**. Ces gaz proviennent de la transformation des sources primaires d'énergie en énergie soit électrique ou calorifique servant à alimenter les moteurs du matériel de transport. Le pétrole et ses dérivées, le charbon, le gaz naturel sont les principales sources d'énergie primaire utilisées pour l'alimenter les moteurs. Selon (SEGUIN M., Avril 2009), les principaux gaz d'échappement des véhicules sont : (a) les oxydes de carbone comme le monoxyde de carbone CO et le dioxyde de carbone CO₂ ; (b) les oxydes sulfuriques comme le monoxyde de soufre SO, le dioxyde de soufre SO₂ et le composé SO₃ ; (c) les composés d'azote NO et NO₂ ; (d) les Composés Organiques Volatils Non Méthaniques (COVNM). Les sources de ces COV sont en général : l'industrie chimique, le dégraissage des métaux, la peinture, l'imprimerie, les colles... ; (e) les particules fines ou Particulates Matter (PM) proviennent de l'usure ou du frottement des métaux ou des déchets de caoutchouc du au frottement des pneus sur les infrastructures ; (f) les substances à base de plomb (Suppression de l'essence en 1999) et (g) les composés d'ozone (O₃) ;
- **Les bruits sonores** : Ces bruits sont essentiellement dus au moteur du Matériel de transport ;
- **Les vibrations** : le déplacement du matériel de transport fait des vibrations considérables. Ces vibrations ont un impact direct sur notre écosystème.

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 et des voyageurs contribuent à la pollution urbaine et au changement climatique.

Selon (HECHT J. et All, 1997), dans la plus part des pays développés, le secteur des transports occupe le deuxième rang en terme 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. Ces données valables pour les économies industrialisées et développées nous amène à se poser la question suivante :

Le secteur industriel est t-il le plus polluant dans nos pays en voie de développement ?

Durant les trois dernières décennies de multiples recherches ont été faites traitant le problème de pollution dû au secteur des transports. Ainsi en Amérique du nord, la Revue Canadienne d'études du développement dans (CONTOIS C., 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. Selon les rapports du National Transportation Record-Board (NTRB) des Etats Unis, le volume total des marchandises en import/export passe respectivement de 872 millions de tonne en 2000 à 1304 million de tonne en 2020 (Special Report TRB 279, 2004). Cette augmentation s'accompagne d'une hausse des besoins du service transport et en même temps, une hausse considérable de la consommation de carburant. La hausse de la consommation de carburant se traduit par une augmentation drastique des émissions de carbone. L'étude faite dans (Special Report TRB 279, 2004) montre 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. Dans le système de transport maritime, la loi sur la pollution par les hydrocarbures adoptée en 1924 définit clairement le rôle des gardes côtes dans la sécurité et la lutte contre la pollution des eaux de mer. Mais la loi sur la pollution par les hydrocarbures adoptée en 1990 a mis l'accent sur la conception des navires, les licences d'équipage et des méthodes de planification du transport tenant compte des impacts environnementaux. Cette loi fut promulguée pour tenir compte de la sécurité en transport maritime et assurer un transport moins polluant. Aux Etats Unis, plusieurs organes et agences ont été créés et fonctionnent pour contrôler et chercher les moyens de luttés contre la pollution de l'air. Parmi ces structures, nous notons l'agence pour la protection de l'environnement dénommé National Environment Policy Agency (NEPA) qui œuvre pour le contrôle de la pollution. (AMOAKO K. Y, 2004) a fait une étude portant sur les transports et l'intégration régionale en Afrique. Le coton produit est exporté via les corridors liant le Mali et différents ports maritimes. Selon (AMOAKO K. Y., 2004), le corridor est un couloir de transit utilisé pour l'acheminement des marchandises des côtes vers les zones non côtières et il est régi par des accords conclus entre les différents Etats concernés. L'étude menée par (JOY et ANDREW, 1997) lors de la conférence de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) tenue à Paris (en France) fait un aperçu sur les systèmes de transport comme le maritime, le routier, l'aérien, le ferroviaire ainsi que le transport par conduite et les lieux de transbordement. Cette étude est essentiellement basée sur les impacts de ces différents modes de transport sur l'environnement. Les effets de ces différents modes de transport sur l'environnement sont traités en termes qualitatifs et les coefficients d'émissions physiques par unité de fret transporté ainsi que les couts dus à ces effets environnementaux ont été traités dans leur étude. Les rapports de l'OCDE sur les

