

# ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DE CHAUSSÉE SOUPLE MALAGASY :

## STRUCTURE INITIALE DE LA ROUTE NATIONALE 2

N. RANDRIANANDRASANA<sup>1-2</sup>, M.P RANDRIANARISON<sup>1-2</sup>, B. RAHELIARILALAO<sup>1-2</sup>

<sup>1</sup>Équipe d'Accueil Doctorale de Géosciences, Technologie des Poudres, Matériaux Divisés et Habitat Économique (EAD-GTPMDHE)

<sup>2</sup>École Doctorale Ingénierie et Géoscience (ED-INGE)

*Correspondant* : randria.ntso3f@gmail.com

### RÉSUMÉ

Presque la totalité des chaussées des réseaux routiers revêtus malagasy connaît une structure initiale traditionnelle souple. Et depuis, les questions technicoéconomiques ont été le centre des débats en matière d'ingénierie routière malagasy. A ce profit, les facettes environnementales, piliers des Objectifs du Développement Durable, sont peu explorées et même nettement délaissées. Cet article soulève ainsi, les problématiques mondiales sur le rejet de gaz à effet de serre, l'épuisement de ressources primaires énergétiques non-renouvelables, l'acidification et l'eutrophisation aquatique, puis la rareté de la couche d'ozone, qui sont, pour la première fois, affectés dans le cadre de la chaussée souple malagasy. Le prototype de cette étude va se porter sur la structure initiale de la route nationale 2 entre les PK 285 et PK 317. La quantification des impacts se fait, selon la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), guidée par les normes ISO 14040-14044. La frontière de l'étude va du « berceau à la construction initiale » et tient en compte une Unité Fonctionnelle de 1km de la structure de chaussée. Les données d'Inventaire de Cycle de Vie ont été implémentées dans SIMA PRO, logiciel d'ACV Néerlandais doté d'une grande réputation mondiale, pour être traduit en valeurs d'impacts. A ce stade, on s'intéresse au plus près aux données génériques d'inventaire en matière de construction routière, intégrées dans SIMA PRO lui-même et aussi évoquées dans les littératures. Ces dernières sont recadrées ensuite au plus près des contextes malagasy (contexte géographique, technologique, énergétique...). L'analyse dévoile un bilan d'impact en consommation énergétique non renouvelable de 3300000MJ, une émission de Gaz à Effet de Serre de 114000kgéqCO<sub>2</sub>. Les indicateurs d'impacts en potentiel de l'Acidification et eutrophisation aquatique et de la destruction de l'ozone stratosphérique sont respectivement de 898kgéqSO<sub>2</sub>, 4,2kgéqPO<sub>4</sub>, 6,586géqCFC-11. Les phases de production des matériaux routiers, d'acquisition des Matières Premières et les transports routiers des matériaux constituent nettement les plus grands contributeurs d'impacts. Cette étude suscite l'intérêt des intervenants en matière de construction routière malagasy surtout, en se penchant davantage sur l'adoption d'une politique de mitigations d'impacts environnementaux.

**Mots-clés** : Impacts environnementaux, chaussée souple, Analyse de cycle de vie, SIMA PRO

## **ABSTRACT**

Almost all pavements in Madagascar's bituminous surfacing road networks have a traditional flexible initial structure. Since then, technical and economic issues have been the focus of debate in Malagasy road engineering. To this end, the environmental aspects, pillars of the Sustainable Development Goals, have been little explored and even clearly neglected. This article thus raises the global issues of greenhouse gas emissions, the depletion of non-renewable primary energy resources, aquatic acidification and eutrophication, and the depletion of the ozone layer, which are, for the first time, affected in the context of the Malagasy flexible pavement. The prototype of this study will focus on the initial structure of National Road 2 between KP 285 and KP 317. The quantification of the impacts is done according to the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, guided by the ISO 14040-14044 standards. The system boundary of the study is « from cradle to grave » and takes into account a 1km Functional Unit of the pavement structure. The Life Cycle Inventory data was implemented in SIMA PRO, a Dutch LCA software with a worldwide reputation, to be translated into impact values. At this stage, the focus is on the generic inventory data for road construction, which is integrated in SIMA PRO itself and also mentioned in the literature. These are then reframed as closely as possible to the Malagasy context (geographical, technological, energy context, etc.). The analysis reveals an impact assessment in terms of non-renewable energy consumption of 3300,000MJ and a greenhouse gas emission of 114,000kgeqCO<sub>2</sub>. The impact indicators for potential aquatic acidification and eutrophication and stratospheric ozone depletion are respectively 898kgeqSO<sub>2</sub>, 4.2kgeqPO<sub>4</sub>, 6.586geqCFC-11. The production of road materials, the acquisition of raw materials and the road transport of materials are clearly the largest contributors to the impacts. This study raises the interest of Malagasy road construction stakeholders, especially in adopting an environmental impact mitigation policy.

**Keywords :** Environmental impacts, flexible pavement, Life Cycle Assessment, SIMA PRO

## **1- INTRODUCTION**

Les diverses problématiques liées aux bouleversements climatiques globaux, aux épuisements des ressources énergétiques fossiles, aux dérèglements des milieux terrestres et aquatiques sont de plus en plus alarmantes. Particulièrement, le secteur du Bâtiment et des travaux publics figure parmi les plus énergivores et les plus émissifs en polluants[1], [2]. Madagascar compte actuellement 5000km de réseaux routiers revêtus dont majoritairement en structure initialement souple[3]. Cette structure de chaussée techniquement traditionnelle est caractérisée par une succession de couches de revêtements bitumineux surmontant les couches d'assises granulaires[4]. Jusque-là, peu de littératures scientifiques traitent l'analyse environnementale des chaussées souples jugées peu fiables au profit des structures plutôt techniquement plus avancées[1], [5].

