



Journées de Recherche des ISTs et de leurs partenaires internationaux - 2 et 3 décembre 2020, Antsiranana  
« **L'innovation et le développement durable : perspectives, enjeux et défis sociétaux** »

## **Article 16 : Analyse de Cycle de Vie des scénarios de réhabilitation des chaussées : cas d'un tronçon de la RN35 malagasy**

**N. Randrianandrasana<sup>1</sup>, M. P. Randrianarison<sup>1</sup>, B. Raheliharilalao<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience, Université d'Antananarivo

Correspondant : randria.ntso3f@gmail.com

### **Résumé**

Actuellement, le monde est assujéti aux contraintes du développement durable. Particulièrement, le chantier routier n'y échappe pas et figure parmi les secteurs énergivores et très émissifs en polluants. D'où, cet article traite l'analyse comparative des impacts environnementaux des techniques de réhabilitation des chaussées à Madagascar. L'objectif en est la mise en comparaison des trois technologies de réhabilitation de la « Route Nationale RN35 », dont l'une par apport des nouveaux matériaux granulaires, l'autre par traitement au ciment des nouveaux matériaux et la dernière par traitement en place au même produit de l'ancienne couche d'assise. Le chiffrage en émission de Gaz à Effet de Serre et la consommation énergétique primaire des trois variantes technologiques seront confrontés, conduisant ainsi à une décision orientée vers une échelle plutôt environnementale. D'abord, une étude technique de dimensionnement structurel de la chaussée selon la méthode du « Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris » doit être faite. C'est par la suite qu'on effectue l'analyse environnementale par approche d'Analyse de Cycle de Vie. De la même manière, les flux extrants et les flux intrants de chaque processus, en passant par leur acquisition dans les ressources naturelles, leur transport, leur transformation en matériaux finis et leur mise en œuvre sur le chantier, seront traduits en termes d'impact. La compilation des données d'inventaire et leur traitement se font sous l'outil dénommé « PLAARCE 1.0 » créé en langage Visual Basic Application, couplé avec « Microsoft Excel 2010 ». Les résultats ont

montré une forte dominance de la phase de production des matériaux en termes d'impact. En outre, les différents modes de transports et la mise en œuvre du chantier siègent aux positions suivantes. On remarque que la phase d'acquisition des ressources premières locales est la moins impactant par rapport aux autres. A l'échelle des scénarios, des impacts environnementaux sont constatés plus néfastes, ceux où il y a une intervention du ciment.

**Mots-clés :** Analyse de cycle de vie, chaussée, bitume, ciment, réhabilitation, RN35

## 1. INTRODUCTION

Indéniablement, les infrastructures routières sont les veines de la croissance économique d'un pays. Actuellement, la RN35, comme beaucoup d'autres routes nationales malgaches, ne reçoit aucun entretien périodique. Ainsi, une réhabilitation du réseau est à prévoir d'ici peu.

De temps en temps, l'analyse d'un projet routier réside sur un aspect technique et économique [1]. Mais sollicité par le contexte du développement durable, prôné par la conférence de Kyoto [2], on devrait rallier l'étude technique à une étude environnementale appropriée. Outre, le secteur de transport contribue au 23% des émissions en Gaz à Effet de Serre (GES) mondiale et revient à 30% de la consommation énergétique mondiale [3]. Egalement, un chantier routier représente en moyenne le 5 à 10% de l'émission en GES du secteur de transport [4]. A cet effet, l'impact déstabilise, inévitablement l'écosystème et met en jeu l'économie des ressources énergétiques disponibles.

Initialement, l'étude d'impact se limite sur un constat social sans rendre compte d'un véritable décompte. D'où l'approche d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), méthode d'inventaire des flux entrants et sortants de chaînes de processus d'une activité, et ces derniers seront traduits et chiffrés en valeur d'impact [5]–[10]. L'ACV, dans ses grandes lignes, classifie les impacts en dix grandes catégories. Et dans le cadre de cette étude, on s'intéresse de plus près aux chiffrages de l'émission de Gaz à Effet de Serre (en kilogramme équivalent CO<sub>2</sub> / kgéqCO<sub>2</sub>) et de la consommation énergétique (en Mégajoule / MJ) des trois techniques de réhabilitation du réseau. Pratiquement, l'inventaire de cycle de vie n'est pas possible sans une préalable étude technique. Cette dernière relate les autres informations complémentaires (épaisseur des couches, ...) à l'unité fonctionnelle, dont sa seule définition est jugée incomplète par les auteurs de [11]. Dès lors, cette étude est à la fois une anticipation et une innovation sur le montage du dossier environnemental d'un projet routier à Madagascar, et surtout pour le cas de la RN35.

## 2. CONTENU

### 2.1. Matériels et méthodes

#### 2.1.1. Zone d'étude

L'analyse est axée sur un tronçon de la RN35 entre Malaimbandy et Morondava, dans la Région Menabe. La zone est caractérisée par la rareté des matériaux naturels de remblai et de fondation [12], [13]. En matériaux rocheux, le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) [12] localise cinq carrières sur une distance moyenne de 5km de la RN35.

En matériaux meubles, on a du sable argileux de classe B2 recensé aussi, sur cinq gisements de caractéristiques en Proctor poids volumique maximal sec,  $\gamma_{dmax} [kN / m^3] = 20.06$  et en teneur en eau optimal,  $\omega_{opt} [\%] = 6.22$ . Ils se situent sur une distance moyenne de 1km par rapport à l'axe de la route [13]. La chaussée s'étend sur une largeur de 5,5m avec une structure initiale revêtue d'Enrobé Bitumineux surmontant une couche de base stabilisée au ciment et celle de fondation en sable limoneux [12].

#### 2.1.2. Méthodologie

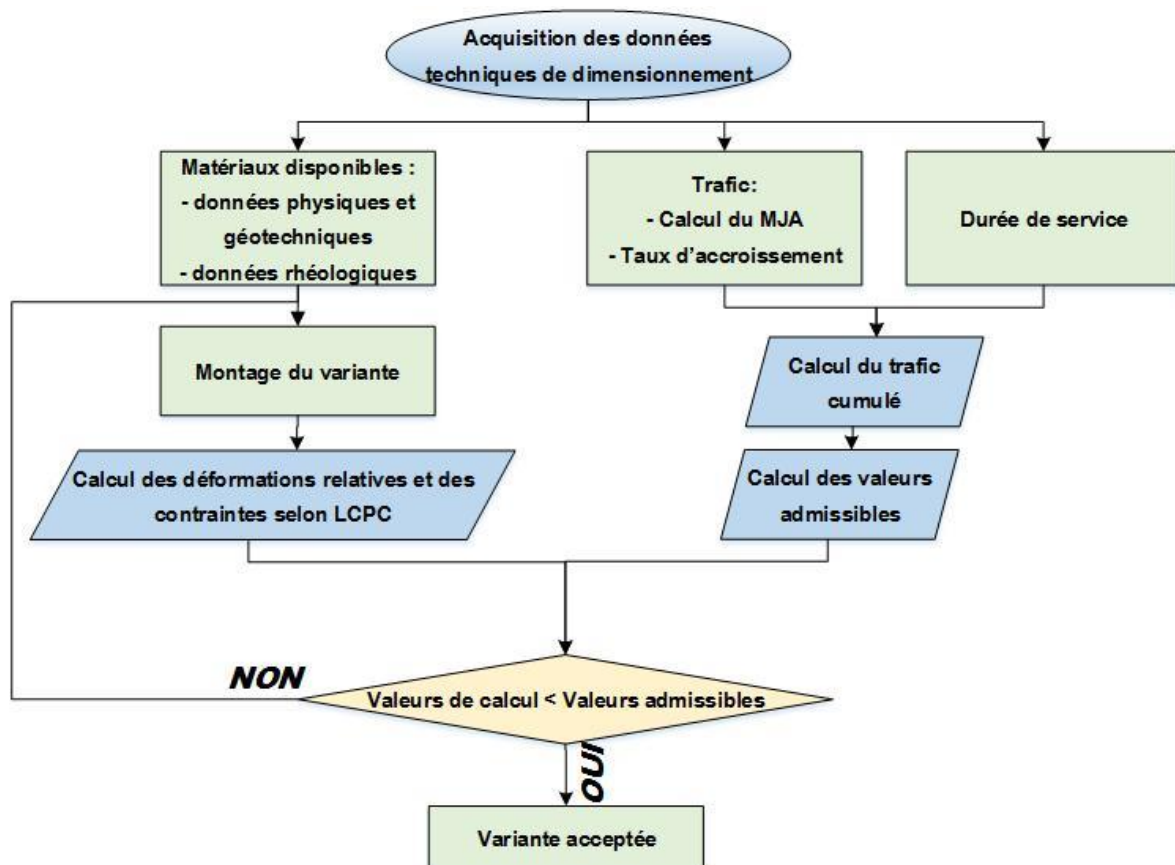
##### 2.1.2.1. Analyses techniques

L'analyse technique repose sur le dimensionnement structurel aboutissant à une multitude des variantes [14]. Madagascar dispose une méthode de dimensionnement qui est celle du LNTPB se limitant uniquement au cas de chaussée souple. Cette faiblesse nous conduit à choisir la méthode de dimensionnement préconisé par LCPC [14].