transports et l'environnement (OECD, 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. L'étude faite par (JOURMARD R., 2006) établit un lien entre le secteur des transports et les impacts environnementaux de celui-ci. Selon cette étude, il existe une corrélation entre le développement du secteur des transports, les pollutions de l'air, les nuisances sonores et le développement durable. Elle déduit que les transports sont responsables de la dégradation du patrimoine Français à près de 30% à travers la salissure, la corrosion physique ou chimique, les émissions de particules dangereuses, de produits gazeux et oxydants. Les transports sont responsables de 22% des sources de pollutions conclut l'étude en évoquant la mise en œuvre de mesures permettant de réduire cette pollution à partir de 1990. L'étude montre aussi que, malgré les multiples mesures mises en œuvre par l'Europe et le reste du monde pour assurer un développement économique durable avec des infrastructures et du matériel de transport moins polluants, le problème de pollution dû à ce secteur demeure d'actualité. Selon le rapport de l'OCDE (OECD, 2006), le secteur des transports a des impacts néfastes sur l'environnement. Ces impacts concernent la pollution de l'air, le changement climatique, les substances nocives, les effets d'urbanisation, la congestion routière et les effets dus à la vie humaine. Nous regroupons en trois catégories les effets des transports sur l'environnement:

- ✓ Les effets sur l'habitation, le travail et la propriété : ces effets sont dus au secteur des transports. Les nuisances sont les plus visibles parmi les problèmes liant transports et environnement, mais il y a aussi la pollution de l'air et les particules fines qui peuvent avoir des effets dangereux sur la santé de l'homme, de même d'autres facteurs (les vibrations ou les bruits sonores) peuvent impacter les constructions (bâtiments ou autres installations),
- ✓ La destruction de la couche d'ozone dû à la pollution de l'air en milieu urbain et périurbain est aussi un problème dû en grande partie au secteur des transports. Ces éléments constituent des facteurs causant des dommages sur la vie humaine à long et à moyen termes,
- ✓ Les effets dit globaux qui impactent la composition de l'air et de l'atmosphère. Les plus importants sont les gaz à effets de serre, les émissions comme le dioxyde de carbone.

Malgré les différentes études faites et les multiples mesures envisagées par les Etats, nous constatons la persistance de cette pollution du secteur des transports. Cette persistance du problème nous a conduit à faire une étude portant sur le thème « **Optimisation d'un réseau de transport routier en considérant les facteurs de pollution : cas de la distribution des produits en zones CMDT au Mali** ». A travers cette étude nous tenterons de répondre à la question centrale suivante : Comment réduire la pollution du secteur des transports routier en optimisant les réseaux ?

Pour répondre à cette question principale, nous tenterons de répondre aux deux questions spécifiques suivantes :

L'optimisation du transport des flux d'un réseau routier permet – il de faire des économies d'émissions de carbone ?

Quelles mesures peut – on envisager pour réduire les émissions dues au secteur des transports routiers en zone CMDT ?

La suite de notre article traite dans la section 1 la méthodologie adoptée, la section 2 se focalise sur le test du modèle décrit en section 1 alors la section 3 porte sur l'analyse et l'interprétation des données. Les discussions permettant de faire des propositions de mesures anti pollution ont été engagées dans la section 4.

1. Méthodologie

1.1. Approche méthodologique

L'approche méthodologique s'est focalisée d'une part sur la recherche documentaire qui a consisté à faire 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 études de terrain ont eu lieu auprès des acteurs comme les agents de la Direction nationale des transports, les agents de la Compagnie Malienne de Développement des Textiles (CMDT).

1.2. Description du modèle

Le modèle expérimenté est une extension du modèle décrit par (BAYOGO Yapégué , Octobre 2021) mettant en évidence le lien entre les émissions de carbone et l'optimisation des transports. De même le modèle est une extension d'un problème classique de transport où les flux de marchandises doivent être transportés des sources notées i vers les destinations j . Le modèle décrit dans notre étude permet de traiter d'autres situations non prises en compte par les études de (Yi Qu et al., 2014) et de Lin. Ces deux recherches n'ayant pas analysé les émissions dues aux opérations de manœuvres dans les terminaux. Puisque le coût du transport ainsi que les émissions de carbone lors du transport des marchandises sont directement proportionnels au volume du trafic (la tonne-kilométrique exprimé en t.km) alors l'étude vise à minimiser la t.km. La description du modèle nécessite l'utilisation des paramètres qui suivent :

C_{ij} est le coût du transport allant de la source i à la destination j , ce coût correspond à la distance de parcours (en km) entre la source i et la destination j ;

X_{ij} désigne les flux de transport qui doivent être déplacés de la source i à la destination j exprimés en tonne;