Aussi, dans le pays, le décompte environnemental d'un projet routier suit une démarche rudimentaire loin d'être efficace pour faire face aux objectifs du développement durable. Et cela a été récemment constaté dans le cadre du projet de reconstruction de la Route Nationale 9. Cette pratique récurrente ne pourrait jamais ressortir des chiffrages d'impacts plus pertinents. Le but de notre étude est de mettre en exergue l'évaluation d'impacts environnementaux selon la méthodologie d'ACV[6]–[9], à l'égard de la structure initiale souple de la Route Nationale 2 (RN2) malagasy. L'idée est de faire ressortir les chiffrages d'indicateurs d'impacts en potentiel d'épuisement de ressource énergétique, de réchauffement climatique, d'eutrophisation et acidification aquatique ainsi que de la destruction de l'ozone stratosphérique à l'égard de la chaussée malagasy. Pour ce cas d'étude, SIMA PRO a été choisi pour traiter ce modèle d'analyse environnementale. SIMA PRO, logiciel d'ACV jugé comme ayant le mieux équipé de fonctionnalité, traite le flux de matière, énergétique, émission de chaque processus de cycle de vie en valeurs agrégées d'indicateurs d'impacts. Les inventaires de cycle de vie de chaque processus se concentrent au niveau des données génériques traitant le même volet technologique. Outre, des facteurs d'ajustement liés aux contextes géographiques, énergétiques sont apportés à ces données d'inventaires. Dans ce cas, une multitude de processus élémentaires regroupant chaque phase de cycle de vie, relatant les contextes de Madagascar, a été créée dans SIMA PRO.

## **2- METHODE ET MATERIEL**

### **2-1- À propos de la zone d'étude**

La zone d'étude correspond à un tronçon de la chaussée de la Route Nationale N°2 Malagasy entre les PK 285 et PK 317, sous sa structure initiale.

## 2-2- Hypothèse principale

La structure initiale prise en compte dans cette étude est celle qui a été constatée suite au sondage sous-chaussée du Laboratoire National des Travaux Publics (LNTPB) effectuée entre les PK 285 et PK 317 de la RN2 [10].

## 2-3- Application du cadre méthodologique de l'ACV à l'étude

Les cadres méthodologiques de l'ACV sont préconisés dans les normes ISO 14040-44[6]–[9], [11]. Notamment, la banque mondiale a déployé cette méthode comme moyen d'investigation environnementale des chaussées en Asie de Sud-Est[12]. Aussi, selon **Bekker et al.**[13] l'ACV est la méthodologie la plus appropriée pour mieux cerner les problématiques environnementales dans le secteur de construction.

### 2-3-1- Hypothèses spécifiques

#### *a-À propos des distances d'acheminement des matériaux*

Les distances prises en compte découlent, soit :

- de la situation géographique de la RN2
- des localités du gîte et de la carrière selon le LNTPB
- des valeurs posées par hypothèses

**Tableau 1** : les distances d'approvisionnement des matériaux

| Matériaux                          | Distances d'acheminements (km) |                        |                   |                           |
|------------------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------|
|                                    | Port maritime                  | Centrale de concassage | Centrale d'enrobé | Chantier de mise en œuvre |
| Bitume                             | 8500                           | -                      | 139               | -                         |
| Enrobé                             | -                              | -                      | -                 | 1                         |
| Eau de compactage                  | -                              | -                      | -                 | 1                         |
| Émulsion de bitume                 | 8500                           | -                      | -                 | 216                       |
| Roche mère                         | -                              | 0,5                    | -                 | -                         |
| Granulat couche de base            | -                              | -                      | -                 | 3                         |
| Granulat pour couche de revêtement | -                              | -                      | 15                | -                         |
| Matériaux Sélectionnées            | -                              | -                      | -                 | 2                         |

#### *b-À propos de l'analyse*

L'analyse exclut la construction et l'entretien des équipements, des immobilisations (infrastructure de stockage, centrale...), des engins qui pourraient intervenir dans un chantier routier.

### *c-Hypothèses techniques*

La formulation des matériaux de revêtements et le dosage d'émulsion d'imprégnation sont d'après la norme NF P 988-130[14].

#### **2-3-2- Définition du champ et des objectifs**

##### *a- Objectifs de l'étude*

Le but est d'analyser et de chiffrer, pour la première fois, les indicateurs d'impacts en potentiel d'épuisement des ressources énergétiques non-renouvelables, de réchauffement global, d'acidification et d'eutrophisation aquatique, d'acidification terrestre, de la rareté de la couche d'ozone en matière d'une structure de chaussée souple malagasy. Cette étude a choisi comme référence, une analyse environnementale axée à la structure initiale de la chaussée de la RN2 malagasy entre les PK 285 et PK 317.

##### *b- Définition du champ d'étude*

###### *b-1- Unité Fonctionnelle (UF)*

On choisit comme UF, 1km de structure initiale de la chaussée de la RN2 malagasy entre les PK 285 et PK 317.

###### *b-2- Frontière de l'étude*

###### *b-2-1- Typologie des matériaux*

Ce choix typologique suit la logique du devenir des matériaux, en passant par leur état brut jusqu'à leur état apte en tant que matériaux routiers.

**Tableau 2** : typologie des matériaux

| Typologies | Significations   | Exemples                                |
|------------|--|---|
| MP         | Matières Premières (locales ou non-locales) extraites depuis les ressources naturelles       | Les Matériaux Sélectionnés (MS)         |
| MPAT       | Matières Premières Avec Traitement   | Les roches mères                        |
| MPDU       | Matières Premières Directement Utilisables, c.-à-d. transportés directement vers le chantier | Les MS                                  |
| MI         | Matériaux Intermédiaires issus de traitement des MP  | Les granulats                           |
| MIDU       | MI Directement Utilisables   | Les Graves Concassés Non-Traités (GCNT) |
| MIAT       | MI Avec Traitement   | Les granulats pour enrobés              |
| MIC        | Matériaux Intermédiaires Composés issus de traitement des MI                                 | Les enrobés                             |
| MIDUIM,    | Les matériaux MIDU importés  | L'émulsion de bitume                    |
| MIATIM     | Les matériaux MIAT importés  | Le bitume                               |

### *b-2-2- Frontière de l'étude*

La frontière de l'étude va du « berceau à la construction initiale de la chaussée » et tient en compte les phases du cycle de vie suivantes :

- L'acquisition des MPAT et/ou MPDU locales et non-locales
- Le transport des MPAT vers la centrale de traitement adéquate
- Le transport des MPDU vers le chantier
- La transformation des MPAT en MIAT et/ou en MIDU
- Le transport des MIDU vers le chantier
- Le transport des MIAT vers la centrale MIC adéquate
- La production des MIC
- L'importation des MIDUIM et MIATIM
- La construction de la structure initiale de chaussée

Ainsi, la phase de production des matériaux concerne l'acquisition des MPDU, la transformation des MPAT en MIAT et/ou en MIDU puis la production des MIC.