Les données d'entrée sont essentiellement :

- La classe de la plateforme du sol support,
- La classe du trafic,
- Les caractéristiques mécaniques et géotechniques.

Les calculs se font de façon itérative : si la déformation relative au niveau de chaque couche est supérieure par rapport à la valeur admissible, on recommence le calcul. Pour cela, on utilise l'outil ALIZEE développé par LCPC [15].



**Figure 6 :** Organigramme de calcul de la Méthode de dimensionnement LCPC

Le groupement BCEOM [16] suggère une classe de trafic de TC2, avec une Moyenne Journalière Annuelle en Poids lourd égal à 40. A défaut d'information y afférente, LCPC [14] propose un taux d'accroissement de trafic de 15%.

#### 2.1.2.2. Analyses environnementales : approche par Analyse de Cycle de Vie

##### Définition des objectifs et du champ d'étude :

L'objectif est de comparer la performance environnementale des trois variantes techniques de réhabilitation du tronçon de la RN35 malgache. L'étude évalue, selon la frontière d'étude, l'émission en Gaz à Effet de Serre (GES) et la consommation énergétique primaire de chaque structure donnée.

L'étude s'étend sur une frontière « du berceau au portail » dont 96,8% des cas s'étaient sur ce choix selon les auteurs de [17]. On s'intéresse plus particulièrement aux phases de cycle de vie suivante :

- L'acquisition des matières premières (MP) depuis les Ressources Naturelles ;
- La transformation des MP en Matières Intermédiaires (MI) puis en Matières Intermédiaires Composées (MIC) ;
- La mise en œuvre de la technologie de réhabilitation ;
- Et les différents modes de transport induits (routier et maritime)

Le système de produit tient compte du processus du premier plan et celui du second plan [5]–[10]. On exclut du système l'étape de fabrication des diverses machines, engins,

équipements et construction des bâtiments (entrepôts de stockage, centrale d'enrobé, ...).

Unité fonctionnelle (UF) :

L'UF étant « 1 km de chaque variante technique de réhabilitation ». 72,3% des cas étudiés par les auteurs de [17] ont défini la longueur de la route comme UF.

Modèle de calcul :

On choisit le modèle d'analyse input/output en l'orientant vers un concept matriciel. Notons que, 71,3% des 94 cas d'études d'ACV routières recensés par les auteurs de [17], utilisent ce modèle. Ainsi, les flux entrants (matières, énergies) correspondant à chaque phase de cycle de vie sont stockés dans une matrice rectangulaire et cette dernière sera traduite en valeurs d'impact (output) à partir d'une autre matrice colonne d'impact unitaire. Le système ( $S$ ) est la chaussée et en désignant les différentes couches comme étant le sous-système ( $SS$ ), on a :

$$\left[ I_{SS_i/S(p)} \right] = \left[ FE_{ij/S(p)} \right] \otimes \left[ FI_{j(p)} \right] \tag{1}$$

Avec :

$\left[ I_{SS_i/S(p)} \right]$  : matrice des valeurs d'impact de chaque sous-système  $i$  constitutif du système

$S$  pour chaque phase de cycle de vie  $p$  ;

$\left[ FE_{ij/S(p)} \right]$  : matrice rectangulaire du flux entrant  $j$  dans le sous-système  $i$  constitutif du

système  $S$  pour chaque phase de cycle de vie  $p$  ;

$FE_{ij/S(p)}$  : quantité de flux entrant  $j$  dans le sous-système  $i$  constitutif du système  $S$  pour

chaque phase de cycle de vie  $p$  ;

$FI_{j(p)}$  : facteur d'impact du flux entrant  $j$  pour chaque phase de cycle de vie  $p$  ;

$\left[ FI_{j(p)} \right]$  : matrice colonne de facteur d'impact de flux entrant  $j$  pour chaque phase de

cycle de vie  $p$ .

Ensuite, valeur d'impact du système  $S$  pour chaque phase de cycle de vie  $p$  noté  $I_{S(p)}$

est :

$$I_{S(p)} = \sum_i \left[ I_{SS_{i/S(p)}} \right] \quad (2)$$

Et, la valeur d'impact du système  $S$  sur la frontière  $f$  de cycle de vie  $I_{S(f)} = \sum_p I_{S(p)}$

$$(3)$$

Facteurs d'impact unitaire :

Actuellement, Madagascar ne dispose pas des bases de facteurs d'émission sur les matériaux de construction. Recommandés par des experts en ACV [18], les données d'inventaire de base dans SIMAPRO sont modifiées pour correspondre aux contextes malgaches. Particulièrement, on tenait en compte les amonts des hydrocarbures malgaches [19]. SIMA PRO permet aussi de recueillir d'autres données d'inventaires et les traduit en facteur d'impact [18].

Les sources de données d'inventaire sont renseignées par le tableau ci-après.

Tableau 16 : Sources des données d'inventaire

Matériaux/engins/Service	Source des données d'inventaire
Remblai	Ecoinvent [20]
Granulat	Ecoinvent [20] / IVL [21] / CEREN [22]
Bitume	Eurobitume [23]
Enrobé	IVL [21] / Sitraka H. [24]
Emulsion de bitume (ECR)	Eurobitume [23]
Ciment	Ecoinvent [20]
Engins	FNTP [25]
Transport	Ecoinvent [20]

Spécificités techniques des engins de chantier :

FNTP [25] renseigne sur les spécifications techniques des engins routiers dont :

- La puissance  $P$ , la largeur de travail  $L_T$  et l'épaisseur maximale de travail  $e$  ;
- La vitesse de travail  $V$  associée à un coefficient de rendement  $k$  ;
- Le dosage  $d$  du dosimètre et le taux d'épandage  $T$  des produits ;
- Le débit théorique du compacteur  $Q/L$  ainsi que son rapport de nombre d'applications de charge et le nombre de passe  $N/n$ .

**Tableau 17** : Spécifications techniques des engins

Engin	$P$ (kW)	$L_T$ (m)	$e$ (m)	$V$ (km/h)	$k$	$T$	$d$	$Q/L$ (m <sup>3</sup> /h.m)	$N/n$	$n$
Niveleuse	160	2	0,2	11	0,75	-	-	-	-	-
Compacteur (Grave et sol)	103	-	-	-	-	-	-	300	1	-
Epandeur à dosimètre	75	2	0,2	11	0,75	-	0,04	-	-	-
Défonceuse	160	2	0,2	7	0,75	-	-	-	-	-
Malaxeur	228	2,5	0,2	6	0,75	-	-	-	-	-
Gravillonneur	160	2,5	-	7	0,75	30	-	-	-	-
Camion arroseur	160	2,5	-	7	0,75	1,3	-	-	-	-
Camion balayeur	160	2,2	-	10	0,75	-	-	-	-	1
Citerne à émulsion	200	4,2	-	4	0,75	1,3	-	-	-	-
Finisseur	79	5	-	0,27	0,75	168	-	-	-	-

Données sur les distances selon la localisation de la zone de l'étude :

La figure ci-après renseigne les données sur les distances.