Q_i est la capacité d'égrainage de l'usine située à la source i exprimée en tonne;

e_{ij} est le facteur d'émissions de carbone sur l'OD (i,j) exprimé en kgCO₂ par tonne – kilométrique et variant d'un pays à un autre (JOY et ANDREW, 1997), (HECHT J. et All, 1997), (OECD, 2006);

t_i est le facteur d'émissions de la source i lors des opérations de manœuvre ;

D_j désigne la demande exprimée par la destination j en tonne;

d_i est la distance moyenne de parcours lors des opérations de manœuvre à la source i ;

Le modèle M1 décrit la formulation d'un problème simple de transport minimisant le cout total de transport de marchandises entre des sources et des destinations. Le modèle est renforcé par des contraintes de capacité des sources puis les contraintes de demande des destinations. Le modèle M2 minimise le cout total de transport entre les sources et les destinations puis les couts dû aux opérations de manœuvre. M2 est un modèle de minimisation du volume total du trafic et une réduction des émissions de carbone dues aux transports des marchandises entre les sources et les destinations puis les émissions dues aux opérations de manœuvres au niveau des usines.

1.3. Formulation du Modèle Mathématique

Les deux modèles sont consignés suivant les formules (1) – (6)

La formulation du modèle M1 est la suivante :

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \leq Q_i, \forall i; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = D_j, \forall j; \quad (3)$$

M1 ne prenant pas en compte les émissions de carbone lors du transport et lors des opérations de manœuvres, nous avons jugé nécessaire de formuler le modèle M2: ,

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} e_{ij} + \sum_{i=1}^n d_i Q_i t_i + \sum_{j=1}^m d_j D_j t_j \quad (4)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \leq Q_i, \forall i; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = D_j, \forall j; \quad (6)$$

La formule (1) minimise le coût total du transport des marchandises entre les sources i et les destinations j , (2) est la contrainte de capacité pour la source i et selon cette contrainte, la quantité totale de flux de marchandises distribués par un node i ne peut excéder sa capacité. La contrainte (3) permet de satisfaire toute la demande de la destination j .

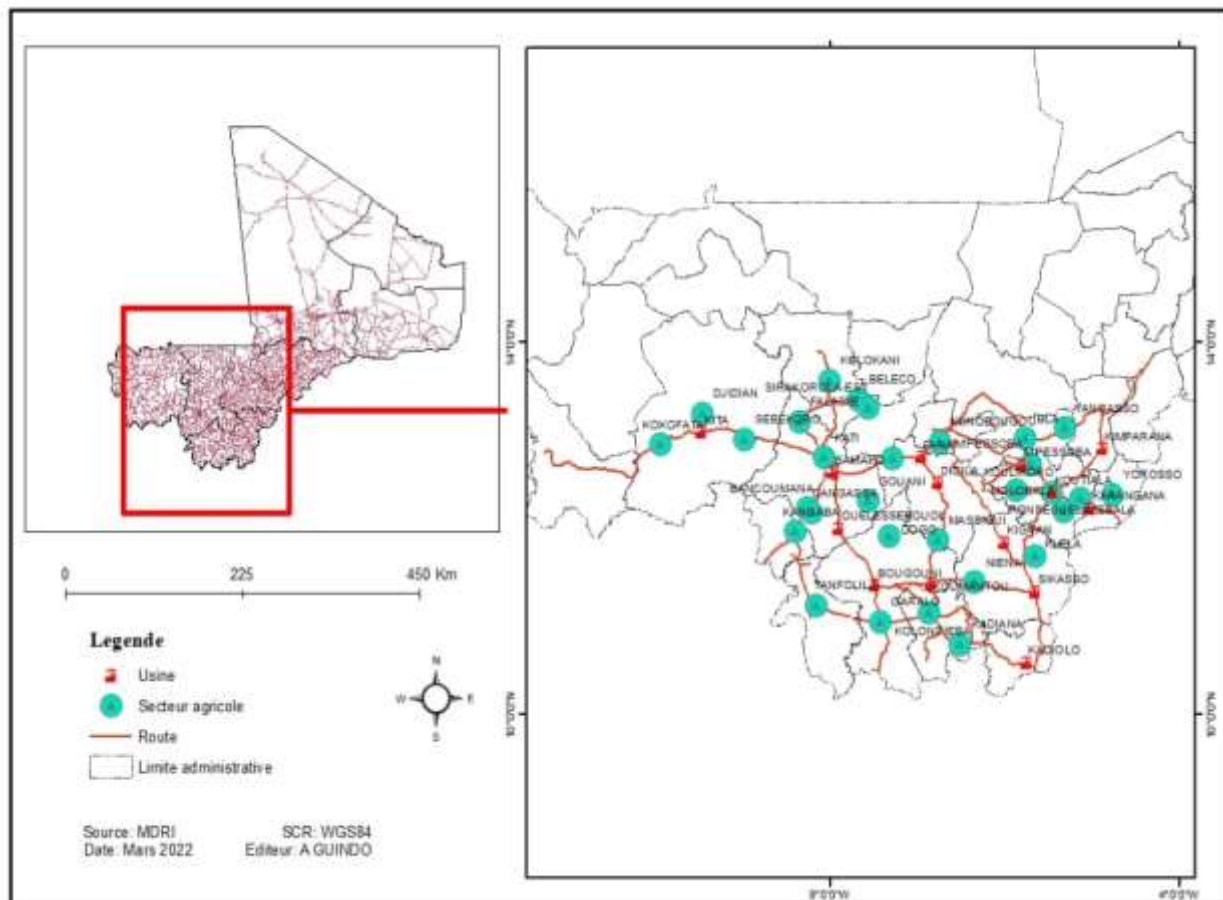
Selon le modèle M2, la formule (4) permet de minimiser le total du carbone émis lors du transport des marchandises entre les sources et les destinations puis lors des opérations de manœuvre menées aux différentes sources et destinations. Les formules (5) et (6) sont respectivement des contraintes de capacité et de demande.