Conformément aux objectifs et au choix de la frontière de l'étude, cette étude ne tient pas encore en compte les évolutions structurelles de la chaussée depuis sa structure initiale.

### **2-3-3- Méthodologie d'Inventaires de Cycle de Vie (ICV) et calcul d'impacts**

#### *a- Méthodologie d'ICV*

Des sondages sous-chaussées entre les PK 285 et PK 317 ont été effectués pour conclure la coupe transversale de la structure initiale de la chaussée. Ces sondages montrent[10] :

- Une couche de fondation en M.S quartzite, d'épaisseur de 42cm
- Une couche de base en Grave Concassée Non-Traitée, d'épaisseur variant de 16 à 28 cm
- Une couche d'enrobé bitumineux de type Béton Bitumineux Semi-Grenu 0/10 (BBSG 0/10), d'épaisseur variant de 3 à 4,5 cm

On désigne par Ouvrage fonctionnel (OF) ces couches de chaussée.

La largeur de la chaussée est de 5,5m[3].

On a retenu la structure d'étude ci-après :

**Tableau 3** : les ouvrages fonctionnels

| O.F                  | Épaisseurs (m) |
|----------------------|----------------|
| Couche de fondation  | 0,42           |
| Couche de base       | 0,28           |
| Couche de revêtement | 0,045          |

Cette dernière permet d'obtenir les Flux de Références (FR) des matériaux associés à chaque typologie des matériaux. Outre, les données d'inventaires des engins de mise en œuvre sont établies :

- Soit à partir de leurs durées de fonctionnement
- Soit à partir de leurs consommations spécifiques tirées dans les littératures.

*b- Méthode d'évaluation d'impacts*

Dans cette étude, le modèle d'analyse de type « input / output » des flux relatifs à chaque processus de cycle de vie a été déployé. L'inventaire des flux d'intrant énergétiques et d'émissions à chaque processus d'UF unitaire est primordial. Cette dernière permet de relier les facteurs d'impacts (FI) pour aboutir aux Valeurs d'Impacts (VI) attribuées aux FR des intrants à chaque phase de cycle de vie "i" selon la relation suivante :

$$(VI)_i = (FR)_{im} \times (FI)_m \quad (1)$$

$$(VI) = \sum_i (VI)_i \quad (2)$$

Avec :

- $(VI)_i$  : valeurs d'impacts à la phase de cycle de vie "i"
- $(FR)_{im}$  : Flux de référence de matériaux (ou de services) "m" associés à la phase de cycle de vie "i"
- $(FI)_m$  : Facteurs d'Impacts associés aux flux de matériaux (ou de services) "m"
- $(VI)$  : valeurs d'impacts tout au long de la frontière de cycle de vie

*2-6-1- Source des données génériques de facteurs d'impacts*

| Flux               | Sources bibliographiques de données | Facteurs de corrections  |
|--------------------|-------------------------------------|--|
| Granulats          | The World Bank[12],IVL[15]          | Contextes électriques du Réseau Interconnecté de Toamasina (RIT)[16] et Circuit des hydrocarbures malagasy[17] |
| Bitume             | Eurobitume[18]                      | -  |
| Émulsion de bitume | Eurobitume[18]                      | -  |
| Bétons bitumineux  | IVL[15], Eurobitume[18], ULCD       | Contextes électriques RIT[16] et Circuit des hydrocarbures malagasy[17]  |
| MS                 | Ecoinvent V.2                       | Contexte sur le circuit des hydrocarbures malagasy[17]   |

|                               |   |  |
|-------------------------------|---|--|
| Transport routier             | Agri-footprint  | Contexte sur le circuit des hydrocarbures malagasy[17] |
| Transport maritime            | Ecoinvent V.3   |  |
| Engins de mise en œuvre       | The World Bank[12],IVL[15], Ecoinvent V.2                               | Contexte sur le circuit des hydrocarbures malagasy[17] |
| Énergies électriques malagasy | Données sur le Réseau Interconnecté de Toamasina (RIT) selon JIRAMA[16] | -  |
| Hydrocarbures malagasy        | Circuit d’approvisionnement des hydrocarbures selon l’OMH[17]           | -  |

### 3- RÉSULTATS

Les valeurs d’indicateurs d’impacts obtenus sont récapitulées dans le tableau ci-après.