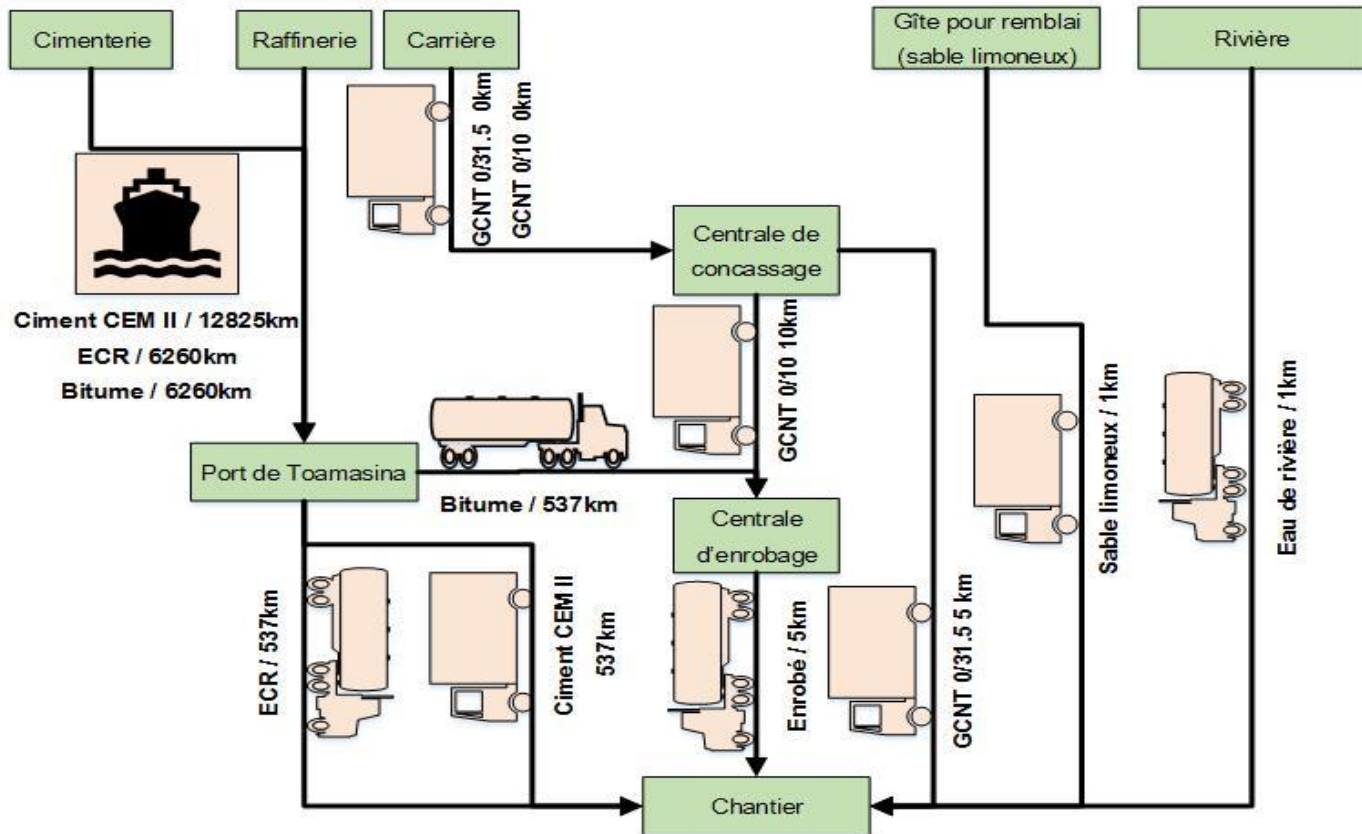


Figure 7 : Distances d'approvisionnement des matériaux

## 2.2. Résultats

### 2.2.1. Analyses techniques

#### 2.2.1.1. Calcul des valeurs admissibles

ALIZE [15] donne les valeurs suivantes :

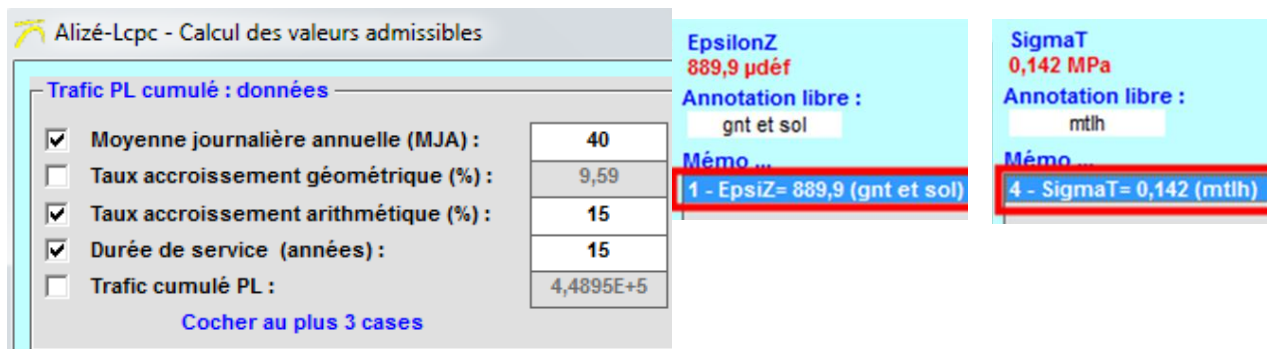


Figure 8 : Valeurs admissibles selon ALIZE

#### 2.2.1.2. Proposition des variantes selon ALIZEE LPC

Le guide de traitement des sols aux liants hydrauliques [26], recommande une couche de roulement en Béton Bitumineux Semi Grenue (BBSG) de 8cm d'épaisseur pour une classe de trafic TC2. Une couche d'accrochage en émulsion (ECR 65) précède l'épandage de BBSG [27].



### Scénario 1 :

Ce scénario de réhabilitation se caractérise par la mise en place d'une nouvelle couche d'assise en matériaux granulaires. La plateforme étant donc l'ancienne chaussée en état de fatigue. La nouvelle structure sera dimensionnée sur une classe de plateforme PF2. La mise en œuvre se fait selon le guide technique de CEBTP. [28]

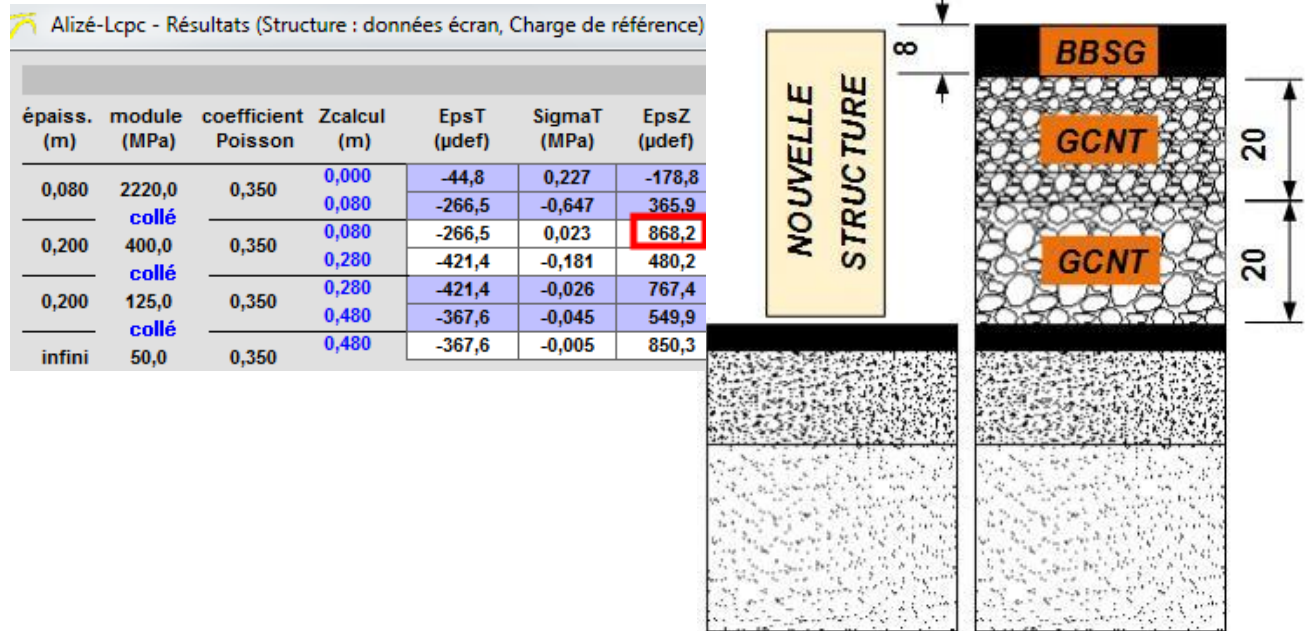


Figure 9 : Structure du scénario 1

BBSG : Béton Bitumineux Semi-Grenus

GCNT : Grave Concassé Non-Traitée

### Scénario 2 :

Ceci se fait par remblayage de l'ancienne structure avant de mettre en place la couche de roulement. Comme le remblai du gîte étant dans une mauvaise qualité, on a recours à une stabilisation moyennant du ciment. Le scénario 2 est aussi dimensionné sur un sol support de classe PF2. La mise en œuvre se fait selon le guide technique de LCPC [14], [26].

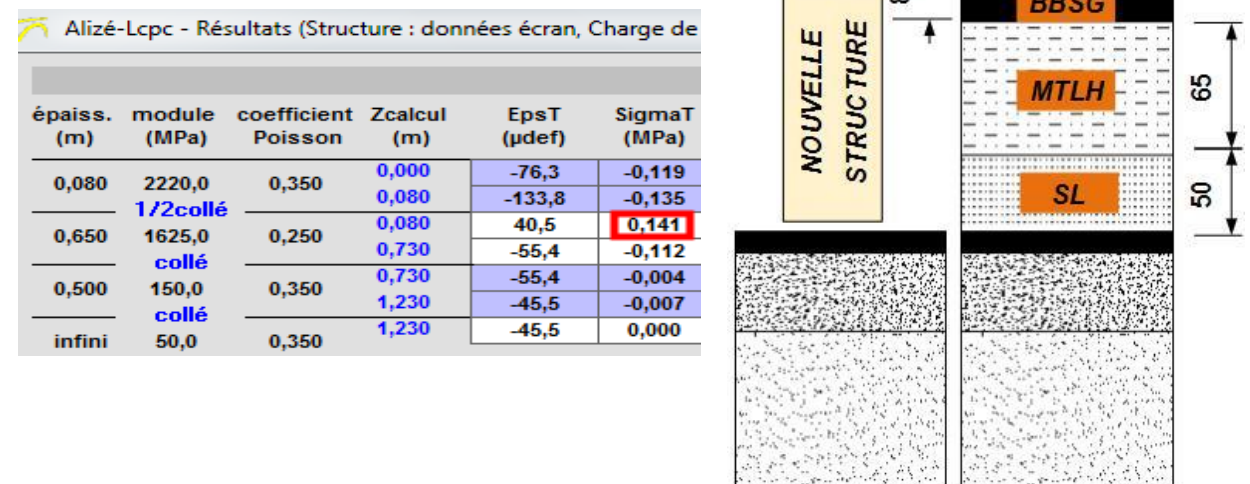


Figure 10 : Structure du scénario 2

BBSG : Béton Bitumineux Semi-Grenus

MTLH : Matériaux (SL) Traités aux Liants Hydrauliques SL : Sable Limoneux

Scénario 3 :

La zone d'étude est pauvre en matériaux de carrières [12]. Ainsi, le scénario 3 se distingue des autres, à la fois par la stabilisation au ciment in situ sur une certaine épaisseur de l'ancienne couche d'assise et aussi par l'apport des nouveaux matériaux granulaires. Les auteurs dans [29] recommandent cette technique de réhabilitation traditionnelle à l'échelle mondiale [30] au cas où une rareté de matériaux de carrières est constatée. Le scénario 3 est dimensionné sur un sol support de classe PF3, classe des matériaux sains de l'ancienne couche de fondation. La mise en œuvre se fait selon le guide technique de LCPC [31].