2. Test du modèle Mathématique

Pour expérimenter le modèle M2 décrit dans la section 1, nous avons choisi la Zone CMDT en République du Mali. Cette section décrit le milieu d'étude, donne les informations nécessaires au test et s'achève par une analyse et une interprétation des données traitées avec le logiciel Lingo 11.00.

2.1. Présentation du milieu d'étude

La figure 1 retrace la zone d'étude en précisant toutes les sources et les destinations

Figure 1 : Carte du Mali avec les secteurs de production et les sites des usines CMDT

Source : *Laboratoire de Géographie de la Faculté d'Histoire et de Géographie de l'université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB)*

La figure ci dessus indique les principales villes correspondant aux 30 demandes (appelées secteurs agricoles) qui sont : Belego ; konobougou, Markacoungou ; Massigui ; Bla ; Konseguela ; Molobala ; M'pessoba ; Yangasso ; Yorosso ; Zebala ; Klela ; Niena ; Dogo ; Garalo ; Kolondieba ; Yanfolila ; Kadiana ; Djidian ; kokofata ; sebekoro ; Bancoumana ; Dangassa ; faladiè ; Gouani ; kangaba ; Kati kolokani ; koulikoro ; Sirakorola. Nous considérons 30 villes du Mali situées essentiellement dans les régions Sud et Ouest du Mali. Cette partie du pays est favorables à culture du coton et des produits viviers. Les produits (coton fibre) sont transportés de ces villes vers les 13 usines (Kita ; Bamako ; Fana ; Dioila ; Ouelessebougou ; Koutiala ; Karangana; Kimparana; Kignan; Sikasso; Kadiolo; Koumantou; Bougouni) comme l'indique la figure. En optimisant, on défini les liaisons que les flux doivent emprunter pour minimiser le total du volume de trafic et aussi le total des émissions de carbone. La loi malienne (loi n°, 2005) prévoit quatre types de routes qui sont

les Routes Nationales (RN), les Routes Régionales (RR), les Routes Locales (RL) et les routes Communales (RC). Le transport des marchandises se fait en empruntant un réseau contenant différents types de routes avec des types infrastructures diversifiées (routes bitumées, routes en latérites et routes cyclables).

2.2. Données pour le test

Les données recueillies auprès des agents de la CMDT sont consignées dans les tableaux 1 et 2. Le tableau 3 en annexe indique les distances entre les différentes zones de production et d'égrainage.

Table 1: relatif aux quantités de production des différents secteurs pour la campagne 2020/2021

Secteurs de production	Poids en tonne	Secteurs de production	Poids en tonne	Secteurs de production	Poids en tonne
Beleco	72650	Zebala	15200	Sebekoro	17900
Konobougou	20200	Klela	66950	Bancoumana	1550
Markacoungo	8200	Niena	57550	Dangassa	7450
Massigui	17150	Dogo	32000	Faladie	4540
Bla	17500	Garalo	65400	Gouani	8460
Konsequela	17650	Kolondieba	30850	Kangaba	3170
Molobala	33050	Yanfolila	21000	Kati	330
M'Pessoba	15650	Kadiana	30200	Kolokani	190
Yangasso	27900	Djidian	24200	Koulikoro	1140
Yorosso	60750	Kokofata	51900	Sirakorola	320

Source : Rapport CMDT 2021 et enquête personnelle (Janvier – Mars 2022)

Le tableau 1 indique les secteurs de production et les quantités produites en 2021. L'analyse de ce tableau montre que les secteurs à forte production sont le secteur de Beleco prenant en compte les productions de Fana et de Diola avec 72650 tonnes suivi des secteurs de klela et Sikasso. Par ailleurs les secteurs de kati, kolokani, Sirakorola et koulikoro ont une faible production cotonnière à cause de leur proximité de la ville de Bamako. Ces dernières villes se focalisent sur les cultures vivrières.