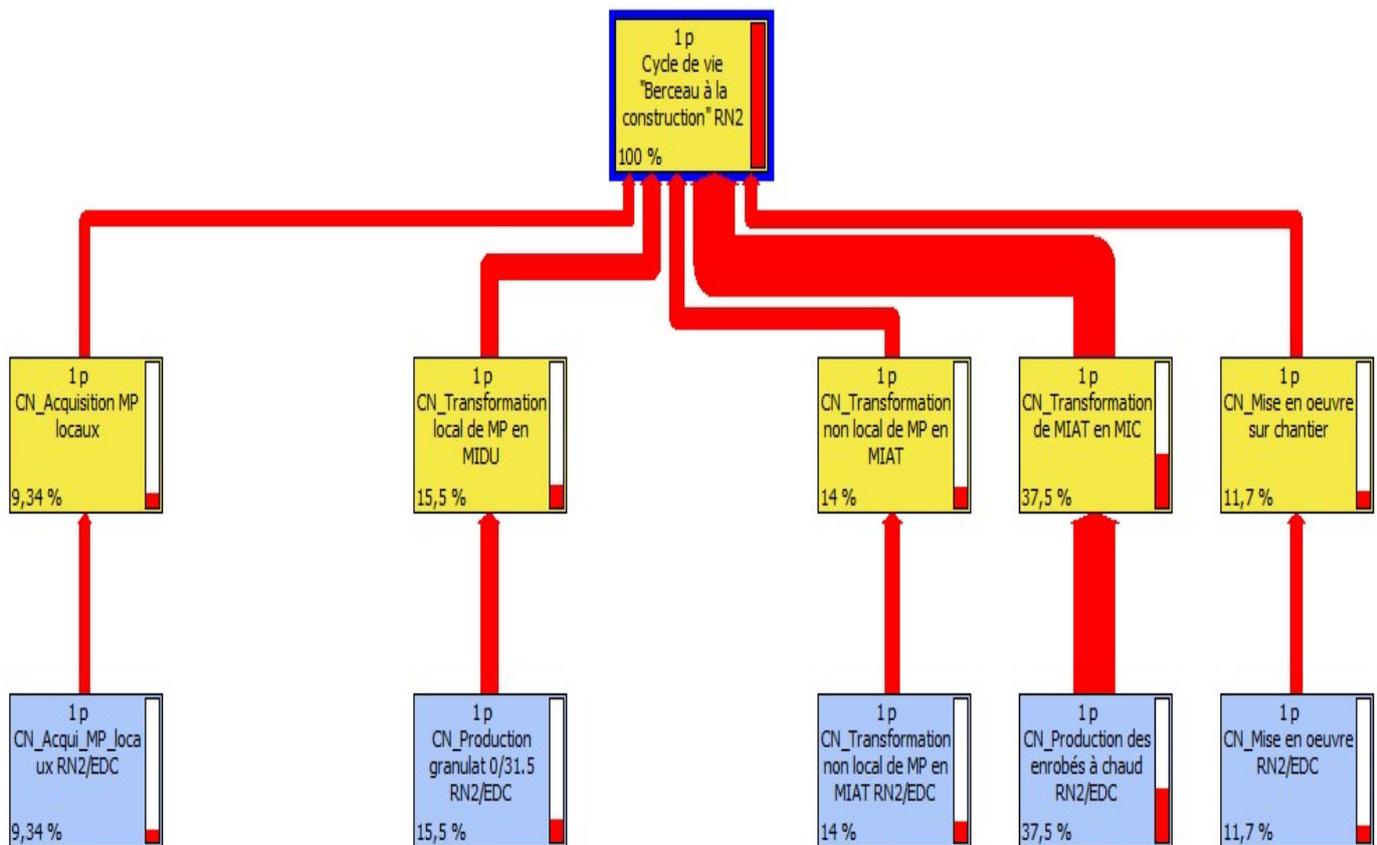
**Tableau 4** : les valeurs des indicateurs d’impacts

| Indicateurs d’impacts                     | Valeurs | Unités                |
|---|---------|-----------------------|
| Rareté de la couche d’ozone               | 0,00658 | kg CFC-11 eq          |
| Acidification aquatique                   | 898     | kg SO <sub>2</sub> eq |
| Eutrophisation aquatique                  | 4,2     | kg PO <sub>4</sub> eq |
| Réchauffement global                      | 114000  | kg CO <sub>2</sub> eq |
| Consommation énergétique non-renouvelable | 3300000 | MJ                    |

#### 3-1- Contribution des phases de cycle de vie

##### 3-1-1- Vis-à-vis de la Destruction de l’Ozone Stratosphérique (DOS)

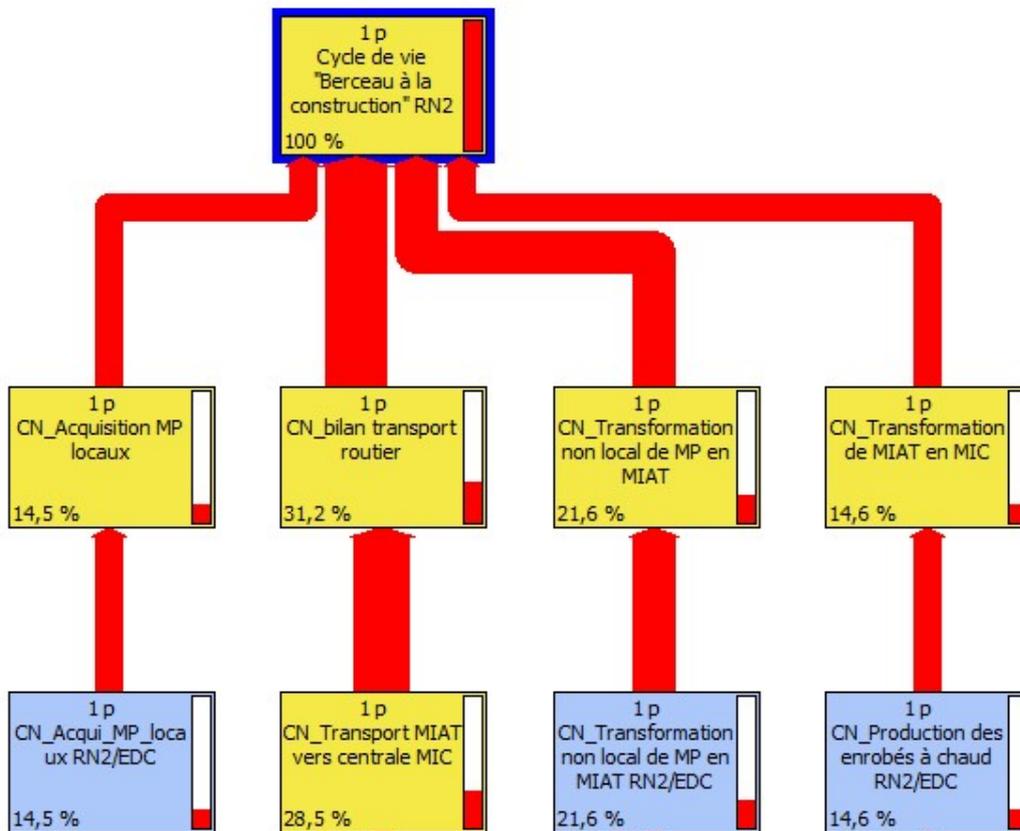
En DOS (**Figure 1**), la phase de production des matériaux est la plus impactante (67%). Principalement la production des enrobés à chaud contribue à elle seule les 37,5% d’impacts, et cela étant suivie par la phase de production de GCNT (15,5%) et de la production du bitume (14%).