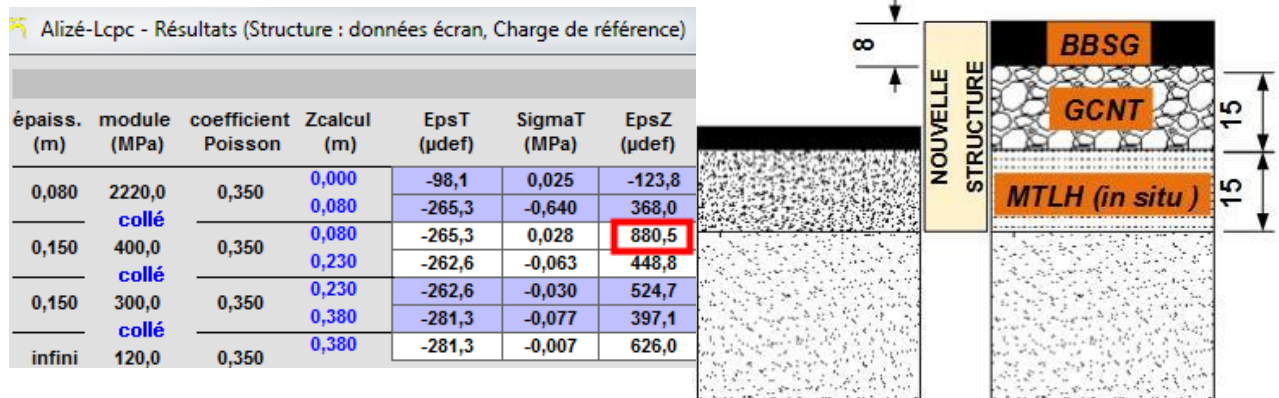


Figure 11 : Structure du scénario 3

BBSG : Béton Bitumineux Semi-Grenue GCNT : Grave Concassé Non-Traitée

MTLH : Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques (ancienne couche d'assise)

2.2.2. Analyses environnementales

Les flux des sous-systèmes utilisés dans les trois scénarios et les dosages massiques des matériaux sont dans les tableaux ci-après.

**Tableau 18** : Flux des sous-systèmes et les dosages massiques des matériaux

Scénario	Couche de forme non traité [m³]	Couche de fondation non-traitée [m³]	Couche de fondation stabilisée au CEMII [m³]	Couche de base non-traitée [m³]	Couche d'accrochage ECR [m²]	Couche de revêtement BBSG [m³]

Scénario 1	-	1100	-	1100	5500	440
Scénario 2	1100	-	3575	-	5500	440
Scénario 3	-	-	825	825	5500	440

Tableau 19 : Dosages massiques des matériaux

Matériaux intermédiaires composés (MIC)	Matériaux intermédiaires (MI) et sol à traiter			
	GCNT 0/10	Bitume 80/100	CEM II Importé	Sol à traiter
Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG)	94%[32]	6%[32]	-	-
Sol traité au ciment	-	-	4%[26]	96%[26]

#### 2.2.2.1. Scénario 1

La phase de transformation des matériaux primaires en matériaux intermédiaires (MI) ainsi que la phase de transformation des MI en Matériaux Intermédiaires Composés (MIC) sont les plus impactants. La phase de construction (fabrication) et du transport routier des matériaux vers le chantier occupent les rangs suivants. Son cycle de vie émet 71325,32kgéqCO<sub>2</sub> et consomme 887297,07MJ d'énergie primaire.

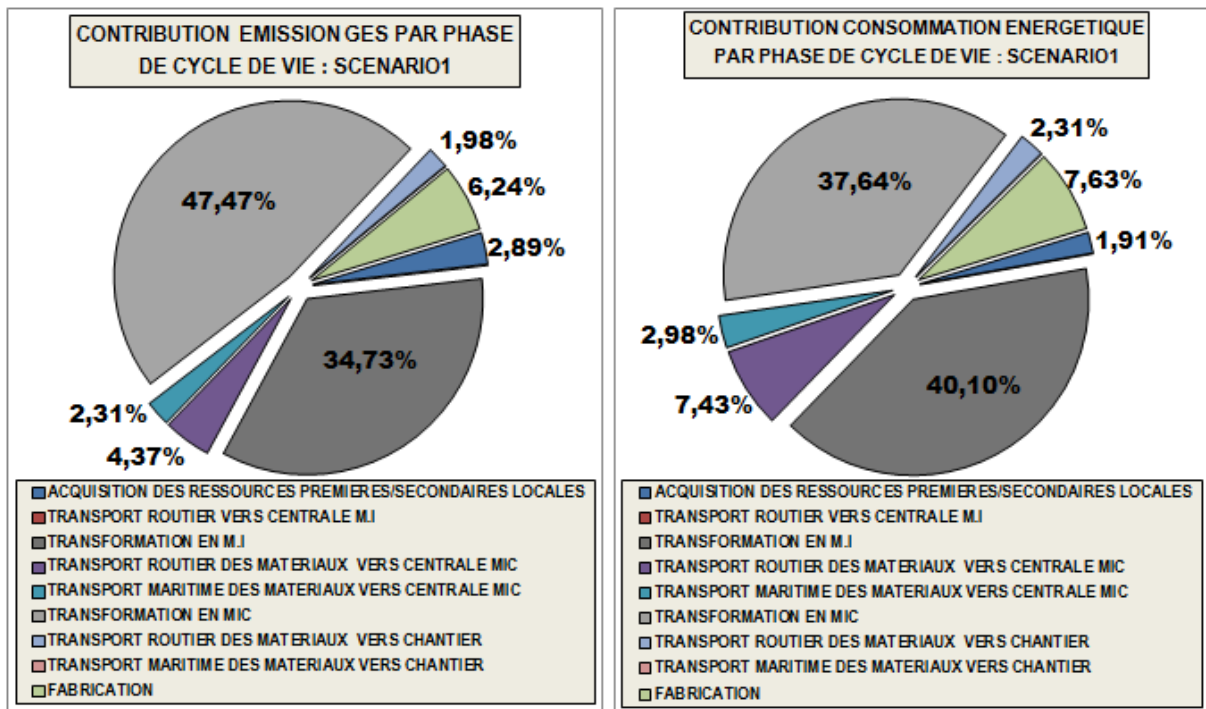


Figure 12 : Contributions par cycle de vie / scénario 1

Phase	Energie primaire (MJ)	Gaz à effet de serre (kgéqCO2)
<b>ACQUISITION DES RESSOURCES PREMIERES/SECONDAIRES LOCALES</b>	16 922,84 MJ	2 061,93 kgéqCO2
<b>TRANSPORT ROUTIER VERS CENTRALE M.I</b>	0,00 MJ	0,00 kgéqCO2
<b>TRANSFORMATION EN M.J</b>	355 813,29 MJ	24 768,99 kgéqCO2
<b>TRANSPORT ROUTIER DES MATERIAUX VERS CENTRALE MIC</b>	65 911,74 MJ	3 119,26 kgéqCO2
<b>TRANSPORT MARITIME DES MATERIAUX VERS CENTRALE MIC</b>	26 423,23 MJ	1 649,69 kgéqCO2
<b>TRANSFORMATION EN MIC</b>	334 016,10 MJ	33 858,00 kgéqCO2
<b>TRANSPORT ROUTIER DES MATERIAUX VERS CHANTIER</b>	20 461,73 MJ	1 414,33 kgéqCO2
<b>TRANSPORT MARITIME DES MATERIAUX VERS CHANTIER</b>	40,93 MJ	2,56 kgéqCO2
<b>FABRICATION</b>	67 707,20 MJ	4 450,55 kgéqCO2
<b>BILAN D'IMPACT</b>	<b>887 297,07 MJ</b>	<b>71 325,31 kgéqCO2</b>

Figure 13 : Résultats par cycle de vie / scénario 1

Sur la frontière de cycle de vie, le sous-système « couche de revêtement en matériaux bitumineux » a une part importante en termes d'impacts. Les couches de base non-traitée et de fondation non-traitée occupent les suivantes positions.