Tableau 2: relatif aux capacités d'égrainage des différentes usines pendant la campagne 2020/2021

Usines	Capacité réelle d'égrainage en kg	Capacité retenue pour les usines de la ville (en tonne)
Kita	54 519 646,54	54519
Bamako	20 297 525,77	20297
Fana	43 011 163,48	43011
Dioila	66 976 745,21	66976
Ouelessebougou	60 090 309,28	60090
Koutiala 1	13 788 453,61	176143
Koutiala 2	37 113 490,43	
Koutiala 3	49 985 537,56	
Koutiala 4	75 256 082,47	
Karangana	52 543 681,89	52543
Kimparana	14 431 340,21	14431
Kignan	72 324 536,08	72324
Sikasso 1	27 919 263,62	91264
Sikasso 2	63 345 095,73	
Kadiolo	67 674 904,27	67674
Koumantou	76 663 092,78	76663
Bougouni 1	17 659 764,36	91474
Bougouni 2	73 814 521,35	
Total	887 415 154,64	

Source : Rapport CMDT 2021 et enquête personnelle (Janvier – Mars 2022)

En analysant les données du tableau 2, on constate que l'entreprise a une capacité d'égrainage de plus de 887 415t de coton contre une production de 731 000t et les grands centres d'usines sont les villes de Koutiala (176 143t), Sikasso (91264t) et Bougouni (91264t). La capacité libre de 2021 s'élève à 17,62%. A travers ces données, on constate que les usines doivent fermer les portes pour une durée d'environ 64 jours par faute de matière première qui est le coton graine.

2.3. Analyse et interprétation des données

Les facteurs de pollution varient selon l'état des infrastructures et du matériel roulant. Pour tester le modèle nous avons considéré le facteur de pollution utilisé par différents pays et nous avons dégagé l'écart entre les facteurs de pollution les plus élevés et les plus faibles. Selon (Boliang Lin et Al., 2016), le facteur de pollution du transport routier des marchandises est 0,13kgCO₂ par t.km en République Populaire de Chine. Les rapports de l'OCDE indiquent (OECD, 2006) ; (OCDE, Du 24 - 27 Mars 1996). Le tableau suivant montre les différents OD avec les flux de transport. Ces données ont été obtenues grâce au programme Lingo 11.00.

Tableau 4 : Relatif aux OD avec les flux optimisés

O – D	Flux (en tonne)	O – D	Flux (en tonne)
Kita – Djidian	2619	Koutiala – Bla	17500
Kita – Kokofata	51900	Koutiala – Konseguela	17650
Bamako – Djidian	10707	Koutiala – Molobala	33050
Bamako – Bancoumana	1550	Koutiala – M'pèssoba	15650
Bamako – Faladiè	4540	Koutiala – Yorosso	8207
Bamako – Kangaba	3170	Koutiala – Zebala	15200
Bamako – Kati	330	Karangana – Yorosso	52543
Fana – Konobougou	20200	Kimparana – Yangasso	14431
Fana – Markacoungo	8200	Kignan – Beleco	21957
Fana – Koulikoro	1140	Kignan – Yangasso	13469
Fana – Sirakorola	320	Sikasso – Klela	66950
Dioila – Beleco	50693	Sikasso – Niena	24314
Dioila – Massigui	4573	Kadiolo – Kadiana	30200
Dioila – Dogo	11710	Koumantou – Massigui	12577
Ouelessebougou – Dogo	15216	Koumantou – Niena	33236
Ouelessebougou – Djidian	10874	Koumantou – Kolondieba	30850
Ouelessebougou – Sebecoro	17900	Bougouni – Dogo	5074
Ouelessebougou – Dangassa	7450	Bougouni – Garalo	65400
Ouelessebougou – Gouani	8460	Bougouni – Yanfolila	21000
Ouelessebougou – Kolokani	190		

Source : Rapports CMDT/production 2021 ; Optimisation Lingo 11.00 (Mars 2022)