**Figure 1** : Analyse de contribution / phases de cycle de vie / DOS

### 3-1-2- Vis-à-vis du Potentiel Acidification aquatique (PA)

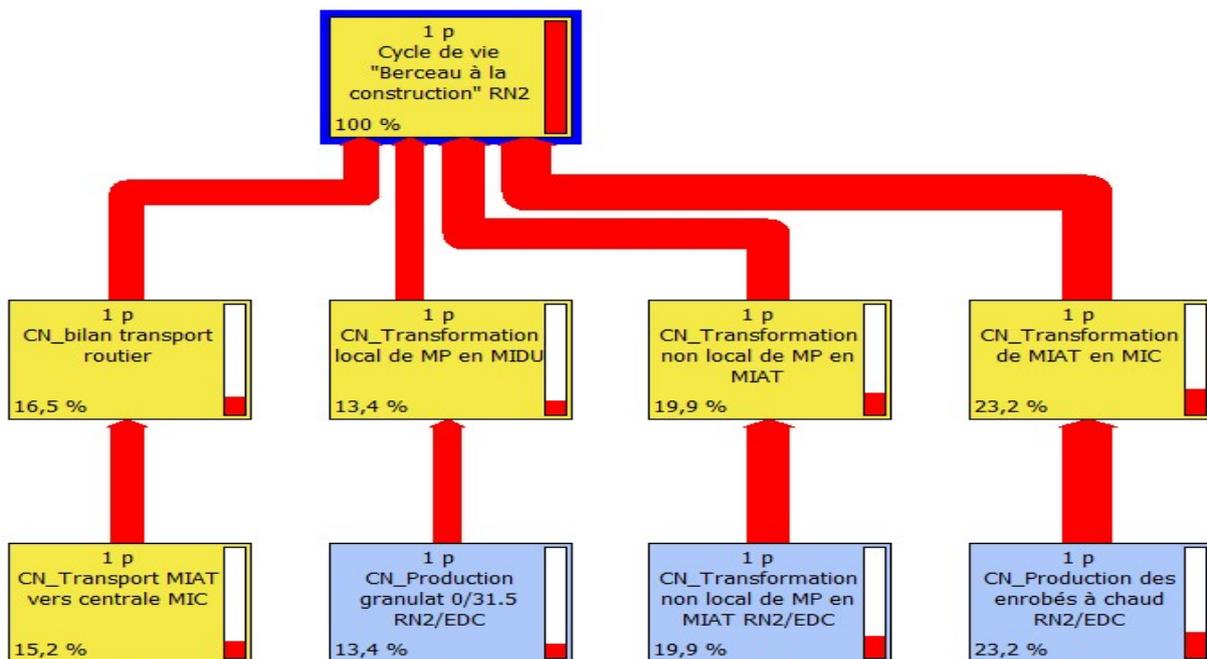
En PA (**Figure 2**), la production des matériaux et le bilan de transport routier sont respectivement les responsables des 36,2 % (dont bitume 21,6% et enrobé 14,6%) et des 28,5% en termes d'impacts.



**Figure 2** : Analyse de contribution / phases de cycle de vie / PA

### 3-1-3- Vis-à-vis du Potentiel Eutrophisation aquatique (PE)

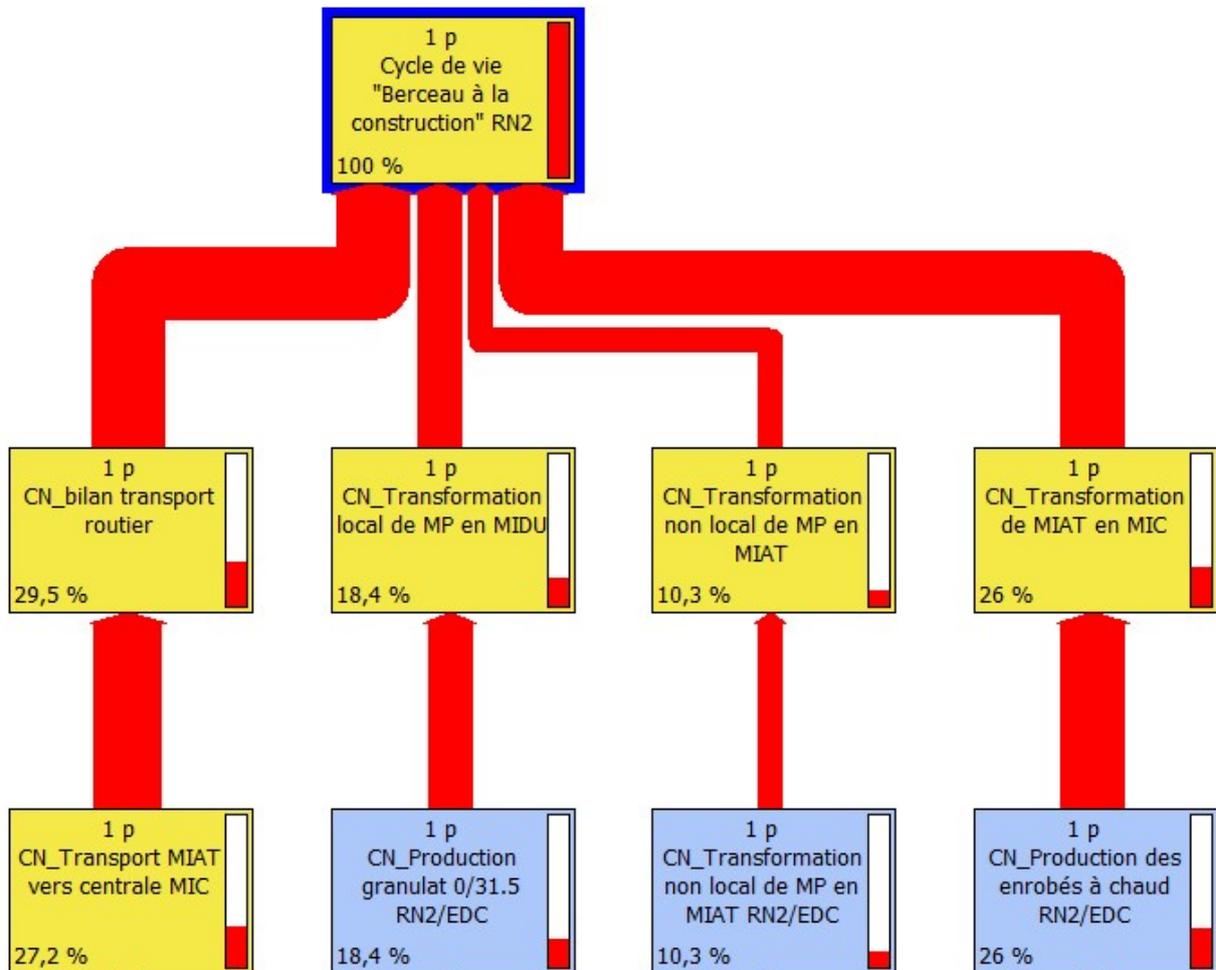
En PE (**Figure 3**), la production des matériaux, le bilan de transport routier assurent respectivement les 56,5% (dont bitume 19,9%, enrobé 23,2%, granulats 13,4) et les 15,2% du bilan d'impacts.