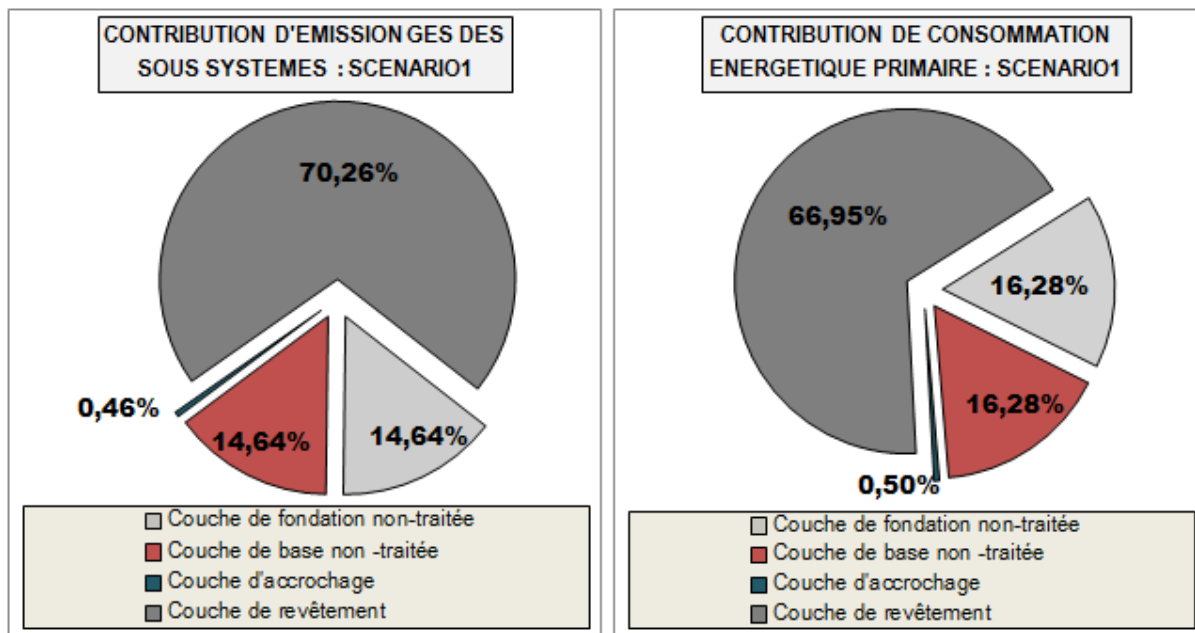


Figure 14 : Résultats par sous-systèmes / scénario1

### 2.2.2.2. Scénario 2

Visiblement, la phase de transformation des matières premières (MP) en Matériaux Intermédiaires (MI) tient une part importante en termes d'impact (Figure 10). La confection des Matériaux Intermédiaires Composés (MIC) puis la phase de transport routier des matériaux vers le chantier, suivi de la phase de construction, se succèdent aux positions suivantes. Son cycle de vie émet 338196,05kgéqCO<sub>2</sub> de GES et consomme 1996290,25MJ d'énergie primaire (Figure 11).

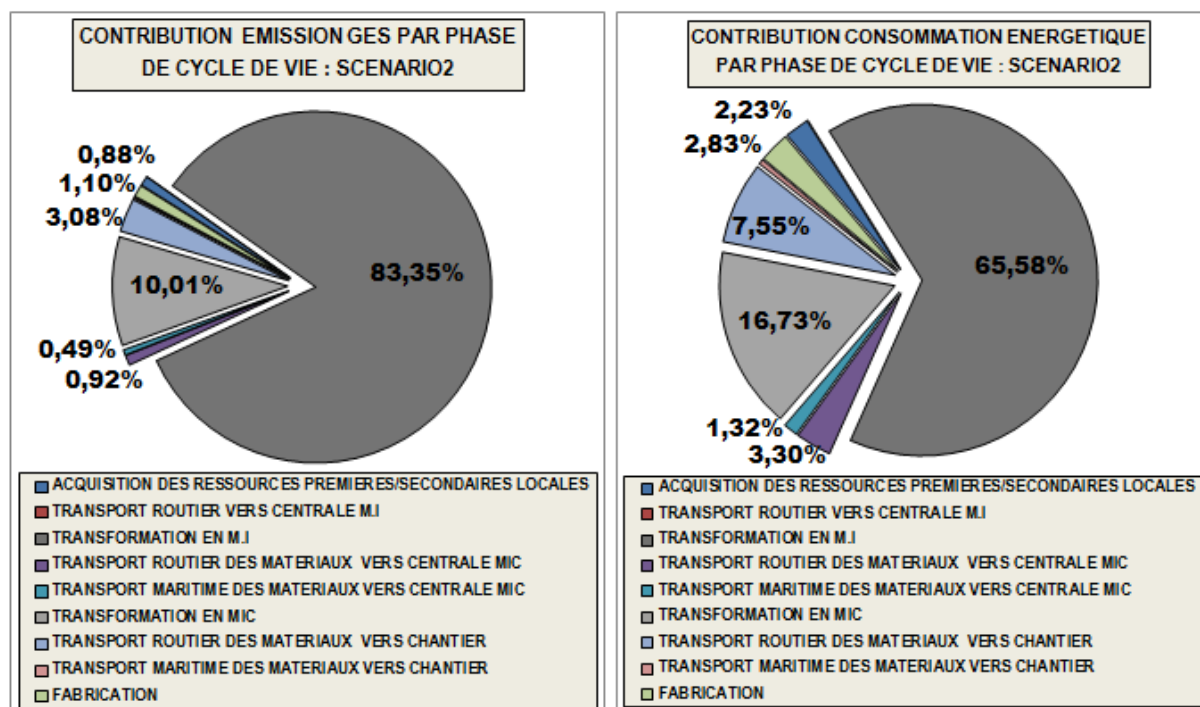


Figure 15 : Contributions par cycle de vie / scénario 2

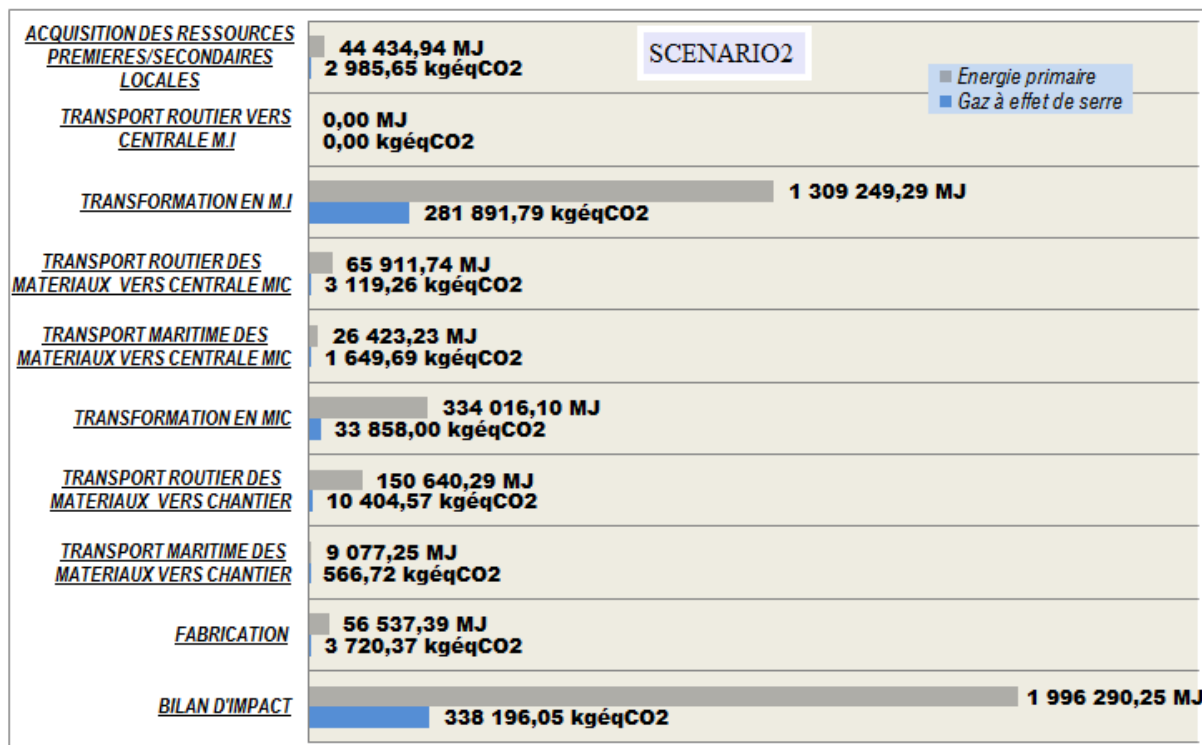


Figure 16 : Résultats par cycle de vie / scénario 2

Le sous-système « couche de fondation stabilisée » est décisif en termes d'impacts environnementaux. A la suivante échelle, Le S.S « couche de revêtement » le succède dans la position suivante (Figure 12).