Les données du tableau 4 indiquent les différents OD avec les flux optimisés en précisant les usines d'égrainage et les secteurs qui peuvent être utilisés pour ravitailler ces usines. Selon ce tableau les productions de Kokofata, Kita et une partie de la production de Djidian (soit 2619) doivent être transportées vers l'usine de Kita ; de même l'usine de Bamako servira pour l'égrainage du coton des secteurs de Bancoumana (1550t), Faladiè (4540t), Kangaba (3170t) et Kati (330t) etc. l'étude permet d'optimiser le volume du trafic. Ainsi, le volume du trafic s'établit à 51 427 280t.km et il inclut le volume du trafic lors des opérations de manœuvre. Selon **M. T.** un agent de la CMDT que nous avons interviewé,

« la distance entre les zones d'égrainage et de stockage des balles de coton varie selon les usines, elles varient entre 100m et 300m, mais rarement cette distance dépasse les 300m ». Cet interview nous a servi pour prendre une distance moyenne de 200m pour les 731000t de coton soit 146200t.km comme volume de trafic pour les opérations de manœuvre dans les usines.

Les émissions de CO₂ dues au transport du coton sont directement proportionnelles au volume du trafic. Dans le tableau 5, une analyse des émissions de CO₂ dues au transport du coton en considérant différents facteurs d'émissions de CO₂ est faite. Ce facteur d'émission est fonction de l'état des routes et du matériel roulant et le Mali ne disposant pas de norme de pollution en la matière, nous avons choisi les facteurs de pollution proposés par les rapports de l'OCDE. Selon les rapports de l'OCDE (OCDE, Du 24 - 27 Mars 1996), le facteur de pollution du transport routier varie entre 127g de CO₂ par t.km et 450 g/t.km. L'étude faite par (Boliang Lin et Al., 2016) montre que le facteur de pollution utilisé en Chine est 130gCO₂/t.km.

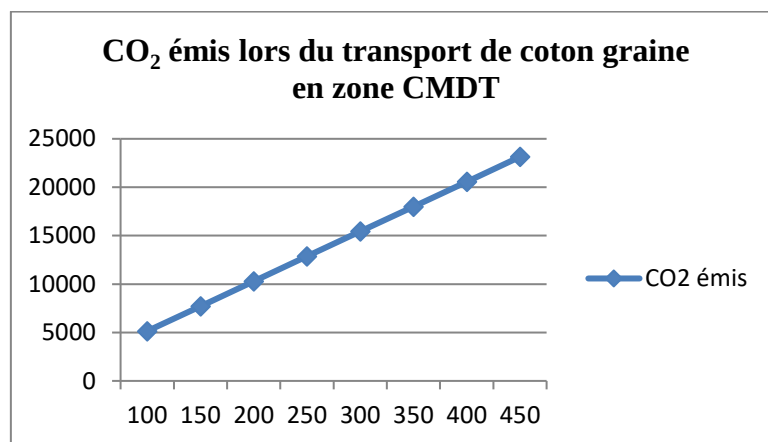
Tableau 5 : Relatif à la synthèse et analyse des émissions de CO₂

Facteur de pollution (gCO ₂ /t.km)	CO ₂ émis lors du transport de coton
100	5142,728
150	7714,092
200	10285,456
250	12856,82
300	15428,184
350	17999,548
400	20570,912
450	23142,276

Source : Enquête personnelle (Janvier – Mars 2022)

Le tableau 5 indiquent l'évolution du CO₂ émis lors du transport des 731000 tonnes de coton graines des secteurs de production vers les usines en fonction de la valeur du facteur de pollution. En analysant le tableau, nous constatons que la hausse du facteur entraine une hausse des émissions de carbone comme l'indique la figure 2.

Figure 2 : Relatif à la courbe d'évolution du CO₂ émis lors du transport de coton graine de la CMDT



Source : Tableau 5 et enquête personnelle (Janvier – Mars 2022)

Selon la figure 2, entre 100 et 400gCO₂ par t.km, le carbone émis est passé de 5142,728t de CO₂ à 23142,276 tonne de CO₂ soit une hausse de 350%. L'étude montre qu'avec des infrastructures routières et du matériel de qualité, le facteur de pollution est bas et tourne au voisinage de 100gCO₂/t.km alors que des infrastructures de mauvaise qualité ainsi que du matériel en mauvais état ou vétuste renvoient à un facteur de pollution de près de 400gCO₂/t.km et voir même au delà. Des études et des discussions au tour du problème de pollution dû au secteur des transports permettront d'en faire des propositions concrètes de lutte contre la pollution et d'atteindre les objectifs de développement durable que se fixe la Banque mondiale (World bank, 2004) et (World Bank Group, 2014).