**Figure 3** : Analyse de contribution / phases de cycle de vie / PE

### 3-1-4- Vis-à-vis du Potentiel de Réchauffement Global (PRG)

En potentiel de réchauffement climatique (**Figure 4**), les impacts sont dus principalement aux phases de production des matériaux puis au transport routier en contribuant respectivement aux 54,5% (dont bitume 10,3%, granulats 18,4%, enrobé 26%) puis 29,5% d'impacts.



**Figure 4:** Analyse de contribution / phases de cycle de vie / PRG

### 3-1-5- Vis-à-vis de la Consommation Énergétique Non-Renouvelable (CENR)

En potentiel de la consommation énergétique non-renouvelable (**Figure 5**), la phase d'acquisition des MP non-locales axée principalement à la phase d'extraction du pétrole brut prédomine fortement en termes d'impacts (56,8%). La production des matériaux et le bilan de transport routier se placent en prochain rang en termes d'impacts (respectivement de 21,84% et 14,8%).

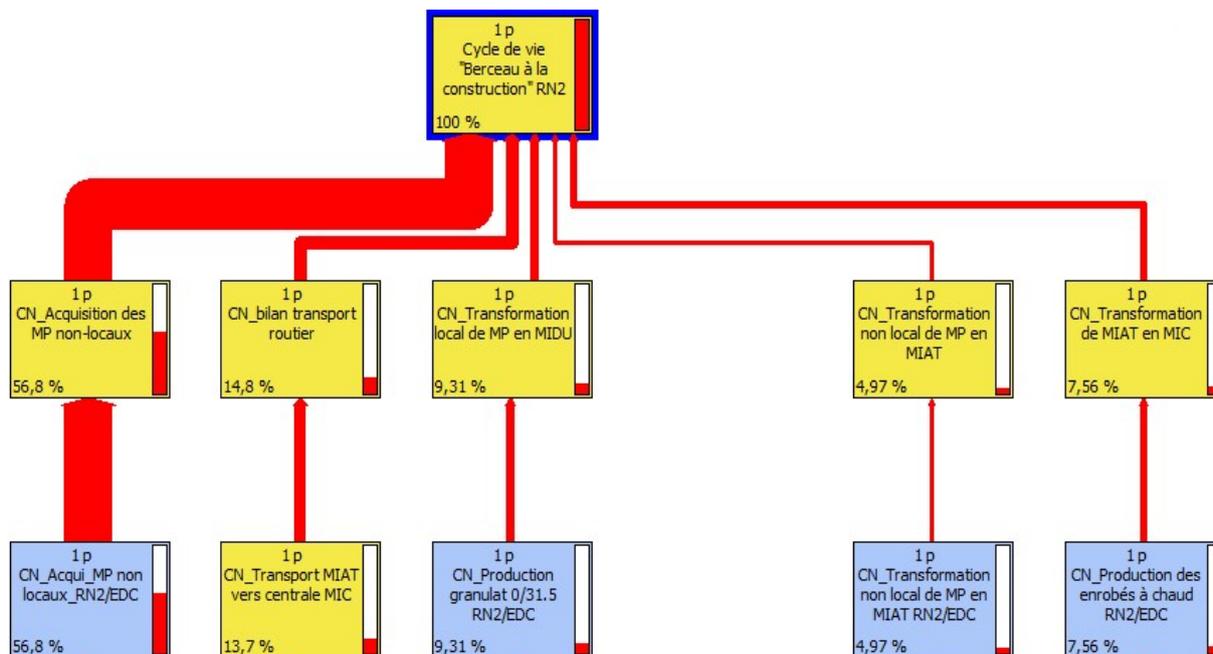


Figure 5: Analyse de contribution / phases de cycle de vie / CENR

### 3-2- Contribution des Ouvrages Fonctionnels

A l'échelle de tous les indicateurs d'impacts (**Figure 6**), l'OF « couche de revêtement » contribue fortement au bilan d'impacts du cycle de vie.