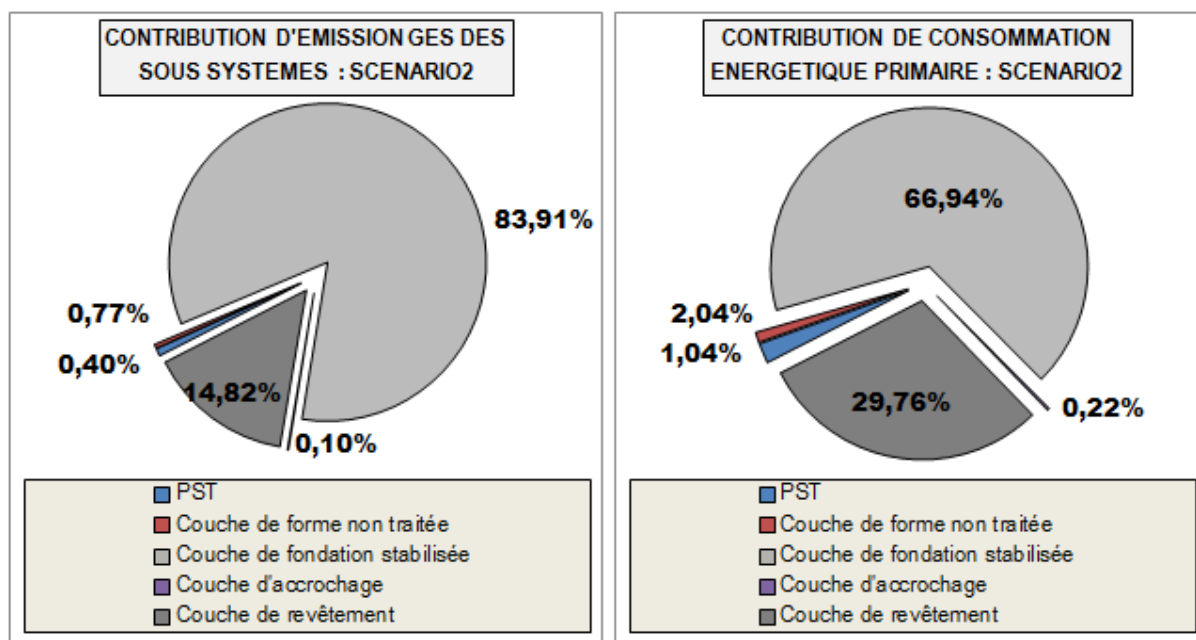


Figure 17 : Résultats par sous-systèmes / scénario 2

### 2.2.2.3. Scénario 3

Suivi par la phase de façonnage des MIC, ce scénario est marqué par la dominance de la phase de transformation des MP en MI (Figure13).

La construction et le transport routier des matériaux vers le chantier, se succèdent aux suivantes positions. Son cycle de vie émet 124126,90kgéqCO<sub>2</sub> de GES et consomme 1020710,06MJ d'énergie primaire (Figure 14).

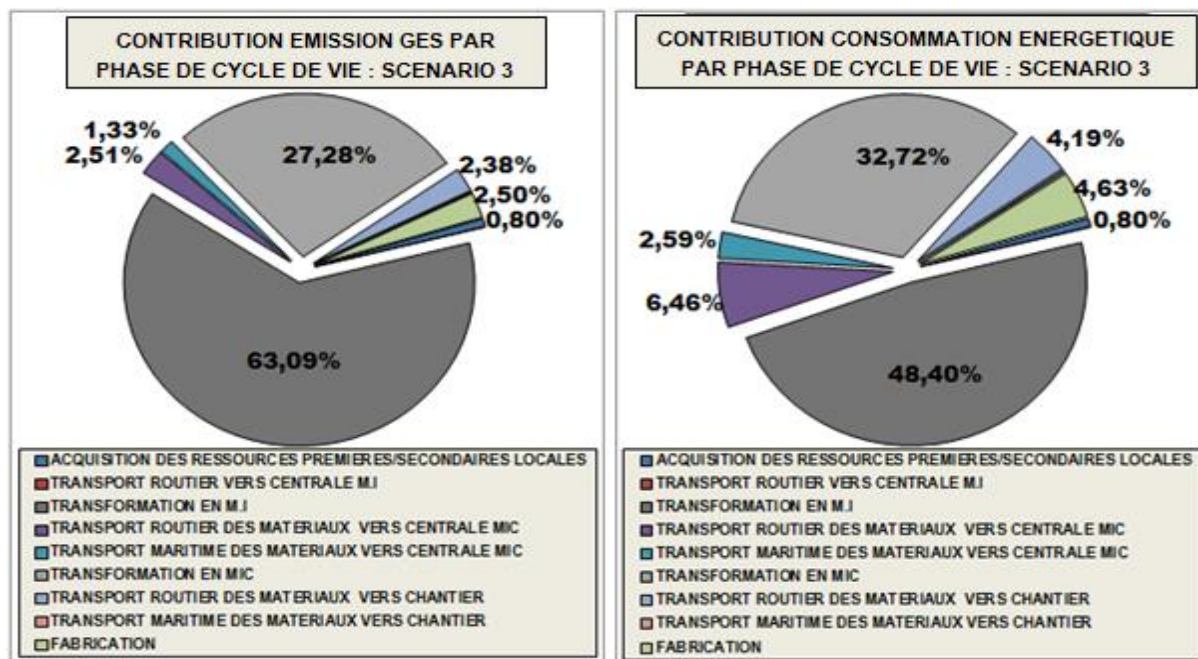


Figure 18 : Contributions par cycle de vie / scénario 3

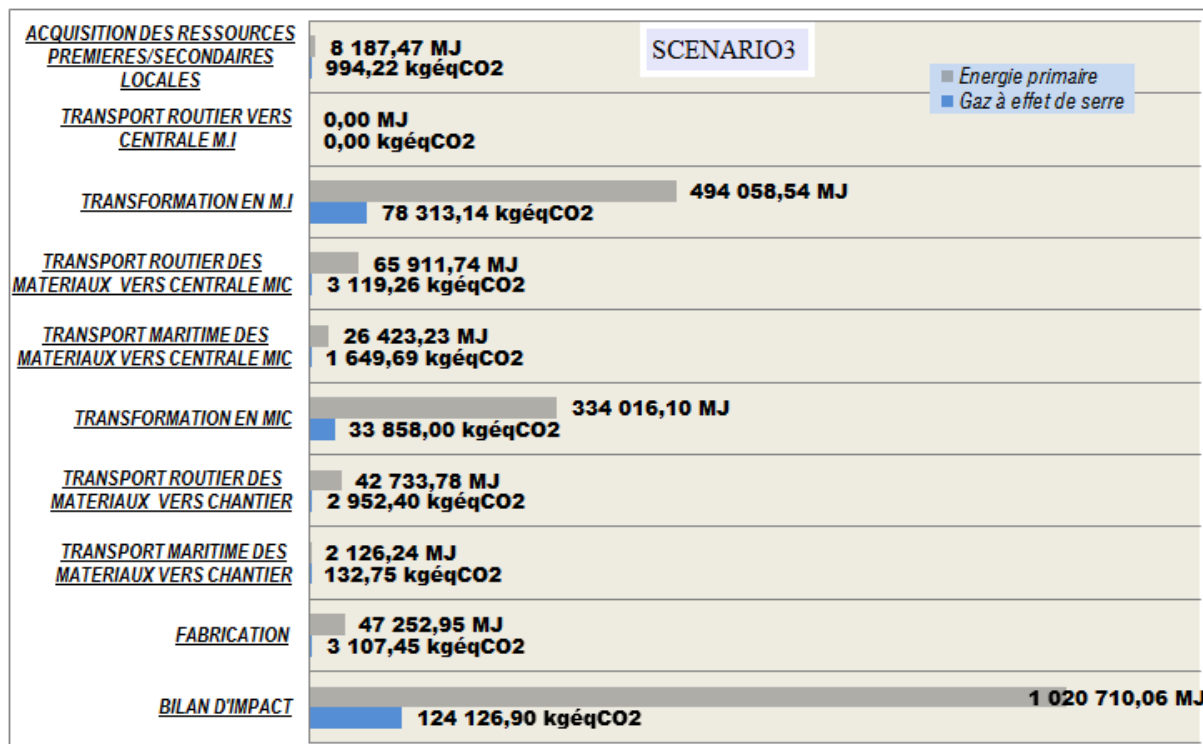
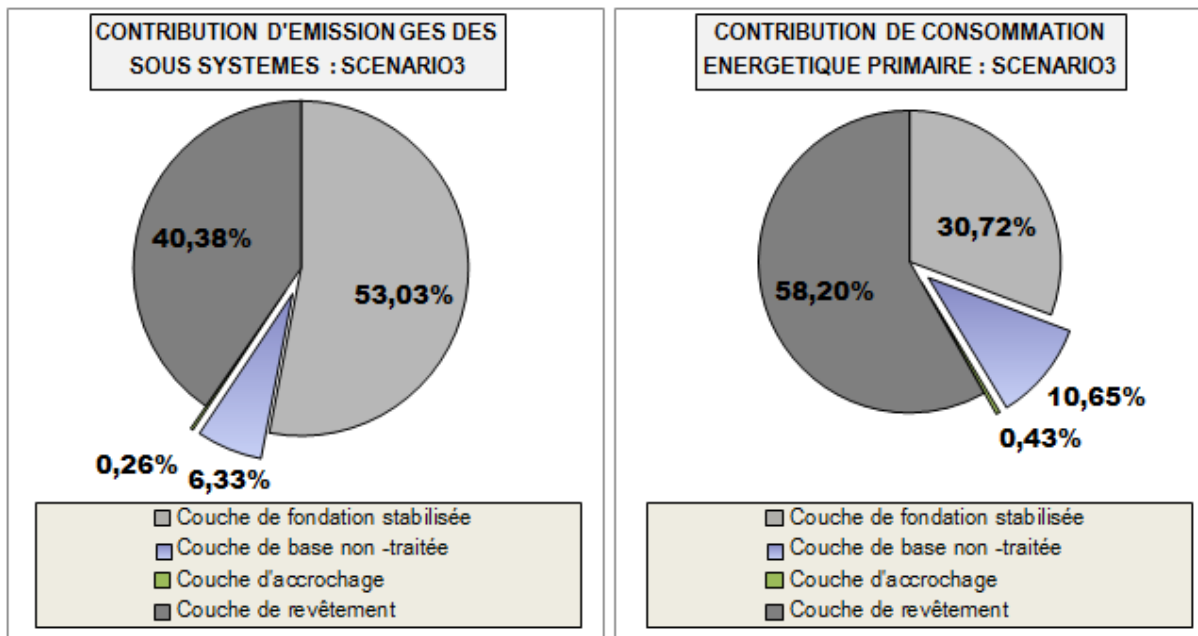