3. Discussions

A travers notre étude, nous constatons que le transport du coton graine de la CMDT vers les usines occasionne une pollution énorme et il est donc urgent d'envisager des stratégies de lutte contre cette pollution. Les rapports de l'entreprise montrent que la production augmente considérablement au fil des années. Ainsi avec une production de 647257 tonnes en 2017, 728606 en 2018, 656531 en 2019, 631300 en 2020 et 731000 tonnes en 2021, nous pouvons établir la droite de régression suivante : $y = 21305X + 624549$. Cette régression donne des productions prévisionnelles de 794989t en 2025 ; 901514t en 2030, 1008039t en 2035 puis 1327614t en 2050 et une hausse considérable des émissions de CO₂. Ces valeurs prévisionnelles indiquent que entre 2022 et 2050, la production de coton graine augmentera de près de 81,62%. Les mesures suivantes sont envisageables pour réduire la pollution due au transport du coton graine en zone CMDT :

- ✓ Passer à des modes de transport sans dangers pour l'environnement comme l'exemple des moteurs électriques utilisés dans les pays développés;
- ✓ Améliorer l'état des infrastructures en particulier passer des routes essentiellement en latérites à des routes plus améliorées voir même bitumées ;

- ✓ Optimiser les techniques de chargement et du transport à travers des techniques de groupage ;
- ✓ Développer la technique de réduction des déplacements à vide du matériel de transport à travers le dépôt d'intrants et le retrait du coton graine pour les mêmes voyages ;
- ✓ Encourager la recherche et le développement portant sur les transports durables et une agriculture verte à travers des programmes de financement des projets.

Conclusion

La pollution due au secteur des transports est d'actualité à telle enseigne que la question devient un sujet de recherche. Comme certains le disent, « il suffit que les transports s'arrêtent et l'économie meurt ». Cela dénote l'extrême importance de notre étude. Si de multiples études et recherches ont été déjà faites dans le domaine des transports et l'environnement, le champ d'étude reste encore ouvert à d'autres pistes exploratoires. L'objectif principal de notre étude était de construire un modèle présentant un réseau optimisé du transport routier et moins polluant. L'étude a permis de répondre aux deux questions concernant d'une part la réduction des émissions de carbone dues au secteur des transports routiers et d'autre part la mise en œuvre de mesures de réduction de cette pollution. L'étude nous a permis d'analyser la relation qui existe entre le volume du trafic et les émissions de carbone.

Ce travail est confronté à quelques limites que nous avons pu constater au terme de nos recherches sur le terrain. Nous avons constaté qu'il y a souvent un écart considérable entre les prévisions de l'entreprise et la production réelle, cela peut impacter les valeurs prévisionnelles de notre droite de régression. De même, notre étude a considéré le transport du coton graine des chefs lieu de secteur vers les usines or dans la pratique, le transport se fait des villages de production vers les usines. Les distances entre les villages de production et les chefs lieu de secteurs puis des villages vers les usines peuvent influencer les résultats du modèle optimisé. Néanmoins, le modèle montre son efficacité à travers les résultats obtenus en le testant. Nos résultats indiquent que le carbone émis est fonction du volume du trafic et en optimisant le réseau de transport, on minimise cet indicateur et par conséquent le carbone diminue. De même, nos résultats montrent que la production de coton augmente au fil des années. Selon nos recherches, l'utilisation de moteurs moins polluants, l'amélioration de l'état des infrastructures et du matériel roulant, l'utilisation des techniques d'optimisation du chargement et du transport, la réduction des déplacements à vide du matériel roulant ainsi que le financement des recherches et des projets de développement durable sont entre autres des mesures de lutte contre la pollution due au secteur des transports. Les résultats de cette étude peuvent servir de base pour l'optimisation des réseaux de transport routier et les mesures anti-pollution proposées dans l'étude pourraient être utilisées par les décideurs pour assurer des transports durables. Enfin, la mise en œuvre des résultats obtenus permettra d'atteindre les objectifs de développement

durable fixés par les grandes institutions comme la banque mondiale, l'organisation mondiale de la santé et l'Organisation de Coopération et de Développement Economique.

En termes de perspectives, il s'agira pour nous d'orienter notre réflexion sur les stratégies d'optimisation des réseaux de transport routier et la révision de l'état des infrastructures ainsi que le matériel roulant du transport routier.