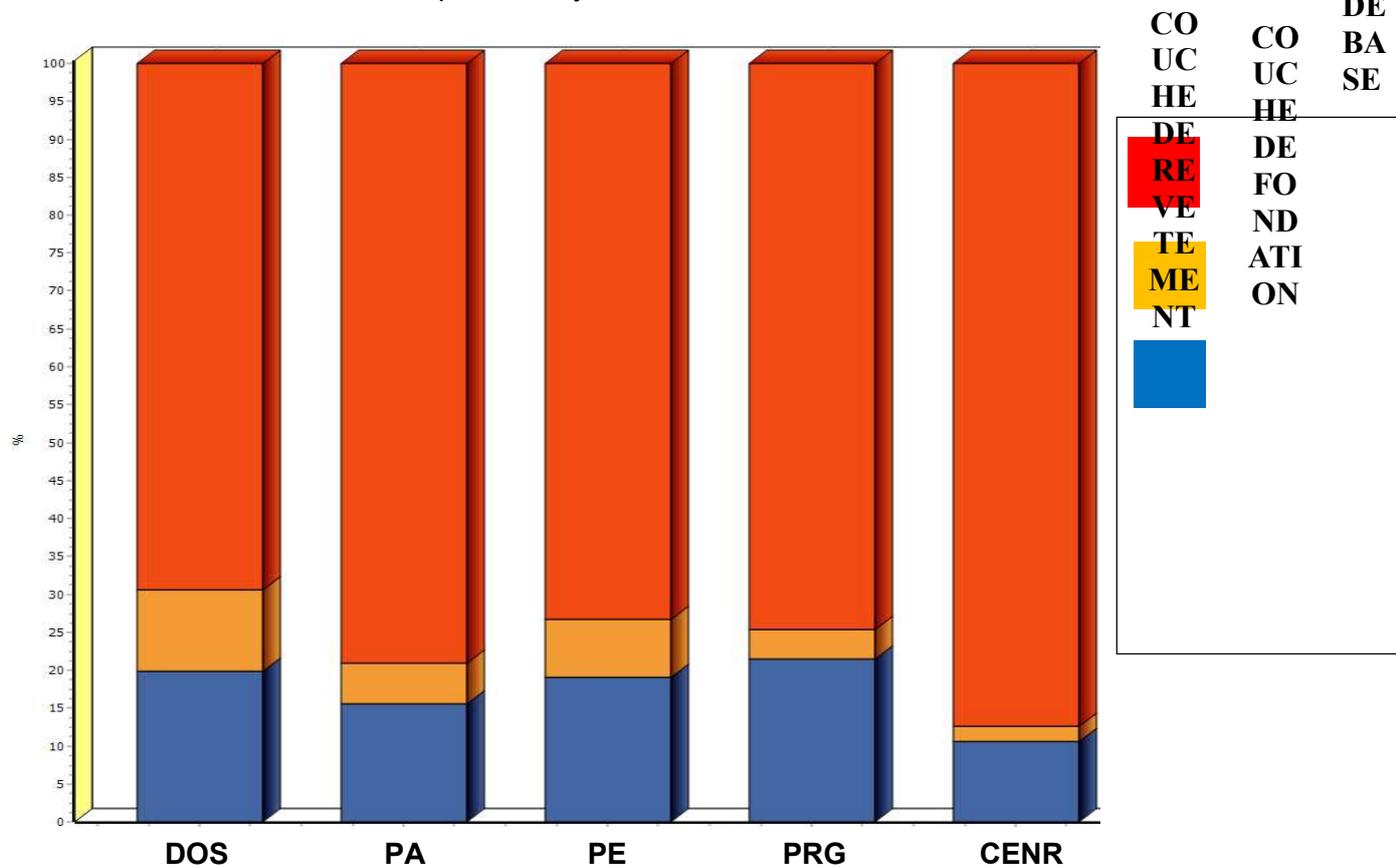


Figure 6: Analyse de contribution / OF

#### 4- DISCUSSION

En considérant tous les indicateurs d'impacts, la phase de production des matériaux est la plus impactante (21,84% à 67%). Un review général de littératures s'étalant sur une multitude de frontières d'étude, mené par **Jiang et al.[5]** a bien confirmé ce résultat. D'une même allure avec nos résultats, **Mroueh et al[19]** soulignent que les enrobés, la bitume et les granulats sont les matériaux les plus impactants.

Vis-à-vis des OF, selon nos résultats, la couche de revêtement est le foyer principal d'impacts. A cet effet, **Jiang et al.[5]** ont mis en évidence que plusieurs cas d'étude d'ACV routière traitent uniquement la couche de revêtement.

Concernant le transport routier, selon **Chowdhury et al[20]** ce facteur tient une place importante sur la performance environnementale en Consommation Energétique (CENR), en Potentiel de Réchauffement Global (PRG) puis en Potentiel d'Acidification (PA) des matériaux. Ces auteurs[20] conseillent l'utilisation des matériaux routiers à faible distance de transport. Ces constats ne font pas l'unanime à nos résultats. En effet, vis-à-vis de PA et selon nos résultats, le bilan du transport routier est le premier contributeur d'impacts (28,5 %). Non loin de cela, selon nos résultats sur le PRG, le bilan du transport routier est le plus impactant en devançant la phase de production des enrobés, des granulats et du bitume. Puis, vis-à-vis de la CENR, le bilan du transport routier figure en deuxième rang en termes d'impact de cycle de vie.

Particulièrement, le guide ADEME[21] avançait une émission en GES de 15 à 20 kgéqCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, valeur très proche du résultat. De même, l'investigation menée par la banque mondiale[12] sur la chaussée bitumineuse souple indienne conclut une émission de 103 téqCO<sub>2</sub>/km, valeur très similaire aussi à nos résultats. Outre, plusieurs littératures[2], [22] identifient que les phases de productions des matériaux routiers (dans notre cas 48,8%) et celles des transports routiers (dans notre cas 29,9%) sont les plus émissives de GES.

Une attention plus particulière se porte sur l'indicateur d'impacts en CENR. Nos résultats considèrent la phase d'extraction des M.P comme étant la plus énergivore. Non moins, **Wang et al. [23]** et **Kayo et al.[24]** partagent ce même avis. Contrairement, **Park et al. [25]** ne font pas l'unanime, en admettant que c'est plutôt la phase de production des matériaux est la plus énergivore au sein d'une structure de chaussée bitumineuse coréenne. Cette divergence s'explique par le fait que **Park et al. [25]** intègrent la phase d'extraction des MP, en exemple l'extraction du pétrole brut nécessaire à l'élaboration du bitume, au sein de la phase de production des matériaux.