Figure 19 : Résultats par cycle de vie / scénario 3

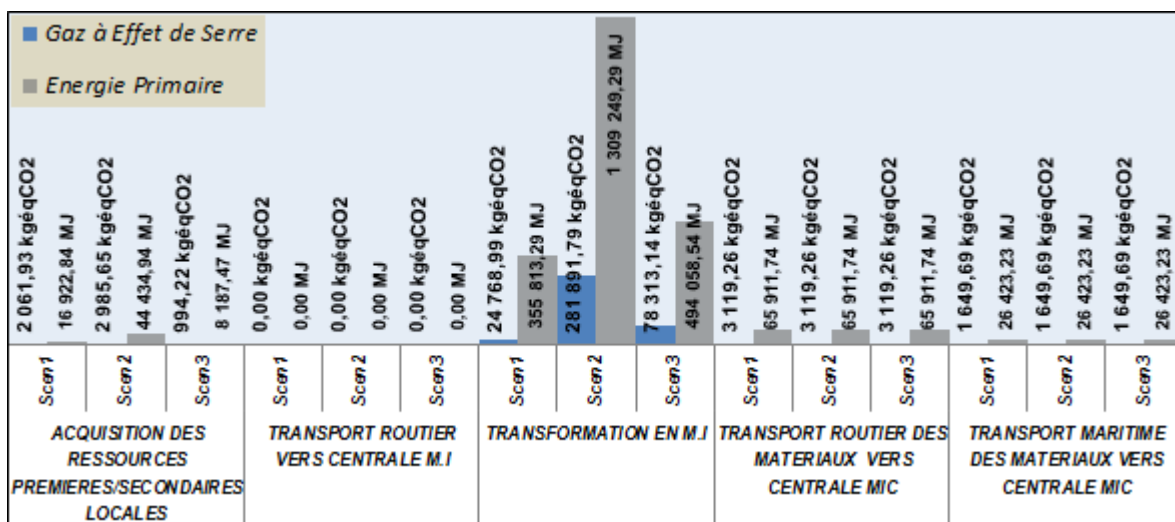
A l'échelle des Sous-Systèmes, la couche de fondation stabilisée et la couche de revêtement sont les plus marquantes en termes d'impact. La couche de base non-traitée se situe à la position suivante (Figure 15).



**Figure 20 :** Résultats sous-systèmes / scénario 3

#### 2.2.2.4. Résultats de comparaison de cycle de vie de chaque scénario

Sur un bilan d'impact égal à 71325,31kgéqCO<sub>2</sub> de Gaz à Effet de Serre et 887297,07MJ d'énergie primaire, le scénario 1 est jugé comme le moins impactant. Le scénario 3 se trouve à la seconde place avec un surplus d'émission de Gaz à Effet de Serre et d'Energie Primaire, respectivement de 74,03% et 15,04%, par rapport au scénario 1. Le scénario 2 est le plus impactant des trois. Les scénarios 2 et 3 où interviennent le ciment en moyenne (72,6 tonnes) et grande quantité (314,6 tonnes), comme produit de stabilisation, se distinguent en pic lors de la phase de transformation des MP en MI (Figure 16 et Figure17).



**Figure 21 :** Comparaison de cycle de vie des trois scénarios

Le scénario 2 est le plus impactant de tous en termes de transport routier des matériaux vers chantier. Comme étant structurés sous une même couche de revêtement, les trois scénarios sont au même niveau d'impact lors de la phase de production des MIC.



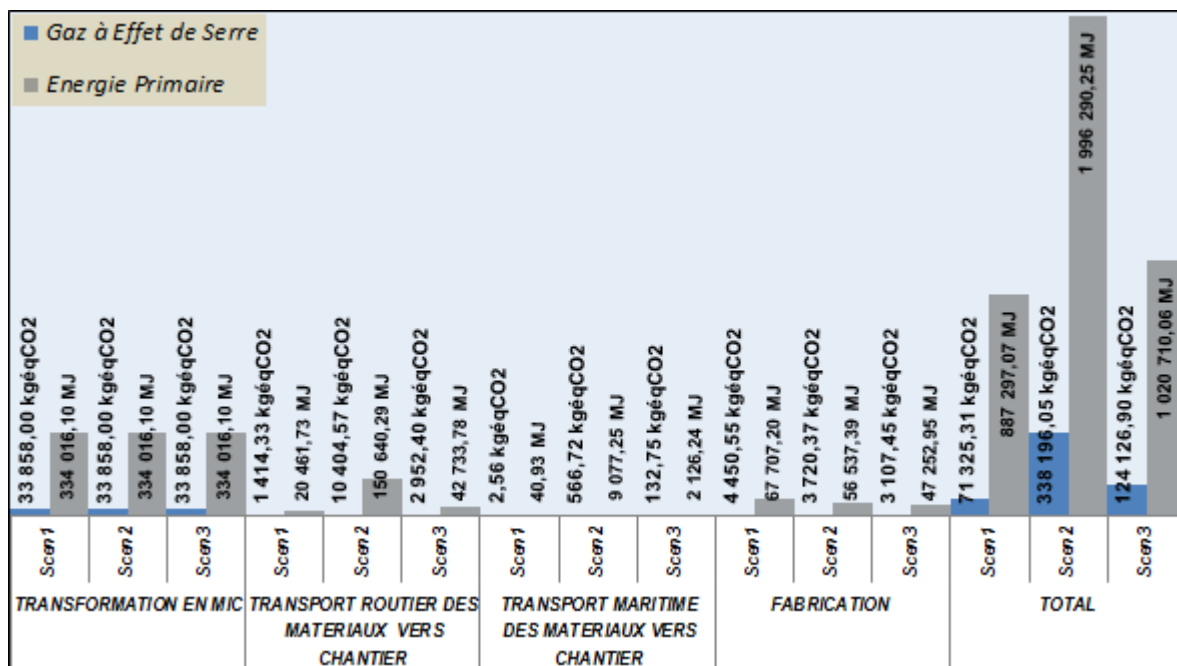


Figure 22 : Comparaison de cycle de vie des trois scénarios

### 2.3. Discussions

Le premier point commun des trois scénarios se situe autour de la phase de production des Matériaux Intermédiaires (MI) et Matériaux Intermédiaires Composés (MIC). En son ensemble, elle dépasse largement les autres phases en termes d'impact. Plusieurs auteurs attestent cette version. Les auteurs de [33] stipulent que la phase de production des matériaux routiers contribue plus de 50% des impacts globaux. Les auteurs de [34] soulignent que la phase de production des matériaux est la plus énergivore. En exemple, les auteurs de [35] attribuent une part de 52,3% en émission de GES pour la production des matériaux routiers, lors de la construction d'une chaussée neuve. En accord avec notre résultat, les auteurs de [36] ont conclu que la production du ciment et celle du bitume sont les plus impactant.

Quant aux transports, ces derniers succèdent la phase de production des matériaux (MI) et (MIC). On trouve que le transport routier est plus impactant par rapport au transport maritime. A cet égard, les bases des données d'Ecoinvent [37] donnent des facteurs d'impact oscillant de 0,0127 à 0,816kgéqCO<sub>2</sub>/tkm et de 0,146 à 11,8kgéqCO<sub>2</sub>/MJ pour le transport routier [20]. Ces facteurs d'impact sont en fonction de la classe PTAC de l'engin, des catégories des voies, du facteur de chargement et de l'hypothèse de retour. Aussi, pour le transport maritime des marchandises et des hydrocarbures, respectivement Ecoinvent [37] énumère des facteurs d'impact en GES de 0,00885 et 0,00467kgéqCO<sub>2</sub>/tkm puis 0,138 et 0,0748MJ/tkm des facteurs d'impact en consommation énergétique. Dans le même sens, selon la banque mondiale [4] l'émission relative au transport routier contribue jusqu'à 72% contre 8% pour le cas du transport maritime, vis-à-vis des émissions globales dues au transport.

Egalement, la phase de fabrication se trouve à la position suivante en termes d'impact. Les auteurs de [17] ont conclu que sur une frontière « berceau au portail », les phases de transport et la construction succèdent la phase de production des matériaux et à faible part en termes d'impact.