ANNEXES

Tableau 3 : Relatif aux distances entre les secteurs de production et les usines

Usines CMDT Secteur de production	Kita	Bamako	Fana	Dioila	Ouelessebou ou	Koutiala	Karangana	Kimparana	Kignan	Sikasso	Kadiolo	Koumantou	Bougouni
Beleco	405	217	90	68	275	118	191	197	88	162	263	188	250
Konobougou	341	154	27	76	215	240	313	281	201	260	377	203	300
Markacoungo	355	167	40	90	207	304	377	346	215	285	286	212	234
Massigui	430	243	119	79	203	246	319	325	216	190	268	58	120
Bla	503	316	189	288	377	78	151	119	196	214	314	295	419
Konseguela	469	282	142	119	343	50	122	129	155	185	285	256	317
Molobala	612	426	298	199	417	34	59	116	131	148	249	281	354
M'Pessoba	536	249	169	261	410	45	117	123	162	180	180	298	360
Yangasso	554	368	240	280	429	129	157	68	127	264	365	345	470
Yorosso	695	503	376	276	515	111	34	73	209	226	327	358	431
Zebala	648	461	334	235	462	40	36	77	156	173	274	306	379
Klela	602	408	242	203	328	97	149	179	67	41	135	171	244
Niena	488	294	234	194	214	213	265	295	109	76	197	54	130
Dogo	370	181	285	111	96	418	470	458	248	281	382	150	76
Garalo	411	217	282	242	137	386	439	468	283	250	234	118	53
Kolondieba	267	247	229	189	167	333	429	415	230	197	158	65	83
Yanfolila	390	196	289	282	116	426	478	508	322	289	390	158	82
Kadiana	502	308	290	250	228	272	328	358	198	139	97	126	144
Djidian	21	207	334	371	287	599	672	641	506	576	677	444	371
Kokofata	60	248	375	411	327	639	712	681	546	616	717	484	412
Sebekoro	59	129	256	292	208	520	493	562	427	497	598	365	292
Bancoumana	206	60	188	224	144	452	525	494	359	433	534	301	228
Dangassa	255	66	186	222	48	450	523	492	357	338	439	206	134
Faladie	216	76	207	243	159	471	544	513	378	448	549	316	244
Gouani	188	150	127	163	80	392	465	433	298	369	470	238	165
Kangaba	239	95	222	258	178	487	560	529	393	467	568	336	263
Kati	169	16	144	180	97	409	482	452	315	386	487	255	182
Kolokani	221	120	234	271	195	499	572	541	406	480	581	364	291
Koulikoro	244	59	100	137	132	365	375	407	272	346	447	273	217
Sirakorola	297	112	153	189	185	418	491	460	324	399	500	326	269

BIBLIOGRAPHIE

- AMOAKO K. Y. (2004). Les transports et l'intégration régionale en Afrique. Commission Economique pour l'Afrique. Maisonneuve et Larousse, PP : 49 - 77.
- BAYOGO Yapégué . (Octobre 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.
- BOLIANG Lin et Al. (2016). Research on the Methods of Releasing the Capacity of Railway for Transferring Freight Flow from Road to Railway.
- 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/10.1080/02255189.1988.9670209>, (20/11/2021)
- DNTTMF. (1994 - 2000). Observatoire statistique des transports du Mali.
- DNTTMF. (2015 - 2017). Observatoires des Transports. Annuaire statistique des transports du Mali (In french) , PP 153.
- DNTTMF. (2010 - 2017). Statistiques des transports du mali. observatoire des transports du Mali .
- FIGLIOZZI M. (2010). Vehicle Routing Problem for Emissions Minimization." Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board 2197 , 1 - 7.
- HECHT J. et All. (1997). Rapport de l'OCDE sur le commerce et l'environnement. Paris: OCDE.
- JOUMARD R. (2006). Les impacts des transports sur l'environnement. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRTS) , P 21.
- JOY et ANDREW. (1997). Rapport de l'OCDE sur le commerce et l'environnement. Paris: OCDE.
- loi n°. (2005). classement des routes en république du Mali. DNTTMF.
- Mali, I. . (Février 2003). Perspectives de la population résidente du Mali 1999 - 2024. Bamako: Tome 6.
- OCDE. (Du 24 - 27 Mars 1996). Vers des transports durables. Conférence de Vancouver , 206 pages.
- OECD. (2006). Decoupling the environmental of transport from economic grow . (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT)."
 OECD; VICTORIA TRANSPORT POLICY INSTITUTE (2006).
- SEGUIN M. (Avril 2009). Etudes et Documents: Transports et environnement: Comparaisons Européennes. Commissariat General au Developpement Durable N°13.

- 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.
- World Bank Group. (2014). Climate and carbon finance for sustainable development. ANNUAL REPORT: 1.
- World bank. (2004). Transport support to Sustainable Economic Growth. Annual World Bank Report on sustainability.
- YI Qu et al. (2014). Sustainability SI: Multimode Multicommodity Network Design Model for Intermodal Freight Transportation with Transfer and Emission Costs. Netw Spat Econ.