## **5- CONCLUSION**

L'intérêt de cette étude est de montrer aux parties prenantes malagasy combien les infrastructures routières contribuent-elles aux impacts non négligeables à l'égard de l'environnement. Pour 1km de structure initiale, entre les PK 285 et PK 317, de chaussée souple de la RN2 malagasy, 6 (six) valeurs d'indicateurs d'impacts ont été retenues dont 3300000MJ d'énergie grise non renouvelable, 898kgéqSO<sub>2</sub> et 4,2 kgéqPO<sub>4</sub> en potentiel d'acidification et eutrophisation aquatique, puis 0,006586 kgéqCFC-11 en potentiel de destruction de l'ozone stratosphérique et 114000kgéqCO<sub>2</sub> d'émission de GES. On constate aussi que les phases de cycle de vie les plus contributrices d'impacts siègent au niveau de la production des matériaux (MIDU et MIC), des transports routiers, et de l'acquisition des MP principalement des pétroles bruts.

Quant aux matériaux, l'utilisation du bitume, de l'enrobé à chaud et des granulats concassés sont les forts contributeurs d'impacts. En conséquence, le revêtement routier est l'ouvrage fonctionnel le plus conséquent en termes d'impact.

C'est au niveau de ces constats qu'on devrait, adopter une politique de minimisation d'impacts environnementaux à l'endroit des chaussées souples malagasy. En exemple, si on prévoit à recours aux énergies renouvelables hydrauliques et photovoltaïques aux RIT, on connaîtrait une diminution d'impact de l'ordre de 11,21%, 22,28% respectivement à l'égard de la CENR et du PRG.

La méthodologie d'analyse environnementale d'un projet mettant l'accent sur un véritable chiffrage, comme le cas de l'ACV, montre une grande fiabilité pour l'adoption d'une politique de mitigation d'impacts. Particulièrement, sur le cadre d'un projet routier, cette politique devrait s'articuler autour du choix des matériaux, à leur distance d'approvisionnement, au procédé de fabrication des matériaux MIC. Espérons que ce fruit de recherche pousse l'État malagasy vers la bonne voie de la redynamisation tout autour de la pratique de l'élaboration du dossier environnemental d'un quelconque projet.

En perspective, la prochaine étude s'étend sur une frontière qui va tenir en compte les évolutions structurelles de la RN2. Ainsi, les technologies d'entretiens observées sur la RN2, seront mises à l'épreuve d'une analyse comparative environnementale.

## **6- REMERCIEMENTS**

Ce travail n'a pas pu aboutir, sans l'octroi d'une licence d'utilisation temporaire accordée par le développeur de SIMA PRO, en incluant toutes les bases de données payantes. Je profite alors cette occasion pour adresser plus particulièrement mes remerciements à Madame RAHELIARILALAO Bienvenue, professeure titulaire, d'avoir assuré les négociations nécessaires auprès du « Pré consultants, Netherlands » pour l'acquisition de ladite licence.

## 7- RÉFÉRENCES

- [1] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, et A. Castell, (2017). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. In *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, p. 394-416. Netherlands : Elsevier Ltd.
- [2] T. Blankendaal, P. Schuur, et H. Voordijk, (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. In *J. Clean. Prod.*, vol. 66, p. 27-36. Netherlands / Elsevier Ltd.
- [3] MTPT, (2004). Banque de données routières malgaches.
- [4] CEBTP, (1984). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux.
- [5] R. Jiang et P. Wu, (2019). Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions. In *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 77, p. 148-163. Netherlands : Elsevier Ltd.
- [6] ISO 14040, (1997). Analyse de Cycle de Vie : Principes et cadre. In *Management environnemental*.
- [7] ISO 14041, (1998). Analyse de Cycle de Vie : Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire. In *Management environnemental*.
- [8] ISO 14042, (2000). Analyse de Cycle de Vie : Évaluation d'impact du cycle de vie. In *Management environnemental*.
- [9] ISO 14044, (2006). Life cycle assessment : Requirements and guidelines. In *Management environnemental*.
- [10] A. J. Ratiarison, (2013). Investigations géotechniques pour la détermination des causes probables des dégradations prématurées sur la RN 2 du PK 285 au PK 317 : proposition de solutions. In *mémoire de fin d'études DEA en géotechnique*.
- [11] ISO 14043, (2000). « ISO 14043 : Analyse de Cycle de Vie : Interprétation. In *Management environnemental*.
- [12] The World Bank, (2011). Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation. In *Asia Sustainable and Alternative Energy Program*.
- [13] P. C. F. Bekker, (2002). A life-cycle approach in building. In *Build. Environ.*, vol. 17, n° 1, p. 55-61.
- [14] AFNOR, (1998). NF P 98-130, revêtement de chaussées, Bétons Bitumineux Semi-Grenus (BBSG) : Définition – Composition – Classification. In *Norme française AFNOR*.
- [15] IVL, (2001). Life Cycle Assessment of Road. In *Swedish Environmental Research Institute*.
- [16] JIRAMA, (2018). Statistiques de production électrique. (Fichier sous format tableur).
- [17] OMH, (2019). Bulletin pétrolier.
- [18] EUROBITUME, (2012). Life cycle inventory : BITUMEN.

- [19] U.M. Mroueh, (2000). Life cycle assessment of road construction. In *Finnish National Road Administration*. Helsinki:
- [20] R. Chowdhury, D. Apul, et T. Fry, (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. In *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, n° 4, p. 250-255. Netherlands : Elsevier.
- [21] ADEME, (2007). Guide des facteurs d'émissions version 5.0.
- [22] R. Mao *et al.*, (2007). Quantification of carbon footprint of urban roads via life cycle assessment: Case study of a megacity-Shenzhen, China. In *J. Clean. Prod.*, vol. 166, p. 40-48. United Kingdom : Elsevier Ltd.
- [23] Wang, F., Xie, J., Shaopeng, W., Jiashuo, L., (2021). Life cycle energy consumption by roads and associated interpretative analysis of sustainable policies. In *j.rser.2021.110823*.
- [24] Kayo et Watanabe, (2015). Life cycle greenhouse gas emissions of woodchip-paved walkways using tsunami salt- damaged wood: examination in Otsuchi, Iwate Prefecture. In *J. Wood Sci.* 61 : 620–629.
- [25] K. Park, Y. Hwang, S. Seo, et H. Seo, (2003). Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways. In *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 129, n° 1, p. 25-31.