Ensuite, la phase d'extraction des ressources naturelles locales, qui sont dans notre cas, les roches mères et l'eau de rivière de compactage, est très peu significative par rapport aux autres phases. L'auteur de [22] précise que l'extraction des roches mères conduit à un faible impact aussi bien en consommation énergétique qu'en émission de GES. Paradoxalement, certains auteurs comme ceux de [38] attribuent une part de 88% pour la phase des procurations des matériaux bruts. En effet, le même auteur [38] inclut l'acquisition du pétrole brut au sein de cette phase. Pourtant, dans cette étude la phase d'extraction concerne les ressources naturelles locales seulement. C'est ainsi que la phase d'acquisition du pétrole brut, qui se fait à l'extérieur, s'intègre à la phase de production du bitume.

Vis-à-vis des sous-systèmes, les autres couches sont très peu impactant par rapport aux couches stabilisées et hydrocarbonées. Selon la banque mondiale [4], la couche de revêtement en Béton bitumineux dépasse largement les autres couches non-liées et non-traitées en termes d'impact. L'utilisation du ciment en tant que produit de traitement ne fait qu'accentuer l'ampleur de l'impact. Les auteurs de [39] ont conclu que parmi les huit matériaux de construction stabilisés aux liants hydrauliques analysés, les produits à base du ciment sont ceux qui ont une performance énergétique et environnementale médiocre. D'ailleurs, la banque mondiale [4] met en garde sur la procédure de traitement du sol sur l'impact en GES du produit de traitement. Constatons ainsi que sur les scénarios 2 et 3 où les SS traités au ciment devancent la couche de revêtement en béton bitumineux en émission de GES, même en quantité moyenne (scénario 3). L'industrie de ciment est qualifiée comme fortement émettrice de gaz à effet de serre [40]. Parallèlement, les auteurs de [35] notifient que, l'industrie est le responsable des 38,5% des émissions industrielles en GES européen. Du côté énergétique, le scénario 2, scénario qui demande une forte quantité de ciment (314,6 tonnes), devance considérablement (67,22%) la consommation énergétique de la couche de revêtement en béton bitumineux (29,86%). On avance une consommation énergétique comprise entre 3000 et 8000kJ/tonne de clinker pour le besoin calorifique et entre 70 et 160kWh/tonne de ciment pour le besoin en énergie électrique [40].

En gros, bien qu'une mise en œuvre plus compliquée, le scénario 2 a aussi la performance environnementale la plus déplorable. Cela étant justifié par l'utilisation du ciment en grande quantité qui accentue les effets environnementaux néfastes du

bitume, dont son utilisation reste pour le moment inévitable. Dans la même quête, le scénario 3 suit le précédent scénario, dans lequel le ciment entre dans le flux du système de produit, mais en quantité moyenne (72,6tonnes). Au final, le scénario 1, scénario qui se singularise par sa structure d'assise qui est exclusivement en matériau granulaire, a une meilleure performance environnementale.

### **3. CONCLUSION**

Effectivement, le remblayage massif suivi d'un traitement au ciment (scénario 2) est exclu de la prise de décision en relation avec la quête du développement durable. Le résultat montre aussi un certain contraste entre la technique de traitement in situ au ciment (scénario 3) et à celle qui se fait avec apport de nouveaux matériaux granulaires (scénario 1). En effet, dans une circonstance comme dans l'autre, si les matériaux granulaires sont en abondance tout autour du chantier, notre choix est porté pour le scénario 1, ce qui n'est pas le cas pour ce chantier [12], [13]. Ainsi, dans un souci d'économie des matériaux granulaires, ou dans le cas d'une rareté exceptionnelle de ces matériaux aux environnants du chantier, le choix de réhabilitation par traitement au ciment in situ (scénario 3) est plutôt évident.

Au bout du compte, l'utilisation du bitume dans la couche de revêtement semble encore inévitable pour Madagascar. Aussi, techniquement, l'utilisation du ciment dans les couches d'assise solutionne leur problème de portance [31]. Cependant, du côté environnemental, son usage excessif sera une mauvaise décision (scénario 2). Espérons ainsi que cette étude constitue une piste de prise de décision pour les parties prenantes de l'infrastructure routière à Madagascar.

Enfin, l'intégration d'autres indicateurs d'impact et d'autres phases de cycle de vie pourraient ouvrir une nouvelle perspective d'étude. L'analyse hybride « cycle de vie » et « coût de cycle de vie » s'avère aussi très importante en vue d'une prise de décision rationnelle [1].

### **Références**

- [1] C. Thiel, T. Stengel, and C. Gehlen, Life cycle assessment (LCA) of road pavement materials, in *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Elsevier, 2014, pp. 368–403
- [2] S. Liu *et al.*, Contribution of different sectors to developed countries' fulfillment of GHG emission reduction targets under the first commitment period of the Kyoto Protocol, *Environ. Sci. Policy*, vol. 61, pp. 143–153, Jul. 2016
- [3] IEA, CO2 Emissions from Fuel Combustion, 2015
- [4] The World Bank, Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation, Jun-2011

- [5] ISO, ISO 14040 : Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Principes et cadre, 1997
- [6] ISO, ISO 14041 : Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire. 1998
- [7] ISO, ISO 14042 : Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Évaluation d'impact du cycle de vie, 2000
- [8] ISO, ISO 14043 : Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Interprétation, 2000
- [9] ISO, ISO (2006a) ISO 14040 : 2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, 2006
- [10] ISO, ISO (2006b) ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment –Requirements and guidelines, 2006.
- [11] H. Azarijafari, A. Yahia, A., and A. Ben, Life cycle assessment of pavements : reviewing research challenges and opportunities, no. J.Cleaner Prod. 112,2187-2197, 2016
- [12] LNTPB, Caractéristiques des carrières RN 35 Mahabo-Morondava, 2011
- [13] LNTPB, Caractéristiques des gisements meubles RN35 Mahabo-Morondava, 2011
- [14] LCPC / SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Dec. 1994
- [15] LCPC, ALIZE-LCPC Manuel d'utilisation de la version 1.2, 2008
- [16] BCEOM, LBI, and INFRAMAD, Comptages du trafic de véhicules sur la RN35 à l'ouest de Mahabo, 2001
- [17] R. Jiang and P. Wu, Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment : A critical review and future directions, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 77, pp. 148–163, Dec. 2019
- [18] Pré consultants, SimaPro 7 tutorial, Jun-2007
- [19] OMH, Bulletin pétrolier, 2019
- [20] D. Kellenberger, H. Althaus, N. Jungbluth, and T. Künniger, Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent data v2.0 No. 7, 2007
- [21] S. Hakan, Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis, 2001
- [22] CEREN, Energies par produit, 1999
- [23] EUROBITUME, Life cycle inventory : BITUMEN, 2012
- [24] R. Sitraka H., Bilan énergétique et recherche d'économie d'énergie sur le poste d'enrobage du site industriel RN7-PK 13 de COLAS Madagascar, Dec-2014
- [25] FNTP, Commission du matériel de la FNTP, Répertoire des principaux matériels de génie civil. Catalogue proposé par la Fédération nationale des travaux publics, pp.157-237, 2000

- [26] LCPC / SETRA, Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, Jan. 2000
- [27] J. Berthier, ENPC, and BCEOM, Projet et construction de routes, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction
- [28] CEBTP, Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, 1984
- [29] J. Ren, S. Wang, and G. Zang, Effects of recycled aggregate composition on the mechanical characteristics and material design of cement stabilized cold recycling mixtures using road milling materials, *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, p. 118329, May 2020
- [30] D. X. Xuan, L. J. M. Houben, A. A. A. Molenaar, and Z. H. Shui, Mechanical properties of cement-treated aggregate material – A review, *Mater. Des.*, vol. 33, pp. 496–502, Jan. 2012
- [31] LCPC / SETRA, Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des assises de chaussées. Guide technique, Sep-2007
- [32] AFNOR, Norme française NF P 98-130, revêtement de chaussées, Bétons Bitumineux Semi-Grenus (BBSG), Définition – Composition – Classification.
- [33] T. M. Gulotta, M. Mistretta, and F. G. Praticò, A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads, *Sci. Total Environ.*, vol. 673, pp. 585–593, Jul. 2019
- [34] Park and Hwang, Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways, *J. Constr. Eng. Manag.*, 2003
- [35] T. Blankendaal, P. Schuur, and H. Voordijk, Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach, *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 27–36, Mar. 2014
- [36] U.-M. Mroueh, P. Eskola, and J. Laine-Ylijoki, Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction, *Waste Manag.*, vol. 21, no. 3, pp. 271–277, 2001
- [37] Ecoinvent, Ecoinvent center, Life Cycle Inventories of Building Products, Data V.2 / Cement Products & Process. 2007
- [38] Kayo and Watanabe, Life cycle greenhouse gas emissions of woodchip-paved walkways using tsunami salt-damaged wood : examination in Otsuchi, Iwate Prefecture. *J. Wood Sci.* 61 (6), 620–629., 2015
- [39] S. Marcelino-Sadaba, J. Kinuthia, J. Oti, and A. Seco Meneses, Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials, *Appl. Clay Sci.*, vol. 144, pp. 121–130, Aug. 2017
- [40] IEPF, Le diagnostic énergétique d'une cimenterie, Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie. 2011